



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Чорноморський національний університет
імені Петра Могили

Кафедра управління земельними ресурсами

Клименко Сергій Сергійович

«Моделювання вертикальних переміщень на підземних газосховищах»

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти другого (магістерського) рівня

галузі знань 19 «Архітектура та будівництво»

спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій»

за освітньо-професійною програмою «Землеустрій та кадастр»

Науковий керівник:

Перович Л.М., д-р техн. наук, професор

Рецензент:

ФОП Лановський О.В.

Миколаїв - 2025

Зміст

ВСТУП	3
Розділ 1. Огляд літератури та аналітичний огляд проблеми	5
1.1 Геомеханічні процеси в надрах при закачуванні та відборі газу	5
1.2. Фактори, що впливають на вертикальні переміщення земної поверхні над ПГС ...	11
1.3. Геомеханічні основи деформаційних процесів у товщі порід при експлуатації підземних газосховищ	17
1.4. Методи дослідження та моделювання вертикальних переміщень над підземними газосховищами	24
1.5. Фізико-геологічна характеристика та локалізація умовного ПГС	39
1.6. Загальна характеристика експлуатації підземних газосховищ	42
1.7. Основні фактори, що впливають на вертикальні переміщення	50
1.8. Вплив циклів закачування та відбору газу на деформації	54
1.9. Чисельне моделювання вертикальних переміщень гірського масиву при експлуатації підземних газосховищ	59
Розділ 2. Теоретичні основи та математична модель вертикальних переміщень	63
2.1 Фундаментальні рівняння геомеханіки пористих середовищ	63
2.2 Теорія поропружності Біо та зв'язана модель фільтрації	68
2.3 Конститутивні моделі нелінійної поведінки гірських порід (Пластичність)	71
2.4 Методологія чисельної реалізації (Метод кінцевих елементів)	73
2.5 Вибір геомеханічної моделі та програмного середовища	76
2.6 Початкові та граничні умови чисельної задачі	80
2.7 Фізико-механічні параметри ґрунтового масиву	82
2.8 Сценарії чисельного моделювання циклічного навантаження	85
Розділ 3. Моделювання вертикальних переміщень та аналіз чутливості	89
3.1 Результати моделювання циклічного навантаження (Сценарії А та Б)	89
3.2 Просторовий розподіл вертикальних переміщень	91
3.3 Аналіз чутливості ключових параметрів	94
3.4 Обговорення результатів чисельного моделювання	95
3.5 Фізична інтерпретація та геомеханічні механізми	98
3.6 Практичні рекомендації та пропозиції	100
РОЗДІЛ 4. СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ОХОРОНОЮ ПРАЦІ (СУОП) ТА ВІДПОВІДАЛЬНІСТЬ ПРАЦІВНИКІВ	102
4.1. Методологія Ідентифікації та Оцінки Ризиків на Робочому Місці	102
4.2. Ієрархія засобів контролю ризиків та принципи запобігання небезпекам	103
4.3. Моніторинг, аудит та безперервне вдосконалення Системи управління охороною праці	105
Висновки	108
Список використаних джерел	111

ВСТУП

Актуальність теми: підземні сховища газу є невід'ємною складовою загальної газотранспортної та енергетичної інфраструктури України. Основна функція цих сховищ полягає у збалансуванні сезонних коливань споживання природного газу, що підвищує надійність постачання, а також стабільність енергетичної системи країни. Циклічні операції закачування та відбору з підземного сховища можуть призвести до зміни порового тиску в гірських породах, що спричиняє перерозподіл напружено-деформованих станів у межах масиву та вертикальні зміщення поверхні землі, які приблизно становлять кілька сантиметрів на рік вгору або вниз. Певні умови створюють потенційну загрозу для інженерних споруд, екології та навіть стабільності самої системи зберігання газу. Збільшення обсягів зберігання газу разом зі збільшенням навантаження через газотранспортну систему вимагає належного прогнозування, включаючи моніторинг вертикальних рухів. Моделювання таких деформацій допоможе зрозуміти вплив технологічних режимів роботи системи зберігання газу на гірський масив, сприятиме запобіганню аваріям та оптимізації роботи об'єкта.

Мета роботи: розробка та захист способу моделювання вертикальних рухів, спричинених змінами тиску в підземних сховищах газу, використовуючи сучасні геомеханічні методи та числові підходи.

Завдання роботи: проаналізувати геологічну будову та принципи роботи ПСГ. Розглянути сучасні методи моніторингу та моделювання деформацій земної поверхні. Сформувати геомеханічну модель гірського масиву з урахуванням фізико-механічних властивостей гірських порід. Розробити числову модель вертикальних зміщень при зміні тиску в пласті. Провести моделювання на основі типових вхідних параметрів ПСГ.

Проаналізувати отримані результати, оцінити їх практичне застосування та запропонувати рекомендації щодо контролю безпечної експлуатації ПГС.

Об'єкт дослідження: процеси вертикальних переміщень земної поверхні, пов'язані зі змінами тиску в підземних газосховищах.

Предмет дослідження: геомеханічні та числові моделі вертикальних переміщень гірського масиву при циклічному навантаженні ПГС.

Методи дослідження: геомеханічні підходи до аналізу напружено-деформованого стану; числове моделювання на основі методу скінченних елементів (МСЕ); оцінка даних за допомогою геодезичного моніторингу та супутникової інтерферометрії; комп'ютерне моделювання у спеціальному програмному забезпеченні (наприклад, Plaxis, Abaqus або їх аналогах); методи статистичної обробки результатів.

Наукова новизна роботи: удосконалено підхід до оцінювання впливу технологічних режимів роботи ПГС на вертикальні переміщення земної поверхні шляхом застосування сучасних числових моделей та узагальнення методичних рекомендацій для прогнозування деформацій.

Практичне значення роботи: результатом цього буде підвищення точності спостережень за техногенними деформаціями під час практичної експлуатації газосховища, впровадження оптимальних режимів закачування та відбору газу, проведення оцінки ризиків та вжиття превентивних заходів проти надзвичайних ситуацій.

Структура роботи: магістерська робота складається зі вступу та чотирьох розділів, що завершуються висновком та списком використаних джерел. Загальний обсяг становить 115 сторінок.

Розділ 1. Огляд літератури та аналітичний огляд проблеми

1.1 Геомеханічні процеси в надрах при закачуванні та відборі газу

Підземні сховища газу працюють завдяки циклічним коливанням порового тиску гірських порід. При закачуванні газу тиск у пласті зростає; при його відборі — знижується. Ці коливання призводять до динамічної реакції гірського масиву, що виражається в перерозподілі напружень і деформацій, що може призвести до зміщень поверхні. Знання геомеханічних процесів необхідне для оцінки надійності зберігання газу, а також для прогнозування вертикальних рухів поверхні ґрунту.

Масив у горі являє собою складну багат шарову структуру для підземного сховища газу, що включає породи з різними властивостями пружності, пластичності та фільтрації. Взаємодія механічних та гідродинамічних процесів, спричинених змінами тиску в пласті, визначає напружено-деформований стан масиву.[1]

1) Тиск, що наростає в резервуарі під час закачування газу.

Коли поровий тиск у породі збільшується, виникають додаткові сили, що призводять до розширення каркаса гірського масиву. Це, як наслідок, збільшує об'єм пор і змінює ефективні напруження. Такі деформації є оборотними в пружних породах, але пластичні зміщення можуть залишатися в слабо цементованих або водонасичених породах. Збільшення тиску також може призвести до мікротріщиноутворення або подальшого розкриття вже існуючих тріщин; тим самим проникність змінюється.

2) Зниження тиску під час відбору газу

Зі зниженням порового тиску, каркас гірських порід зазнає більшого

навантаження від ваги над шарами. Це може спричинити ущільнення (консолідацію) порід, а також змінити пористість, а також проникність - вертикальний рух поверхні землі шляхом просідання. Ступінь цих деформацій залежить від літології породи, її глибини, товщини пласта та швидкості видобутку газу.

3) Перерозподіл напружень у гірському масиві Геомеханічні явища пов'язані зі зміною ефективних напружень σ' , які визначаються співвідношенням:

$$\sigma' = \sigma - p,$$

де σ — повні напруження, p — поровий тиск. Підвищений поровий тиск зменшує ефективні напруження; це може призвести до зниження стійкості породи. Знижений поровий тиск збільшує напруження, що сприяє ущільненню. Це призводить до постійно змінного стану напруження-деформації в зоні ПГС.

4) Взаємозв'язок гідродинамічних та механічних процесів Гідродинаміка та механіка пов'язані для потоку через пористі породи. Зміна тиску викликає деформацію, яка впливає на гідродинамічні властивості пласта. Така взаємодія підпадає під теорію поропружності Біо, популярний підхід до моделювання геомеханічної поведінки в ПГС.[2]

5) Формування вертикальних переміщень земної поверхні Циклічні зміни тиску спричиняють:

- підняття поверхні під час закачування газу;
- просідання під час відбору газу;
- можливе накопичення залишкових деформацій після завершення циклу.

Величина таких зміщень зазвичай становить від кількох міліметрів до сантиметрів, залежно від типу резервуара, його місткості та фізико-механічних властивостей гірських порід. Саме на основі цих процесів робляться прогнози вертикальних зміщень та визначають необхідність геодезичного та супутникового моніторингу.

б) Потенційні ризики та наслідки геомеханічних змін
Порушення напружено-деформованого стану може спричиняти:

- зміну фільтраційних характеристик колектора;
- утворення тріщин у перекриваючих породах;
- деформації наземних споруд і комунікацій;
- розгерметизацію газосховища.

Таким чином, моделювання геомеханічних процесів є важливим для забезпечення безпечної експлуатації ПГС.

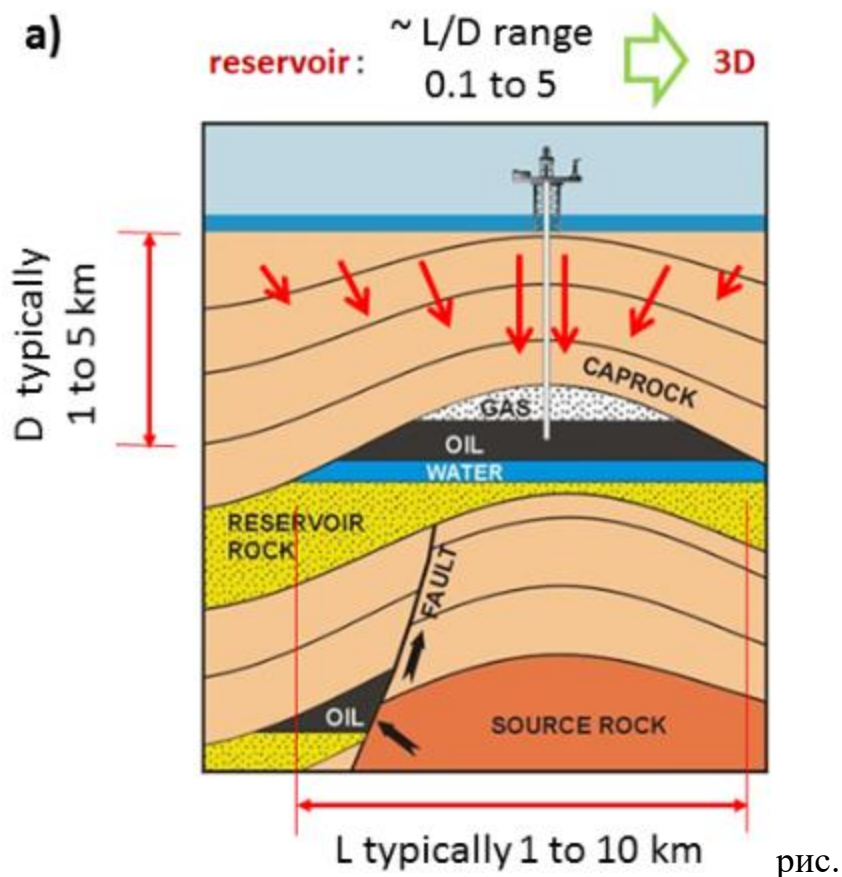


Рис. 1.1. Принципова схема функціонування підземного газосховища та виникнення вертикальних переміщень земної поверхні (підняття при закачуванні, осідання при відборі газу).[3]

Схема підземного газосховища (ПГС) у розрізі, що демонструє шари (колектор, покришка) та концепцію осідання/підняття земної поверхні внаслідок зміни тиску.[4]

Під час експлуатації підземного сховища газу слід зазначити, що геомеханічні явища включають не лише пружні чи пластичні деформації. Реакція гірських порід на зміни тиску в пласті є складною, і важливим компонентом є повзучість – деформація матеріалу з часом під тривалим навантаженням. Для сольових та глинистих шарів повзучість має великий

вплив на розвиток деформацій навіть при сталому тиску. У випадку циклічної роботи ПГС цей ефект може накопичуватися, утворюючи додаткові залишкові зміщення.

Основним фактором є створення зон аномального тиску, які можуть розвиватися локально, оскільки фільтрація газу не завжди відбувається рівномірно або через неоднорідність фізичних та механічних властивостей гірських порід. Це може призвести до локальних коливань напружень, що ускладнює прогнозування деформацій та вимагає тривимірного моделювання. Такий процес найкраще апроксимувати числовими моделями, побудованими на основі методу скінченних елементів або скінченних різниць.[5]

Природні та штучні тріщини мають вирішальне значення для реакції гірської породи. Підвищений тиск у пласті може відкрити деякі тріщини, тим самим змінюючи гідравлічну провідність пласта. З іншого боку, зниження тиску сприяє їх закриттю, що призводить до нерівномірного ущільнення порід. Така динаміка характерна для тріщинуватих пластів і може суттєво впливати на амплітуду вертикальних зміщень поверхні.

У довгостроковій експлуатації газосховища дуже важливим є вивчення накопичення деформацій між циклами закачування та видобутку. У деяких випадках з кожним новим циклом залишкові зміщення вищі, ніж у попередньому. Це може свідчити про те, що з часом ущільнення пласта посилюється, або що його пружні властивості погіршуються. Таким чином, такі умови роблять традиційні лінійно-пружні моделі неадекватними та спонукають до використання моделей пластичності або поро-пружно-пластичних підходів, які дозволяють більш точно описати поведінку гірських масивів.

Гідрогеологічні умови також впливають на геомеханічну поведінку масиву. Зміни рівня ґрунтових вод, водонасичених шарів або навіть просто зміни ефективних напружень, спричинені взаємодією газу з водою, можуть створювати додаткові деформації. Усі ці фактори стають ще важливішими для підземних сховищ газу у складних багатошарових осадових товщах. Іншим фактором, який потребує пильної уваги, є тепловий ефект під час закачування, оскільки іноді існують великі різниці між температурами пластів і температурами закачаного газу; це призводить до термомеханічних напружень, що накладаються на загальні напружено-деформовані стани в межах гірських масивів. Ці ефекти можуть бути дуже важливими для соляних та піщаних пластів, що піддаються тривалим циклічним навантаженням.

Слід бути уважним до можливих проявів індукованої сейсмічної активності. Хоча вертикальні зміщення поверхні зазвичай проявляються досить плавно, коливання тиску можуть бути досить різкими, звідси виникають мікросейсмічні явища, що супроводжують перерозподіл напружень у межах гірського масиву. Такі події не завжди чітко проявляються на поверхні, але вони є дуже важливими показниками стану гірського масиву та можуть попереджати про розвиток небезпечних процесів.[6]

Геомеханічні процеси в надрах під час експлуатації підземних газосховищ є складними та багатфакторними. Цю складність можна виявити за допомогою точних методів моделювання, що відповідають фактичній літології та фізико-механічним властивостям гірських порід, та регулярного моніторингу. Саме детальне розуміння цих процесів дає можливість робити надійний прогноз вертикальних рухів на поверхні та забезпечувати безпечну експлуатацію газосховищ на всіх етапах їх життєвого циклу.

1.2. Фактори, що впливають на вертикальні переміщення земної поверхні над ПГС

Підземні сховища газу (ПГС) відіграють важливу роль як ключові інженерні споруди системи постачання, оскільки природний газ зберігається під надлишковим тиском у геологічних структурах, що забезпечує сезонну гнучкість балансування попиту транспортної системи, а також резерв енергії. Для ефективної експлуатації важливою є диференціація та класифікація ПГС, оскільки гідродинамічні, геологічні та геомеханічні умови відрізняються залежно від типу, і ці фактори контролюють рухи поверхні, які можуть відбуватися.

Рухи поверхні над підземними сховищами газу є результатом складного поєднання геологічних, техногенних та фізико-механічних процесів, що відбуваються в гірському масиві під час циклічного закачування та відбору газу. Поведінка гірського середовища під змінним тиском залежить не лише від характеристик продуктивного горизонту, але й від структури всієї геологічної колони, глибини закладання підземного сховища газу, гідрогеологічних умов, а також інтенсивності експлуатації. Розуміння цих факторів має вирішальне значення для точного моделювання вертикальних деформацій та безпечної експлуатації газосховища.[7]

Основним фактором є зміни тиску в пласті, які безпосередньо контролюють ступінь стиснення або декомпресії пористих порід. Під час закачування газу поровий простір має тенденцію до збільшення, оскільки тиск усередині пласта зростає; це призводить до підняття поверхні землі. Під час вилучення газу з пласта тиск знижується; отже, поровий простір стискається, що призводить до просідання. Амплітуда таких коливань залежить від того, наскільки великі сезонні зміни тиску та в якому режимі працює газосховище.

Фізичні та механічні властивості порід-колекторів, високостисливі породи демонструють більшу чутливість до коливань тиску, що призводить до більш виражених вертикальних зміщень. Породи з низькою стисливістю демонструють менш виражену реакцію. Ці характеристики включають модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, пористість та проникність. Значну увагу слід приділити пластичним характеристикам глинистих пластів, які можуть піддаватися навіть при невеликих коливаннях тиску, реагуючи на повільні довготривалі реологічні процеси.

Структурно-геологічні особливості – розломи, зони тріщинуватості та лінзи гірських порід з різними механічними властивостями – суттєво впливають на просторовий розподіл вертикальних зміщень. Неоднорідні деформації поверхні можуть розвиватися в складних геологічних умовах, що ускладнює їх моделювання та прогнозування. Такі незначні локальні тектонічні порушення найчастіше виступають як ослаблені шляхи, вздовж яких будь-яка незначна зміна тиску може призвести до локалізованих підняттяв або просідань. Глибина продуктивного горизонту також відіграє важливу роль. Зі збільшенням глибини залягання газу більша товщина порід бере участь у розподілі навантаження. На великих глибинах, зазвичай, величина вертикальних зміщень поверхні менша, оскільки ефект гаситься гірським матеріалом, але процеси стають більш розподіленими. Для неглибоко залягаючих ПГС зміни поверхні можуть бути різкими та вираженими.

Гідрогеологічні умови значною мірою впливають на вертикальні рухи поверхні. Фактори включають наявність водоносного горизонту, а також тиск ґрунтових вод, їх потік та взаємодію з поровим простором. У системах, де є тиск води, приплив води до газового пласта під час видобутку газу може частково компенсувати падіння тиску, тим самим зменшуючи потенційне

просідання, яке може виникнути, якщо немає енергії для підтримки верхніх пластів. З іншого боку, виснаження режиму тиску може призвести до подальших нерівномірних деформацій.[8]

З людських факторів слід зазначити характеристики роботи системи зберігання та вилучення газу: обсяги закачування та відбору газу, швидкість зміни тиску, частоту циклів та режим роботи компресорної станції. Якщо коливання тиску будуть занадто швидкими, це вийде за межі пружності гірського матеріалу та тим самим збільшить ризик незворотного просідання.

На нього також впливають суміжні та вищерозміщені породи, оскільки вони передають навантаження по-різному. Глинисті шари відіграють роль певного типу екрану, перерозподіляючи напруження, змінюючи амплітуду рухів. Карбонатні або скелясті породи змінюють характер деформацій, оскільки вони більш жорсткі та тріщинуваті.

Отже, вертикальні рухи поверхні в підземних сховищах газу є результатом складної взаємодії геомеханічних, гідродинамічних та техногенних процесів. Для моделювання, прогнозування та моніторингу стану територій над ПСГ слід використовувати весь спектр цих факторів. Відповідно, сучасні методи дослідження повинні включати детальний аналіз геологічної будови, властивостей гірських порід та режимів експлуатації; це додасть достовірності та безпеки будь-якому сховищу.

Тривалі геомеханічні процеси, що відбуваються навіть без активної експлуатації, можуть суттєво впливати на вертикальні зміщення. Гірські породи, особливо глини та мергелі, здатні до повільного повзучого руху, внаслідок чого деформації накопичуються протягом тривалого часу та стають помітними лише через роки. Ці явища типові для газових сховищ, які

експлуатуються десятиліттями, і можуть суттєво впливати на результати геодезичного моніторингу та моделювання.[9]

Температурний режим продуктивного горизонту та порід, що його перекривають, також має значення. Під час закачування газу його температура відрізняється від температури навколишніх порід, відбуваються термопаразити, які впливають на об'єм порід та флюїдів. Різкі перепади температури можуть спричиняти невеликі, але вимірювані вертикальні зміщення, що є ефектом, який слід особливо враховувати при високоточних інтерферометричних та GNSS-вимірюваннях.

Сейсмічні та псевдосейсмічні фактори відіграють ключову роль. Навіть слабкі природні сейсмічні коливання або техногенні коливання від роботи бурових установок, компресорних станцій або інтенсивного транспортування можуть спричинити мікродеформації, якщо в гірському середовищі спостерігається підвищена тріщинуватість або пластичність. Вертикальні зміщення набувають досить складної структури в районах з високою сейсмічністю, що накладається на ефекти, зумовлені змінами пластового тиску.

Слід враховувати насичення водою та сезонне зволоження верхніх шарів ґрунту, що може призвести до вертикальних рухів, не пов'язаних безпосередньо з експлуатацією газосховища. У місцях переважання глинистих відкладень сезонне набухання та усадка ґрунтів можуть досягати кількох сантиметрів; таким чином, це ускладнює інтерпретацію результатів вимірювань і додатково вимагає вилучення сезонної складової в моделях. Штучні навантаження на поверхню також є іншим питанням – будівлі, промислові об'єкти та транспортна інфраструктура. Передача механіки напружень від газосховища до поверхні землі змінюється цим розподілом

маси на поверхні; це може посилювати, а також зменшувати вертикальні деформації. У щільно забудованих районах зазвичай дуже складний характер зміщень, який здебільшого залежить від конструктивних особливостей фундаменту, що взаємодіють з ґрунтом.

Історія розробки та експлуатації газового родовища або підземного сховища газу має велике значення. Якщо пласт раніше зазнавав значних змін тиску або пройшов через тривалі цикли видобутку та закачування газу, деякі пружні властивості породи пласта можуть не залишатися незмінними, а накопичені деформації можуть проявлятися як стабільне просідання. Такі «пізні» зміни важко помітити без уважного вивчення старих записів та без тривалої історії геодезичних спостережень.

Отже, під час моделювання вертикальних зміщень над резервуаром газосховища, окрім прямого впливу змін тиску, слід враховувати безліч природних та техногенних факторів, які можуть суттєво змінити характер деформацій. Комплексний підхід у цьому випадку гарантує точність прогнозів, що є необхідною умовою безпечної та ефективної експлуатації газосховищ.

Спостерігається нерівномірний розподіл фізичних та механічних властивостей гірських порід по площі та в розрізі. Навіть у межах одного пласта природні умови можуть створювати локальні варіації пористості, зернового складу, цементації або тріщинуватості. Це означає, що неоднорідно реагуючи на однакові зміни тиску, деякі зони будуть більш стиснутими, тоді як інші взагалі не деформуватимуться. Кінцевий результат: замість рівномірного підняття або просідання ви отримаєте локальні аномалії, які фіксуються інтерферометрією та GNSS-моніторингом.[10]

Важливо відзначити швидкість зміни навантаження на пласти. Геологічне середовище діє як в'язкопружна система, тому при повільних коливаннях тиску породи можуть частково знімати напругу, тоді як різкі імпульси лише накопичують деформацію. На практиці деякі газові сховища зазнавали різких пікових змін тиску через аварійні або нестандартні режими експлуатації; отже, відбувалися вертикальні зміщення, амплітуда яких була значно більшою за нормальні циклічні коливання. Іншим дуже важливим фактором є те, яка залишкова пластова рідина залишилася в пласті - вода, конденсат чи газ з різними фізичними властивостями. Оскільки вода має значно нижчу стисливість порівняно з газом, навіть невеликі зміни співвідношення газ/вода можуть різко змінити характер деформацій. Деформації слабші для систем з високою водонасиченістю через коливання тиску, але збільшують амплітуди вертикальних зміщень зі збільшенням газонасичення.

Слід також враховувати вплив антропогенних змін рівня ґрунтових вод, що виникають внаслідок відкачування або підняття води в процесі промислової діяльності. Коливання рівнів водоносного горизонту можуть спричиняти ущільнення або набухання, переважно в окремих геологічних шарах, і головним чином глинистих. Ці процеси безпосередньо не пов'язані з будь-якими змінами тиску в межах ПГС; однак вони накладаються на загальний характер вертикальних рухів.

Геометрія пласта та конфігурація покладу повинні бути особливо складними, зокрема, у пастках пластів зі складною формою, різкою зміною товщини або «язиками», «лінзами» та локальними перешкодами може розвинути асиметричний розподіл напружень. Розвиваються зони

поверхневої диференціальної деформації, які іноді інтерпретуються як ознаки техногенних небезпек та аварій.

Розглянемо регіональні тектонічні напруження родовища. Найчастіше газорозподільні пласти (ГПЗ) знаходяться в регіонах, які переважно або вторинно тектонічно активовані, що призводить до значних регіональних горизонтальних напружень. Вони взаємодіють з локальними коливаннями тиску в пласті, як посилюючи, так і зменшуючи вертикальні деформації. У деяких випадках більша частина вертикального руху відбувається в одному напрямку, оскільки певний вектор тектонічних напружень є домінуючим.

Отже, процес створення вертикальних зміщень над підземним сховищем газу включає багато факторів, зумовлених природними властивостями геологічного середовища, експлуатаційними впливами, фізичними процесами всередині пласта та зовнішніми факторами. Більш комплексний підхід до врахування цих факторів підвищує точність прогнозування та дає можливість уникнути таких ризиків, як небезпечні деформації поверхні або пошкодження інфраструктури, або порушення цілісності газосховища.

1.3. Геомеханічні основи деформаційних процесів у товщі порід при експлуатації підземних газосховищ

Геомеханічні процеси, що відбуваються протягом усього процесу закачування та відбору газу з підземного сховища, визначають реакцію гірських порід на зміни тиску в порах. Розуміння цих явищ необхідне для проведення належного моделювання вертикальних зміщень поверхні, визначення рівнів ризику та забезпечення безпеки експлуатації ПСГ. Саме за геомеханічними закономірностями можна простежити шлях, яким гірські породи реагують на навантаження, перерозподіл напружень у гірському

масиві та, зрештою, як досягається остаточна геометрія деформацій на земній поверхні.

Базовим компонентом геомеханічного аналізу є вивчення напружено-деформованого стану (НДС) гірських порід. Природно, гірські породи піддаються дії гравітаційного навантаження, тектонічних напруг та одночасному впливу пластових флюїдів. Закачування пластового газу порушує цю рівновагу, ініціюючи механічну реакцію породи, починаючи від пружних деформацій до пластичних та реологічних змін; зниження порового тиску під час видобутку газу призведе до стиснення породи, а потім до ущільнення.

Здебільшого, породи-колектори діють як квазіпружне середовище з деформацією, безпосередньо пов'язаною зі змінами тиску. Реальна поведінка набагато складніша, оскільки пружні, пластичні та в'язкі компоненти діють одночасно. Геомеханічні процеси в НДС описуються за допомогою пружно-пластичних та в'язкопружних моделей, які також враховують часовий аспект деформації.

Закон Бішопа та принцип ефективних напружень Терцагі визначають зв'язок між поровим тиском та ефективними напруженнями. Деформації пов'язані не з абсолютним значенням пластового тиску, а з різницею між зовнішніми напруженнями та тиском рідини в порах. Досить великі деформації можуть бути отримані за відносно невеликих коливань тиску газу, особливо для гірського матеріалу, який має високу стисливість або низьке значення модуля пружності.[11]

Механічна анізотропія в гірських породах виникає через шаруватість та орієнтацію тріщин, а також літологічні особливості. Анізотропія контролює

величину та напрямок деформації; у переважно горизонтально шаруватих породах вертикальні зміщення менші, ніж ті, що спостерігаються в межах неоднорідної або хаотично тріщинуватої структури. Геомеханічна поведінка стає складнішою, коли розглядається зберігання газу у водозаповнених або сильно тріщинуватих резервуарах.

Контактні взаємодії шарів гірських порід мають велике значення. Враховуйте той факт, що різкі переходи між шарами з різними пружними властивостями можуть призвести до концентрації напружень, локального ковзання та асиметричних деформацій. Всі ці явища слід належним чином враховувати при моделюванні, оскільки вони можуть змінювати характер вертикальних зміщень на поверхні та створювати локальні аномалії, які не залежать безпосередньо ні від форми, ні від тиску в пласті.

Зміни тиску в резервуарі призводять до перерозподілу напружень не лише всередині самого резервуара, але й на значних відстанях від нього. Як наслідок, утворюється складне тривимірне поле деформації як над покрівлею, так і під дном резервуара, а іноді й кількома верхніми поверхневими горизонтами. Саме тому вертикальні зміщення на поверхні охоплюють ширшу площу, ніж межі самого газосховища.

Геомеханічний аналіз повинен враховувати часовий аспект деформації. Після стабілізації тиску в пласті гірські породи можуть продовжувати повзучість або релаксацію напружень. Таким чином, існує часовий лаг між зміною тиску та фактичними вертикальними зміщеннями в місцях розташування на поверхні. Це значно ускладнює інтерпретацію геодезичних даних та даних супутникового моніторингу.

Геомеханічний аналіз включає оцінку меж пружності гірських порід та можливостей залишкової деформації. Коли межа пружності гірських порід перевищується, відбуваються пластичні або руйнівні зміни. Це може становити потенційну загрозу безпеці експлуатації, особливо у випадках високих амплітуд тиску в сховищі або у випадках тривалого виснаження резервуарів.

Отже, аналіз геомеханічних процесів є основою розуміння характеру вертикальних зміщень над газосховищем. Це розширене дослідження, яке включатиме такі структурні властивості гірських порід, ефективні напруження, анізотропію, часові ефекти та межі міцності, що дозволить розробити точні моделі деформацій для забезпечення надійної та безпечної експлуатації сховища як інженерно-геологічних систем – цього комплексу.

Сучасна еволюція підземних споруд для зберігання газу супроводжується застосуванням методів, що підвищують продуктивність, безпеку та гнучкість функціонування в умовах динамічних змін на ринку електроенергії. Світовий досвід демонструє схильність до переходу від традиційних методів контролю до розумних систем, що покращують зберігання та видалення палива з урахуванням періодичних, фінансових та експлуатаційних факторів.

Цифровізація управління та моніторингу: системи SCADA, технології «цифрових двійників», високоточні геоінформаційні моделі, а також дистанційний збір даних є складовими. Прогнозна аналітика допомагає заздалегідь виявити всі можливі ризики та скоригувати режими роботи відповідних ПСГ. Крім того, підземні сховища газу набувають стратегічного значення в стійкості енергетики будь-якого регіону, особливо під час переходу на відновлювану енергетику. Систему зберігання слід порівняти зі

збільшенням частки нестаціонарних генераторів, таких як сонячні та вітрові електростанції, через їхні енергетичні потреби. Вони діють як буфери, оскільки балансують постачання газу та компенсують будь-який дефіцит виробництва.

Передові технології забезпечать покращену герметизацію свердловин та контроль руху газу всередині пластів. Серед чотирьох пріоритетів один з них реалізується завдяки сучасним технологіям, які значною мірою мінімізують ймовірність витоку. Нові інноваційні методи моніторингу дозволяють відстежувати будь-які рухи гірських порід або динаміку пласта в режимі реального часу, що також сприяє мінімізації ризиків на фронтах надзвичайних ситуацій. Деякими рішеннями є високоточні системи супутникового спостереження, геофізичні дослідження та інтегровані цифрові моделі для повної оцінки ситуації у сховищах. Такі нові технології покращать безпеку в підземних ресторанах та виконуватимуть практичну роботу на основі екологічних вимог, зменшуючи вплив на навколишнє середовище.

Зростає інтерес до використання підземних сховищ газу не лише для зберігання природного газу, але й для водню та низьковуглецевого метану, що дозволить зберігати низьковуглецеві види палива, які є важливим елементом глобального декарбонізації енергетичного балансу. Багато європейських країн активно обговорюють можливість модернізації існуючих підземних сховищ газу для роботи з воднем. Це вимагає нових технічних рішень, спеціальних випробувань матеріалів та адаптації технологічних процесів до специфіки нового типу палива. Модернізація повинна включати дослідження впливу водню на герметичність пласта, а також на корозійну стійкість свердловин та взаємодію з поровими водами; таким чином, інтеграція стає більш

вимогливою та складною, коли йдеться про сучасні системи моніторингу та управління.

Отже, інновації в експлуатації, модернізації та управлінні підземними сховищами газу підвищують їхню стратегічну важливість для енергетичної стабільності, екологічної безпеки та умов глобальної декарбонізації. Поточна модернізація підземних сховищ газу визначається передовими технологіями та високим рівнем безпеки, до яких додаються нові енергетичні моделі, наприклад, воднева енергетика та низьковуглецеве паливо.[12]

Слід також зазначити, що постійно зростаюча роль інтеграції підземних сховищ газу в міжнародну газотранспортну мережу встановлює нові стандарти щодо їхньої функціональної надійності та ефективності. У більшості країн ця тенденція призводить до створення транскордонних енергетичних вузлів, де підземні сховища газу функціонують не лише як локальні резерви, а й як важливі елементи міжнародної інфраструктури. Це відкриває можливості для оптимізації шляхів постачання газу в поєднанні зі зменшенням залежності від конкретних джерел імпорту, гнучкістю, що пропонується всім суміжним енергетичним системам у випадках коливань попиту. Крім того, інтеграція таких сховищ в єдину систему управління дозволить координувати режими закачування та відбору з міжнародної сторони, підвищуючи ефективність експлуатації та стабільність енергопостачання.

Використання підземних сховищ газу як засобу скорочення викидів парникових газів займає дуже значну позицію в політиці Європейського Союзу щодо клімату та загальній світовій тенденції до переходу на низьковуглецеву економіку. Розвиток технологій уловлювання та зберігання вуглецю (CO₂) відкриває нові перспективи, зокрема для тих підземних

порожнин, які за умови відповідної модернізації можна перетворити на надійні установки, що дозволяють довгострокове поглинання CO₂ у безпечних умовах. Такий підхід не лише зменшить тиск на навколишнє середовище, але й може зробити CO₂ компонентом екологічної інфраструктури, інтегруючи його в системи дій щодо зміни клімату та стратегії низьковуглецевої енергетики.

Ще одним важливим аспектом є вдосконалення методів геомеханічного аналізу. Сучасні програмні пакети дозволяють проводити детальне моделювання змін напружено-деформованого стану гірських порід, прогнозувати поведінку пласта протягом повного циклу закачування та відбору газу, а також оцінювати ймовірність утворення розломів, а також тріщиноутворення або мікросейсмічних явищ. Такі інструменти високо цінуються при застосуванні в регіонах зі складною геологічною будовою, де безпека експлуатації газорозподільних споруд вимагає комплексного врахування численних факторів: фізико-механічних властивостей гірських порід, анізотропії, тектонічної активності, взаємодії з гідрогеологічними умовами.

Не менш важливою є тенденція до інновацій у матеріалах для будівництва свердловин, обсадних труб та герметизуючих елементів. Новітні сплави, композитні матеріали, а також високотемпературні цементи дозволяють забезпечити довготривалу та безпечну експлуатацію в умовах високого тиску, агресивного середовища та циклічних навантажень. Це зменшує витрати на дорогий ремонт для підтримки надійності інженерної системи та стабільної роботи сховища протягом багатьох років з одночасним зменшенням ризиків аварій та екологічних інцидентів.

Сучасний розвиток підземного зберігання газу свідчить про перехід від базових операційних практик до комплексних наукових та

високотехнологічних рішень. Сучасні стратегії охоплюють широкий спектр, від ретельного дослідження геологічних та фізико-механічних характеристик гірських порід, екологічної безпеки та цифрового моніторингу до нових будівельних технологій та інтеграції в міжнародні енергетичні системи. Така інтеграція збільшує результат, багаторазово підвищуючи ефективність використання запасів газу, а також закладаючи міцну основу для подальшої трансформації енергетичного сектору в бік низьковуглецевої та сталої економіки, забезпечуючи безпеку та надійність, а також гнучкість функціонування ПСГ протягом тривалих періодів.[13]

1.4. Методи дослідження та моделювання вертикальних переміщень над підземними газосховищами

Точне прогнозування та управління висхідними або низхідними рухами на поверхні землі над підземними сховищами газу вимагає широких методів дослідження та моделювання. Вони базуються на досвіді, отриманому в інженерній практиці, сучасних геодезичних спостереженнях та числових підходах, що включають моделювання з використанням методів скінченних елементів та скінченних різниць. Поєднання всього цього дозволяє оцінити ризики деформації за амплітудою та просторовим розподілом, а також чутливість до циклів закачування та відбору газу. Це також дає можливість приймати управлінські рішення щодо оптимізації режимів ПСГ для забезпечення безпеки та довгострокової стабільності експлуатації.

Основним способом управління вертикальними рухами є геодезичний моніторинг. Високоточні вимірювання за допомогою традиційних геодезичних приладів (нівелірів, тахеометрів) та сучасних приймачів GNSS будуть використовуватися поряд з методами дистанційного зондування, зокрема супутниковою інтерферометрією (InSAR). Такі технології можуть

визначати деформації в міліметровому масштабі, їх динаміку в режимі реального часу та забезпечувати ранні передумови для можливих ризиків або надзвичайних ситуацій. Крім того, інтеграція різних методів спостереження відкриває можливість для точного просторового картографування зон деформації та аналізу їх розвитку з часом.

Ще одним важливим напрямом контролю є інструментальні методи безпосередньо в товщі порід. Вони передбачають встановлення спеціальних приладів для вимірювання пластового тиску, температури, зміщень порід, а також інших геофізичних параметрів на різних горизонтах. Такі дані дозволяють визначити напружено-деформований стан порід у реальних умовах, простежити вплив циклічних змін тиску на колектор та покритку, а також виявити ділянки, найбільш чутливі до деформацій і потенційно ризиковані для розвитку мікротріщин чи локальних просідань. Використання цих методів у поєднанні з геодезичним та чисельним моделюванням забезпечує комплексний підхід до оцінки стану ПГС.[14]

Сучасне прогнозування та моделювання вертикальних переміщень земної поверхні над підземними газосховищами переважно базується на чисельних методах, серед яких найбільш поширені скінченно-елементний (FEM) та скінченно-різницевий (FDM) підходи. Ці методи забезпечують можливість детального відтворення геомеханічної поведінки колектора та навколишніх порід з урахуванням:

- фізико-механічних властивостей порід, включно зі стисливістю, пружністю та пластичністю;
- анізотропії та просторової неоднорідності колектора, які впливають на локальні концентрації напружень;

- історії змін пластового тиску, що дозволяє врахувати накопичені деформації та залишкові переміщення;
- тривалості та частоти циклів закачування і відбору газу, що визначає динаміку релаксації та повзучості порід.

Такі моделі дозволять прогнозувати не лише величину та площу вертикальних зміщень, але й можливі зони, де можуть бути підвищені ризики. Це дуже важливо при розгляді питань безпеки експлуатації сховища.

Головною особливістю моделювання є відтворення інтерактивної реакції гірської породи на газ. З цієї причини використовуються як поропружно-пластичні, так і в'язкопружні моделі, оскільки вони здатні відображати не лише миттєві пружні реакції породи на зміни тиску в пласті, але й поступово наростаючі деформації в часі протягом багатьох років експлуатації сховища. Застосування таких моделей дає можливість не лише прогнозувати величину вертикальних зміщень, але й їх просторовий розподіл на місці, локалізувати місця концентрації деформацій та оцінювати можливі ризики для безпечної експлуатації сховища.

Також, використовуючи математичні та статистичні методи для прогнозування змін, можна зробити перші припущення та перевірити їх за результатами числових розрахунків. Ці способи дозволяють нам побачити ключові лінії рухів ґрунту вгору та вниз, спричинених змінами тиску в свердловині. Вони дуже зручні для ранніх перевірок інженерами та під час налаштування того, як запускати ПГС.[15]

Геодезичні спостереження, інструментальні вимірювання, числове моделювання та аналітичний підхід, застосовані в комплексі, дозволяють отримати повну картину вертикальних зміщень та прогнозувати їх на

довгостроковий період. Таким чином можна планувати безпечний режим експлуатації газосховища, а також оптимізувати цикли закачування та відбору газу з підземного сховища, щоб мінімізувати ймовірність виникнення аварійних ситуацій, що виникають внаслідок геомеханічних змін у гірських породах.

Сучасні методи вивчення вертикальних рухів земної поверхні над підземними сховищами газу базуються на складному поєднанні геодезичних, геофізичних та числових підходів. Інтегровані системи такого рівня дозволяють об'єднувати дані різного походження - від високоточних наземних та супутникових вимірювань, GNSS та інтерферометрії (InSAR) до показників, отриманих безпосередньо в гірському масиві за допомогою датчиків тиску, температури та переміщень. Можна будувати тривимірні моделі, що відображають не тільки поточний стан, але й динаміку розвитку деформацій з часом, що дозволяє заздалегідь на тривалий період прогнозувати поведінку земної поверхні.

Також об'єднання геодезичних та інструментальних даних з цифровим моделюванням дозволяє аналізувати локальні зони підвищених напружень та аномалії, якщо такі є, в гірському масиві. Це дуже важливо для тих газосховищ, які розташовані в складних геологічних умовах, де на вертикальні зміщення впливають неоднорідність пласта, анізотропія порід та попередня історія змін тиску в пласті. Тому завдяки таким інтегрованим підходам можна буде не лише оцінити фахівцями величину амплітуди зміщень, але й просторову структуру; можна буде прогнозувати акумулятивні деформації, а також виявляти ризики, пов'язані з безпечною експлуатацією газосховища.

Однією з основних тенденцій у сучасному спостереженні за вертикальними рухами на земній поверхні є застосування космічних та

дистанційних методів зондування; серед них InSAR займає досить помітне місце. Застосування дозволяє дуже точно – до міліметрів – знати зміщення земної кори протягом досить тривалого динамічного часового ряду. Використання InSAR дозволяє отримувати детальні карти на великих площах щодо змін висоти на поверхнях, бачити тенденції розвитку деформацій та локальних аномалій, які можуть свідчити про підвищене напруження гірських порід.

Метод InSAR найбільш корисний у довгострокових спостереженнях, з метою відокремлення сезонних коливань ґрунтових горизонтів від змін, ініційованих діяльністю підземного сховища газу. Крім того, він доповнює інші геодезичні та інструментальні спостереження можливістю розробляти просторово-часові моделі вертикальних зміщень, що вказують на їх подальший розвиток, та своєчасно виявляти потенційно небезпечні деформації, які можуть призвести до надзвичайної ситуації.

Не менш актуальним є застосування інструментальних систем контролю, які дозволяють негайно спостерігати за станом гірських порід у сховищі. Основними компонентами таких систем є:

- індикатори зміщень, встановлені як у верхній, так і в нижній частині продуктивного горизонту. Вони реєструють деформації гірських порід як у вертикальному, так і в горизонтальному напрямках.

Напруження в масиві допомагають визначити ступінь накопичення внутрішніх сил у різних шарах. Рівні ґрунтових вод та п'єзометричний тиск у водоносних горизонтах, гідрогеологічний вплив на пласт. Теплова реєстрація описує використання високоточних термометрів та датчиків градієнта температури для фіксації змін

температури гірських порід та газу в пласті. Збір та аналіз даних дозволяють розробникам створювати багатовимірні моделі напружено-деформованого стану (НДС) гірських порід у реальних умовах експлуатації. Модель дозволить не лише прогнозувати амплітуду вертикальних рухів, але й використовуватиметься для виявлення локальних зон високого ризику, оцінки ефективності режимів експлуатації та вжиття превентивних заходів проти можливих надзвичайних ситуацій..[16]

Сучасні методи числового моделювання, наприклад, метод скінченних елементів (FEM) та метод скінченних різниць (FDM), дозволяють відтворювати з достатньо високою точністю тривимірні поля напружень та деформацій у геологічному середовищі. Використання таких методів дозволяє враховувати складні взаємодії різних факторів, що впливають на поведінку гірських порід під час експлуатації підземних сховищ газу. Моделі роблять:

- неоднорідність і анізотропію порід, що відображає природну змінність фізико-механічних властивостей у різних шарах та локальних структурних зонах;
- взаємодію газу та породи, реалізовану через пороупруго-пластичні та в'язкопружні закони, що дозволяють моделювати як пружні коливання, так і накопичувальні деформації;
- часові ефекти, включно з повзучістю порід і релаксацією внутрішніх напружень, які впливають на сповільнене виникнення вертикальних переміщень навіть за стабільного тиску;
- вплив температурних коливань та циклічних режимів закачування і відбору газу, що дозволяє оцінити термомеханічні напруження і

можливі аномальні деформації при різких змінах експлуатаційних параметрів.

Таким чином, стає можливим не лише прогнозувати амплітуду та швидкість рухів поверхні вгору та вниз, але й прогнозувати місця, де можуть виникнути аварійні процеси, та оптимізувати режими роботи підземних сховищ газу з урахуванням довгострокових геомеханічних особливостей. Це буде зроблено шляхом прогнозування локальних зон концентрації деформацій.

Гідродинамічні моделі: це насправді дуже комплексні моделі, що описують взаємодію газу з водою та перерозподіл тиску в поровому просторі пласта. Модель є багатофазною моделлю потоку, отже, враховує рух усіх рідин та їх властивості стисливості, а також проникність породи, що дозволяє оцінити зміну ефективних напружень у масиві гірських порід. Саме ці процеси контролюють як величину, так і знак, а також просторову структуру вертикальних зміщень, включаючи навіть локальні зони концентрації деформацій. Гідродинамічні підходи також дозволяють робити більш реалістичні прогнози в поєднанні з геомеханічним моделюванням щодо циклічної експлуатації газосховищ щодо можливих ризиків для цілісності пласта та безпеки поверхневої структури.

конвергентне числове моделювання та розробка автоматизованої системи керування ПСГ у режимі «лабораторних робіт». Після цього можна буде виконувати сценарне управління об'єктом за допомогою різних реальних фактичних сценаріїв, від змін режимів закачування-відбору газу до прогнозування динаміки вертикальних зміщень. Таким чином, після проходження навчання усіх тактичних кроків, буде забезпечено право модифікації реальних умов експлуатації на основі будь-яких отриманих

когнітивних знань. Використання цифрових двійників дозволяє:

- здійснювати прогностичні розрахунки для широкого спектру можливих режимів роботи;
- оцінювати потенційні ризики виникнення аварійних ситуацій та небезпечних деформацій;
- оперативно коригувати режими закачування та відбору газу з метою зменшення амплітуди вертикальних переміщень та забезпечення безпечної експлуатації;
- проводити аналіз впливу зовнішніх факторів, таких як температурні коливання, гідрогеологічні зміни та тектонічні напруження.

Інтеграція таких цифрових рішень з традиційними геодезичними та інструментальними методами спостереження забезпечує багатовимірний контроль стану ПГС у реальному часі та підвищує точність прогнозування геомеханічних процесів.[17]

Інтегроване моделювання підземного сховища газу можна визначити як моделювання, що базується не лише на поточних умовах експлуатації, але й на всій історії розвитку об'єкта. Архівні дані попередніх циклів закачування та відбору, фактичні вимірювання вертикальних рухів ґрунту та зміни фізико-механічних властивостей гірських порід, зафіксовані під час експлуатації, є деякими прикладами. Тому легше точно відтворити те, що відбувається з резервуаром з часом, передбачити довгострокові деформації та оцінити кумулятивні ефекти, що виникають внаслідок повільної повзучості гірських порід та релаксації внутрішніх напружень. У цьому відношенні використання історичних даних значно підвищує рівень довіри до результатів числового моделювання для відстеження тенденцій змін геомеханічного стану та

прийняття обґрунтованих рішень щодо коригування режимів експлуатації, спрямованих на уникнення небезпечних деформацій.

Особливе місце в сучасному геомеханічному аналізі займає оцінка зони впливу від підземного сховища газу на поверхню з прогнозуванням значення амплітуди вертикальних зміщень, напрямку їх поширення та локалізації зон осередку деформацій, де відзначаються підвищені ризики надзвичайних ситуацій. Це має велике значення для висотної забудови територій, оскільки навіть незначні зміни рівня земної поверхні можуть негативно вплинути на будівлі, комунікації та засоби транспортної інфраструктури. Детальне картографування таких зон дозволяє не лише прогнозувати можливі наслідки, але й планувати превентивні заходи щодо захисту об'єктів та оптимізації режимів роботи ПГС.

Структурований синтез геодезичних спостережень, геофізичної інформації та результатів числового моделювання може створити систему раннього попередження, яка буде дуже чутливою до небезпечних змін вертикальних рухів земної поверхні. Цей метод дозволяє точно визначати зони високого ризику, оптимізувати режими закачування та відбору газу, а також негайно реагувати підземним сховищем газу на будь-які зміни тиску або властивостей гірських порід. Таким чином, комплексне використання підвищує рівень безпеки експлуатації ПГС, спричиняючи мінімальний негативний вплив на навколишнє середовище, одночасно підтримуючи тривалу стабільність роботи об'єкта.

Сучасні спостереження за вертикальними зміщеннями земної поверхні над підземними сховищами газу все більше спираються на складну інтеграцію різних фізичних процесів. Тільки поєднання моделей геомеханіки, гідродинаміки, тепло- та масообміну дозволяє враховувати одночасні впливи,

зумовлені змінами тиску в пласті, що супроводжуються коливаннями температури з рухом ґрунтових вод та їх взаємодією з пористим середовищем. Саме завдяки таким багатofакторним підходам можна досягти ближчого наближення до реальної поведінки гірських масивів; це особливо стосується глибоких сховищ газу, складних стратиграфічних розрізів та ділянок з посиленою тріщинуватістю. Просте використання пружних моделей, які не враховують пластичні, в'язкі та термомеханічні ефекти, здебільшого не дає чіткого уявлення про величину та поширення вертикальних змін. Об'єднані моделі можуть показувати не лише середні зміщення висоти поверхні, але й локальні непарні ділянки, оцінювати небезпеку зон розтягнень та виявляти ймовірно ризиковані місця для інфраструктури.

Для підвищення точності прогнозного розрахунку вертикальних зміщень земної поверхні над підземними сховищами газу активно застосовуються методи калібрування числових моделей на реальних спостереженнях. Це включає систематичне використання даних геодезичного моніторингу - високоточних вимірювань GNSS, супутникової інтерферометрії (InSAR), а також показань внутрішніх датчиків, встановлених у масі та резервуарі. За цими даними коригуються ключові параметри моделей: модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, характеристики пластичності та індекси повзучості. Такий підхід дозволить не тільки підвищити точність прогнозування, але й адаптувати моделі до конкретних умов на кожному газосховищі, що відображають геологічну неоднорідність, історію циклів закачування та відбору газу, сезонні та довгострокові ефекти. Таким чином, забезпечується безпечне та дуже точне прогнозування висхідних рухів для різних робочих ситуацій та покращення способів роботи SSF, що знижує небезпеку для будівель та природи.

Вона зосереджена на вивченні тих циклічних навантажень, що виникають внаслідок сезонних коливань споживання газу та пов'язаних із ними змін тиску в пласті. Таке навантаження зрештою призводить до накопичення пластичної деформації в гірському матеріалі, а також до рухів як на стелі, так і на дні пласта. Ці рухи не є миттєвими, а можуть виникнути через кілька років після того, як інтенсивна експлуатація почне ставати досить вираженою. Для оцінки цих ефектів застосовуються реологічні моделі гірських порід, які дозволяють враховувати як пружні коливання, так і деформацію повзучості, а також релаксацію напружень з часом. Крім того, враховується минула інформація про цикли закачування та відбору газу разом з результатами геодезичних спостережень. Це дозволяє робити прогнози щодо довгострокових змін вертикальних зміщень, а також отримувати завчасне попередження про певну область, де спостерігається підвищена концентрація деформацій.

Новою тенденцією сучасних досліджень є використання штучного інтелекту (ШІ) та методів машинного навчання для обробки великих геодезичних, інструментальних та геофізичних даних. Алгоритми навчання дозволяють автоматично розпізнавати закономірності в поведінці вертикальних зміщень, а також відстежувати нетипові аномалії, а також прогнозувати можливі ризики, пов'язані з розвитком небезпечних деформацій.

Крім того, машинне навчання дозволяє вам давати поради щодо найкращих способів закачування та відбору газу, переглядаючи попередні дані та реальні нотатки, що значно підвищує точність припущень. Цей метод допомагає зменшити людський фактор під час роботи з великою кількістю інформації, пришвидшує вибір дій та забезпечує краще управління тим, як працюють місця зберігання газу в швидкозмінних ситуаціях.

Ключовим компонентом нового методу контролю вертикальних зміщень є тривимірна візуалізація та цифрові двійники підземного сховища газу (ПГС). У деяких випадках вони реалізуються в режимі реального часу на основі змін висотних деформацій на поверхні та структурі пласта, візуально показуючи, в якому стані фактично знаходиться газосховище в певний момент часу; в інших випадках це дає можливість запускати різні сценарії, варіюючи різні режими закачування-відбору та прогнозуючи, які з них створюватимуть локальну концентрацію деформацій на основі певних аналітичних можливостей під час розробки. Це дасть інженерам та геологам своєчасні управлінські рішення до виникнення надзвичайної ситуації. Крім того, цифрові двійники суттєво покращують фактичну якість інтеграції геодезичних спостережень, даних InSAR, внутрішніх датчиків, даних числового моделювання в одну комплексну інформаційну платформу для довгострокового управління ПГС.

Сучасний контроль вертикального руху поверхні над підземним сховищем газу, все частіше на міждисциплінарній основі, на практиці об'єднує геологів з геодезистами та інженерів з фахівцями з інформаційних технологій. 3D цифрові двійники разом з даними GNSS, InSAR та внутрішніми вимірюваннями підтримують не лише відстеження змін деформації в режимі реального часу, але й прогнозну динаміку за різних експлуатаційних сценаріїв. Алгоритми штучного інтелекту та машинного навчання автоматично обробляють великі обсяги інформації, щоб знаходити аномалії структури локально та потенційно небезпечні регіони. Експерти з різних галузей поєднують практичну інтеграцію геомеханічних, гідродинамічних, теплових та інженерних даних для створення точних моделей деформації гірських порід,

оцінки накопичених ризиків деформації та своєчасного прийняття управлінських рішень щодо покращення безпеки та захисту в ПГС.

Отже, нові способи вивчення та моделювання вертикальних рухів земної поверхні над підземними сховищами газу передбачають складне поєднання старих геодезичних та інструментальних методів з числовими моделями, цифровими двійниками та алгоритмами штучного інтелекту. Спостереження в режимі реального часу, поєднані з історичними даними та тривимірним моделюванням, допомагають отримати чітке уявлення про зміни напружено-деформованого стану гірських порід, дають оцінку амплітуди та просторової структури деформацій, а також надають своєчасні прогнози щодо потенційно небезпечних ситуацій. Такий інтегрований підхід пропонує дуже високу точність прогнозування разом із хорошим контролем над станом сховищ газу, а також забезпечує їх надійне та безпечне функціонування на всіх етапах життєвого циклу об'єктів.

Окрім елементарних методологій, у сучасній практиці моделювання вертикальних зміщень поверхні міста все частіше використовуються тривимірні числові моделі, що враховують нелінійну поведінку гірського масиву. Ці моделі можуть враховувати всі неоднорідності та анізотропію пласта, різні фізико-механічні властивості покрівлі, підосви та прошарку, а також складну взаємодію газу з водовмісними пластами та горизонтами. Крім того, вони враховують часові ефекти, зокрема накопичення деформацій внаслідок повзучості порід та релаксації напружень, що дуже важливо під час тривалої експлуатації ПСГ. Моделювання стає реальним завдяки таким складним підходам, які дозволяють прогнозувати локальні зони концентрації деформацій, їх амплітуду та просторову структуру, що критично важливо для

своєчасного виявлення потенційно небезпечних ділянок, а також безпечних режимів експлуатації підземних сховищ газу.

Приклади застосування довели, що методи інтерферометрії InSAR у поєднанні зі спостереженнями GNSS та тривимірним числовим моделюванням можуть не тільки дуже точно визначати поточні вертикальні зміщення, але й прогнозувати їх динаміку на кілька років уперед. Таке поєднання дозволяє враховувати як просторовий розподіл деформації, так і часові ефекти, що виникають внаслідок накопичення напружень та повзучості гірських порід. Ці технології успішно використовуються в Європі та США для моніторингу великих підземних сховищ газу, де амплітуди просідання поверхні можуть сягати кількох сантиметрів. Своєчасне прогнозування таких змін дає можливість не лише уникнути пошкодження інфраструктури, але й оптимізувати режими закачування та відбору газу, тим самим роблячи експлуатацію сховища безпечнішою та ефективнішою.[18]

Серед сучасних інструментальних рішень значну роль відіграють інтелектуальні датчики та автоматизовані системи моніторингу, серед яких дані про тиск, температуру та вертикальне зміщення гірських порід надсилаються до центрального аналітичного центру в режимі реального часу. Таким чином, досить легко швидко застосовувати прогнозні алгоритми, за допомогою яких режими закачування та відбору газу можуть автоматично регулюватися, мінімізуючи ймовірність небезпечних деформацій. Зазначені системи дозволяють динамічно спостерігати за ситуацією всередині газосховища, а також забезпечують точніше моделювання поведінки пласта протягом багатьох циклів експлуатації та підвищують безпеку експлуатації.

Методи машинного навчання, шляхом обробки великої кількості історичних та поточних даних PGS, вже використовуються в багатьох

сучасних проектах. Штучний інтелект може виявляти раніше невидимі тенденції поведінки гірських порід, прогнозувати локальні просідання або підняття, а також пропонувати рекомендації щодо оптимізації режимів закачування та відбору газу. Використання таких алгоритмів зменшує ймовірність помилок, що виникають через ручний аналіз складних багатовимірних даних, та підвищує точність, якої можна досягти в довгостроковому прогнозуванні геомеханічних процесів.

Дуже перспективним напрямком є розробка цифрових двійників, точніше кажучи, інтегрованих моделей геологічної будови та фізико-механічних властивостей гірських порід з історією експлуатації сховища в одній платформі. Це дозволить не лише контролювати існуючий стан пласта, але й моделювати сценарії для різних режимів закачування та відбору газу (тестування різних схем без експериментів або втрат часу видобутку), оцінювати потенційний вплив зміни тиску на вертикальні рухи поверхні та прогнозувати розвиток небезпечної зони. Таким чином, це дозволяє заздалегідь планувати превентивні заходи, тим самим підвищуючи безпеку експлуатації, а також допомагаючи оптимізувати роботу ПГС у довгостроковій перспективі.

Експлуатація підземних сховищ газу довела, що спільне застосування геодезичного моніторингу, внутрішньопластових інструментальних даних, числового моделювання та алгоритмів штучного інтелекту може забезпечити дуже високу точність прогнозування вертикальних рухів земної поверхні. Такий інтегрований підхід не лише забезпечить безпечну та стабільну роботу сховищ, але й сприятиме ефективному управлінню газовими ресурсами, оптимізації режимів закачування та відбору, скороченню витрат на технічне

обслуговування та ремонтні роботи, а також запобіганню надзвичайним ситуаціям.

Сучасні методології дослідження та моделювання вертикальних зміщень поверхні над підземними сховищами газу інтегрують три сфери: використання традиційних геодезичних спостережень, високоточних внутрішньопластових вимірювань, тривимірного числового моделювання та алгоритмів штучного інтелекту. Тільки така інтегрована методологія може забезпечити адекватну просторово-часову інформацію про деформації, їх динаміку, локальні місця концентрації зміщень та своєчасну оцінку потенційних ризиків. Така інтеграція не лише підвищує безпеку та стабільність експлуатації існуючих ПГС, але й створює міцну основу для планування нових сховищ, що відповідають сучасним стандартам безпеки, екологічної відповідальності та економічної ефективності експлуатації.

1.5. Фізико-геологічна характеристика та локалізація умовного ПГС

Геологічне розташування: було обрано стандартне шарувате підземне сховище газу, створене на основі вичерпаного газового родовища. ПГС розташоване в межах Дніпровсько-Донецької западини, одного з найкраще досліджених і водночас найбільш газonosних регіонів України, що надає достатньо геологічних даних для створення моделі. Загалом, структура родовища визначається або антиклінальною пасткою, або літологічно обмеженим поровим простором, що знаходиться на глибині приблизно 800 метрів, що еквівалентно звичайним характеристикам для промислових операцій зі зберігання газу в цій області. Породи, що утворюють контейнер, походять з палеозойських та мезозойських формацій, але переважно включають уламковий матеріал, що має типові пустотні простори та розміри

проходів, отже, гідродинамічні, а також геомеханічні характеристики резервуара.

Структурні та літологічні властивості: тришарове представлення газового резервуара. У звичайному газовому резервуарі його геомеханічна модель описується трьома основними шарами, кожен з яких виконує певну інженерну та геологічну функцію.

Кепка складається з глинистих порід – переважно аргілітів та алевроїтів, які діють як природний герметичний бар'єр. Вони мають дуже низьку проникність ($k \approx 10^{-18} \text{ м}^2$) та відносно малий модуль пружності, отже, дуже чутливі до процесу консолідації, а також до залишкових деформацій. Цей шар найбільше відповідає за витіки газу та визначає загальну стійкість верхньої частини пласта.

Колектор складається із середньо- або слабоцементованих пісковиків, що характеризуються високою пористістю ($\phi \approx 0,25$) та великою проникністю ($k \approx 5 \times 10^{-14} \text{ м}^2$). Саме в цьому шарі відбувається зміна порового тиску та ефективних напружень під час циклічної роботи ПГС, що визначає амплітуду вертикальних деформацій разом із динамікою НДС.

Підощва складається з масивних пісковиків або доломітів, тому вона пропонує міцну та низькодеформовану основу для колектора. Вона обмежує висхідні рухи знизу, тим самим забезпечуючи механічну підтримку верхніх шарів, і таким чином зменшує ризик розвитку критичних деформацій як у покрівлі, так і в колекторі.

Фізична та геомеханічна поведінка: пружно-пластична, залежна від часу. Гірський хребет ПГС працює в складному механічному режимі, деформуючись як пружно, так і пластично зі значною залежністю від часу. На

глибині близько 800 м пласт знаходиться під впливом літостатичного тиску приблизно $\sigma_{xx} \approx 18,8$ МПа; локальні напруження регулюються динамікою порового тиску газу.

Коливання тиску всередині пласта в діапазоні 8–16 МПа викликають досить складну реакцію з боку пласта. Закачування газу призводить до зниження ефективних напружень, що компенсується пружним розширенням порід та підняттям поверхні; відбір газу збільшує ефективні напруження, отже, провокує просідання.[19]

У піщаному резервуарі, та частково в покриві, спостерігаються пластичні деформації з елементами кінематичного зміцнення, що призводить до залишкових осідань, які дружно накопичуються від циклу до циклу. Це формує довгострокову тенденцію до поступового осідання, яка не зникає з припиненням активних циклів.

Особливу роль відіграє низька проникність ковпака, через що перерозподіл порового тиску відбувається повільно. Це призводить до затримки консолідації; просідання триває навіть після припинення видобутку газу. Ці залежні від часу ефекти надзвичайно важливі для правильного розуміння даних геодезичного моніторингу, включаючи вимірювання InSAR та GNSS, оскільки вони визначають як амплітуду, так і швидкість вертикальних зміщень поверхні.

1.6. Загальна характеристика експлуатації підземних газосховищ

Підземні газосховища є невід'ємною частиною енергетичної інфраструктури, зокрема, пом'якшувальним фактором, що забезпечує надійність постачання природного газу та балансує сезонні коливання споживання, а також стабілізує ціноутворення. Їхнє існування дозволяє гнучко

та стабільно працювати енергетичним системам, компенсуючи пікові навантаження. Це також забезпечує стратегічні резерви, коли вони найбільше потрібні.

Експлуатація ПГС передбачає поєднання технічних, технологічних та геомеханічних процесів, що забезпечують безпечне закачування, зберігання та відбір газу в природні геологічні формації. Безпечна експлуатація таких об'єктів вимагає точного контролю тиску, а також стабільності гірського масиву та передбачуваності його поведінки в умовах циклічного навантаження.

Головною інженерною метою є збереження цілісності геологічного резервуара, покриву та прилеглих шарів, оскільки будь-яка зміна структурної рівноваги може призвести до втрати герметичності, пошкодження газотранспортної інфраструктури або навіть деформацій поверхні. Подальшою метою є мінімізація ризиків для поверхневих споруд, комунікацій та осідань, які можуть опинитися на шляху вертикальних рухів як функції зміни порового тиску.

Отже, ГСР складаються з дуже складних геотехнічних систем, у яких успішні технічні маніпуляції ніколи не можна відокремити від знань геомеханіки, гідродинаміки та залежної від часу поведінки гірських порід. Це ще одна причина, чому сучасні дослідження та моделювання насправді виявилися ключовими факторами ефективності та безпеки їхньої експлуатації.

Сучасне управління газовим резервуаром визначається чітко визначеним циклічним режимом роботи, таким чином, що періоди закачування газу чергуються з періодами відбору. Динаміка визначається сезонними потребами в енергії та графіками споживання, а також ринковими

та економічними факторами, від яких залежить терміновість створення стратегічних резервів. Збільшення тиску в резервуарі під час фази закачування поширюється далі на розширення порової системи породи-колектора, що призводить до змін ефективних напружень та пружної деформації порід. Частина деформацій є нелінійною через пластичні властивості порід та через тріщинувато-порове середовище.

Під час відбору газу настає зворотний процес – зниження порового тиску призводить до збільшення ефективних напружень, що супроводжується поступовим ущільненням породи. Це викликає вертикальні рухи поверхні, амплітуда яких залежить від властивостей ковпака, властивостей колектора, структурних особливостей пастки та швидкості зміни тиску. У реальних умовах ці процеси не є миттєвими: у низькопроникних шарах (зокрема, у глинистому ковпаку) відбувається залежний від часу перерозподіл порового тиску, який проявляється явищем, відомим як затримка консолідації, і може тривати навіть після завершення активних технологічних операцій.

Циклічний режим роботи утворює досить складну геомеханічну взаємодію між процесами тиску, деформації та фільтрації, яку необхідно глибоко науково проаналізувати для забезпечення безпечної та ефективної роботи газосховища.

Експлуатація підземних сховищ газу враховує широкий спектр геологічних та геомеханічних параметрів, характерних для окремого об'єкта. До них належать тип літології, ступінь цементації та ущільнення гірських порід, їх фізико-механічні властивості (модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, межі міцності та повзучість), пористість та проникність пласта, насичення порового простору водою або газом, ступінь тріщинуватості, а також орієнтація тектонічних розломів. Саме поєднання вищезазначених

параметрів описує, якою мірою та яким чином гірські породи реагують на зміни тиску під час змін температури, спричинених циклічною роботою ПГС.

З різними властивостями гірських порід змінюється не лише амплітуда деформацій, але й їх часовий характер: у високопроникних пісковиках реакція на зміни порового тиску проявляється швидко. У глинистих та низькопроникних породах спостерігається затримка реакції, яка виникає через повільний перерозподіл флюїдів. Саме ці особливості практично визначають конфігурацію вертикальних зміщень, їх просторову нерівномірність та можливість виникнення локальних зон підняття або просідання поверхні.

Моніторинг свердловин та наземної інфраструктури є важливим аспектом безпечної експлуатації будь-якого підземного сховища газу. Система ПГС містить фонд експлуатаційних, контрольних та спостережних свердловин, компресорних станцій, газопроводів, арматури та допоміжних технологічних споруд, які потребують регулярної діагностики. Перевірка герметичності обсадних колон та цементних мостів має велике значення, оскільки навіть незначні порушення можуть призвести до втрат газу, змін гідродинамічного режиму та створення небажаних деформацій у гірських масивах.

Також контролюється тиск, температура та швидкість потоку газів, що дозволяє своєчасно виявляти відхилення від нормального режиму роботи. Усе це разом мінімізує ризики техногенних аварій, не дозволяє газу витікати у верхні горизонти та зменшує ймовірність економічних втрат, спричинених простоями або аварійно-відновлювальними роботами. Значну роль у безпечному та стабільному режимі сховища відіграє технологічне регулювання тиску та швидкості закачування або відбору газу. Різкі зміни порового тиску можуть сприяти аномалії напружень і деформацій у гірському

масиві; можуть розвиватися існуючі тріщини; можуть активуватися підземні зсувні механізми, а також провокуватися локальні вертикальні зміщення. Режим роботи кожного сховища визначається окремо певними факторами, щоб уникнути таких наслідків. Враховуються геологічна будова, фільтраційні властивості пласта та стан покриву, а також деякі особливості газогео механічної взаємодії з породами.

Це дозволяє підтримувати тиск у безпечних межах, мінімізуючи таким чином будь-який ризик пошкодження конструкції резервуара та забезпечуючи передбачувану поведінку на поверхні протягом усього циклу експлуатації. Експлуатація газосховища включає не лише технічні та геомеханічні питання, але й деякі дуже важливі екологічні аспекти. Це, головним чином, мінімізація можливих витоків газу, контроль хімічного складу, а також динаміки ґрунтових вод, запобігання деградації ґрунту та забезпечення стабільного стану поверхневих структур. Будь-які зміни режиму фільтрації або порового тиску можуть впливати на навколишнє середовище; тому такі ризики повинні оцінюватися в рамках обов'язкових експлуатаційних робіт.

Сучасні технології моніторингу — автоматизоване вимірювання концентрації газу, цифровий контролер свердловин, геодезичні засоби реєстрації зміщень та гідрогеологічні датчики — сприяють оцінці параметрів навколишнього середовища в режимі реального часу. Об'єднання таких даних в єдину цифрову платформу дозволяє завчасно прогнозувати можливі відхилення та реагувати на них на етапі планування циклів закачування та відбору газу. Такий тип інтегрованої системи управління гарантує не лише дотримання стандартів щодо екології, але й підвищує загальну надійність сховища, знижуючи ймовірність виникнення надзвичайних ситуацій та негативного впливу на екологію.

Експлуатація підземних сховищ газу (ПСГ) – це багатокomпонентний процес, що охоплює технічні, геологічні, геомеханічні та екологічні питання. Стабільне управління параметрами пласта включатиме та вимагатиме інтегрованого управління ПСГ, від моніторингу стану свердловин до моніторингу деформацій поверхні та підземних шарів, а також герметичності всієї інфраструктури. Сучасні технології спостереження включають GNSS (Глобальні навігаційні системи), інтелектуальні датчики InSAR та автоматизовані системи SCADA, які можуть спостерігати зміни режиму в режимі реального часу. Інтеграція цих інструментів з циклічними режимами закачування та відбору газу забезпечує стабільну та безпечну роботу сховищ шляхом прогнозування поведінки гірських порід та своєчасного виявлення можливих відхилень, що гарантує надійне зберігання газу протягом усього періоду експлуатації.

Важливим фактором успішної експлуатації підземного сховища газу є розробка та суворе дотримання регламентованих технологічних режимів, що формуються з урахуванням геологічних, гідродинамічних та геомеханічних особливостей, характерних для конкретного ПСГ. До таких режимів належать оптимальні значення тиску під час закачування та відбору газу, допустимі швидкості зміни порового тиску та вимоги до плавності зміни режиму в пікові та міжсезонні періоди. Врахування добових та сезонних коливань попиту на газ дозволяє розподілити навантаження на пласт таким чином, щоб уникнути раптових стрибків тиску, які можуть призвести до небажаних геомеханічних наслідків.

Правильно налаштований режим роботи зменшує ймовірність утворення мікротріщин у породах покрівлі та підшви колектора, не сприяє надмірним вертикальним рухам та допомагає зберегти цілісність наземних

інженерних конструкцій. Це забезпечить довгострокову стабільність роботи АГПЗ у безпечних умовах навіть у періоди інтенсивних циклів закачування та відбору.

Комплексний моніторинг технічного стану підземних комунікацій та виробничих свердловин відіграє значну роль, оскільки від їхньої надійності залежить вся установка для зберігання газу. Основні заходи включають регулярні перевірки герметичності обсадних колон, контроль цілісності цементних кілець, оцінку умов у системах запірної арматури, а також компресорного обладнання як елементів технічної безпеки. Багато сучасних газосховищ мають автоматизовані діагностичні системи, які можуть фіксувати навіть незначні відхилення від режимів роботи - від локальних втрат тиску до аномальних змін температури в привибійній зоні. Завдяки таким системам можливі витoki газу разом з корозією або механічним руйнуванням обладнання будуть відомі своєчасно, тому персонал негайно відреагує, запобігаючи подальшому розвитку аварійної ситуації.

Іншим надзвичайно важливим аспектом є вплив гідрогеологічних умов на режим роботи газосховища. Умови ґрунтових вод, їх рух та ступінь насичення гірських порід безпосередньо визначають характер шляхів напружень у гірському масиві, а отже, і величини вертикальних зміщень поверхні. Високий ступінь насичення водою шарів глини покрівлі, наприклад, дозволяє рівномірніше розподіляти напруження, а отже, зменшувати локалізацію деформації, що забезпечує стабільність сховища; на відміну від сухих сильно тріщинуватих або пористих порід, де досягаються цілеспрямовані зміщення, які можуть призвести до локального просідання або підняття поверхні землі. Тому, вирішуючи, як завантажувати та видобувати газ, люди звертають увагу не лише на форму та міцність зони зберігання. Вони

також враховують фактори потоку води, такі як типи джерел води, а також спосіб та швидкість руху ґрунтових вод. Це допомагає знизити ймовірність небажаних змін форми та зберігає місце безпечним протягом тривалого часу.

Сучасні підземні газосховища активно впроваджують технології цифрового моделювання та прогнозування, які дозволяють створювати тривимірні сценарії, що описують поведінку пластів за різних умов експлуатації. За допомогою таких моделей можна не лише оцінити вплив існуючого режиму закачування та відбору газу, але й оцінити навантаження, які можуть виникнути в майбутньому як на покрівлі, так і на дні пласта. Метод цифрового моделювання дозволяє прогнозувати динаміку вертикальних зміщень, а також ранню локалізацію зон концентрації деформацій, щоб своєчасно вживати належних превентивних заходів проти надзвичайних ситуацій та пошкодження інфраструктури. Крім того, ці моделі, інтегровані з даними геодезичного моніторингу та внутрішніми вимірюваннями в гірському масиві, забезпечують більш точний та надійний прогноз, що гарантує безпечну та ефективну експлуатацію пластів протягом численних циклів використання сховищ.

Окрім традиційного моніторингу технічного стану, сучасна експлуатація підземного газосховища постійно аналізує енергетичну та економічну ефективність об'єкта, визначаючи оптимальний режим закачування та відбору, щоб забезпечити стабільні втрати ресурсів за найнижчих можливих втрат, а також забезпечити максимальну економічну вигоду від сезонних продажів. Цей розрахунок враховує коливання попиту, а також динаміку ринкових цін, а також враховує цикли, які впливають на геомеханічний стан резервуарів. Таким чином, ПСГ не тільки корисне для підтримки безпеки та цілісності геологічного середовища, але й діє як

ефективний енергетичний буфер у національній та регіональній системі газопостачання.

Сучасна практика експлуатації підземних сховищ газу робить акцент на екологічній безпеці з постійним моніторингом можливих витоків газу, стану ґрунтових вод та впливу на ґрунтовий покрив і поверхневі споруди. Сучасні сховища оснащені системами раннього попередження, автоматизованими датчиками та комплексами дистанційного моніторингу, які можуть контролювати ключові показники в режимі реального часу: тиск, температуру, деформації гірських порід, стан інфраструктури. За допомогою таких технологій, інтегрованих в одну систему, інженери отримують можливість своєчасно реагувати на будь-які ознаки небезпеки, а також прогнозувати ризики та вживати превентивних заходів. Безпечна експлуатація забезпечить довгострокову стабільність ПСГ, що є стратегічним елементом енергетичної інфраструктури.

Розширені характеристики експлуатації підземних газових сховищ охоплюють низку взаємопов'язаних аспектів: технологічний контроль режимів закачування та відбору газу, геомеханічну оцінку деформацій пласта та покрівлі, врахування гідрогеологічних умов, економічну оптимізацію робочих циклів та моніторинг навколишнього середовища. Комплексне поєднання цих компонентів забезпечує не тільки безпечне зберігання газу, але й стабільність та ефективність роботи сховища протягом багатьох років. Такий комплексний підхід дозволяє прогнозувати вертикальні рухи поверхні, запобігати надзвичайним ситуаціям, мінімізувати ризики негативного впливу на навколишнє середовище та підтримувати довгострокову надійність енергетичної інфраструктури.

1.7. Основні фактори, що впливають на вертикальні переміщення

Геологічні, технологічні та експлуатаційні фактори визначають вертикальні рухи земної поверхні над підземними сховищами газу. Розуміння та аналіз цих факторів дуже важливі для прогнозування деформацій, а також для досягнення безпеки експлуатації та мінімізації ризиків для наземних споруд.

Геологічні фактори – це геологічна структура та фізичні й механічні властивості гірських порід, що визначають чутливість безпечного зберігання газу до змін тиску та циклічних навантажень. Це включає тип порід, анізотропію та глибину пласта. Глинисті та пластичні породи можуть накопичувати енергію за допомогою деформації, тоді як більш щільні породи реагують переважно пружною поведінкою. Анізотропія плюс тріщинуватість призводять до локальної концентрації напружень, тоді як глибші пласти зменшують амплітуду поверхневих зміщень.

Гідрогеологічні фактори – підземні води та водоносні горизонти впливають на вертикальні рухи шляхом змін порового тиску та еластичності гірських порід, серед аспектів, які слід враховувати, – це рівень підземних вод та його сезонні коливання, взаємодія водоносних горизонтів та водонепроникних горизонтів з газовим резервуаром, серед іншого, а також зміни гідростатичного тиску під час експлуатації сховища.[20]

Технологічні фактори – режими експлуатації та технологія газосховища безпосередньо контролюють величину вертикальних зміщень, включаючи цикли закачування та відбору газу: швидкість зміни порового тиску та амплітуду циклів, на які впливає розподіл напружень у гірських породах, пластовий тиск стосовно можливих локальних розривів порід, а

також накопичення пластичних деформацій та затримки вертикальних зміщень.

Наземні інженерні споруди, тектонічні коливання як природні геодинамічні процеси та кліматичні фактори, наприклад, сезонні коливання температури, морозний або сухий стан ґрунтового покриву, змінюють пружні властивості поверхневих порід.

Взаємодія факторів – вертикальні зміщення є продуктом взаємодії всіх факторів, таким чином, що однакові режими закачування газу на поверхню за різних геологічних умов призводять до різної величини просідання. Таким чином, адекватний прогноз вертикальних зміщень вимагає врахування не лише технологічних параметрів, а й геології, гідрології та впливу зовнішніх умов. Саме такий підхід може допомогти визначити зони з найвищим ризиком та забезпечити пошук оптимальних режимів роботи разом із використанням сучасних методів моніторингу та моделювання, що контролюють вертикальні зміщення в режимі реального часу.

Недавні дослідження доводять, що вертикальні зміщення можуть суттєво відрізнятися в межах одного й того ж газового резервуара через локальні геологічні неоднорідності та взаємодію кількох факторів. Наприклад, у деяких місцях гірська порода може проявляти пружність, тоді як поруч накопичується пластична деформація, що призводить до локальних просідань. Такі явища мають особливе значення для великих газових сховищ, що мають широку мережу свердловин.

У міжнародному масштабі застосовуються різні методи спостереження за вертикальними рухами: супутникова інтерферометрія (InSAR), GNSS-моніторинг та лазерне сканування. Ці високі технології дозволяють виявляти

навіть міліметрові зміщення поверхні та контролювати їх динаміку в режимі реального часу. Саме такі дані використовуються для калібрування числових моделей під час отримання прогнозів щодо майбутніх осідань.

Також слід враховувати вплив циклічних навантажень: сезонні зміни споживання газу означають регулярне закачування та відбір газу, що, своєю чергою, означає повторювані зміни порового тиску. Це може призвести до накопичення деформацій як у покрівлі, так і в днищі пласта. Таким чином, щоб уникнути небажаних результатів, деякі сучасні системи генерації газів (ПГС) використовують комп'ютерне моделювання в'язкопружних та пластичних властивостей гірських порід, що дозволяє їм прогнозувати затримані вертикальні зміщення на тривалий період.

Також у дослідженнях вказується на актуальність моніторингу навколишнього середовища: він дозволяє своєчасно виявляти потенційно небезпечні зони, контролюючи стан ґрунтових вод та ґрунтів, а також коригувати режими роботи з точки зору забезпечення стабільності поверхні. У деяких країнах застосовуються цифрові двійники PGS, що інтегрують геологічні, гідрогеологічні та експлуатаційні дані для забезпечення точного прогнозування зміщень та управління експлуатаційними ризиками.

Сучасна практика експлуатації підземних газосховищ у різних країнах демонструє вплив геологічних, технологічних і гідрогеологічних факторів на вертикальні переміщення:

- Нідерланди – у великих газосховищах Гроїнінген було зафіксовано значні вертикальні переміщення поверхні через повторювані цикли відбору газу. Моніторинг InSAR показав осідання до 30 см на деяких

ділянках, що стало причиною перегляду режимів експлуатації та зниження інтенсивності відбору газу для зменшення ризику землетрусів.

- Німеччина – на ПГС в регіоні Нижня Саксонія впровадили цифрові моделі, які враховували анізотропію порід і циклічний тиск. Завдяки цьому вдалося передбачити локальні осідання та скорегувати режими закачування, зменшивши поверхневі деформації на 15–20%.
- США – на газосховищах у Техасі та Луїзіані застосовують інтегровані системи моніторингу, що включають GNSS, InSAR та підземні датчики тиску. Це дозволяє у режимі реального часу відстежувати вертикальні переміщення до міліметра і вчасно коригувати режими експлуатації для запобігання аварій.
- Китай – на досліджуваних ПГС впроваджують моделювання в'язкопружних і пластичних властивостей порід для прогнозування відкладених деформацій. Це дозволяє передбачати довгострокові вертикальні переміщення та забезпечувати стабільність покрівлі і підшови колектора протягом багатьох років.
- Італія – у ПГС Ломбардії вивчали вплив тектонічних процесів та сезонних кліматичних коливань на поверхневі деформації. Дослідження показали, що в регіонах із підвищеною сейсмічною активністю вертикальні переміщення можуть збільшуватися на 15–25% у порівнянні зі стабільними зонами, що підкреслює необхідність інтегрованого моніторингу.

Використання поверхневих цифрових двійників ПГС, що базуються на геологічних, гідрогеологічних та експлуатаційних даних, вже стає стандартом у багатьох країнах. У свою чергу, моделі дозволяють не лише прогнозувати

вертикальні зміщення, але й оцінювати наслідки, які призведуть до коригування режимів роботи, розробляти плани запобігання та мінімізувати ризики для інфраструктури та навколишнього середовища. Таким чином, міжнародний досвід довів, що реальний прогноз вертикальних зміщень може бути ефективно здійснений лише шляхом комплексних зусиль, що поєднують геологічний аналіз, контроль гідрогеологічних умов, оптимізацію технологічних режимів, використання цифрових моделей та сучасних систем моніторингу. Це допоможе забезпечити безпечну експлуатацію ПГС, мінімізуючи при цьому економічні та екологічні ризики.

1.8. Вплив циклів закачування та відбору газу на деформації

Циклічний режим роботи підземних газосховищ – основний фактор, який безпосередньо визначає величину та характер вертикальних переміщень поверхні. Закачування газу збільшує поровий тиск у колекторі, що призводить до розширення пор і пластів порід, тоді як відбір газу зменшує поровий тиск, спричиняючи ущільнення порід та осідання поверхні.

Характеристика впливу циклів:

- Інтенсивність циклів – швидка зміна тиску під час закачування або відбору газу може призводити до локальних розривів порід і активації тріщинуватості. Навпаки, поступові зміни порового тиску дозволяють породам адаптуватися і зменшують ризик небажаних вертикальних переміщень.
- Амплітуда циклів – величина коливань порового тиску визначає ступінь накопичення деформацій у породах. Велика амплітуда закачування та відбору може спричиняти накопичення пластичних деформацій, що проявляються відкладеними осіданнями на поверхні.

- Тривалість циклів – тривалі періоди стабільного порового тиску дозволяють породам відновлюватися після попередніх навантажень, що зменшує довгострокові деформації. Короткі та часті цикли сприяють поступовому накопиченню осідань і підвищенню ризику локальних зсувів.[21]

Міжнародний досвід:

- Нідерланди – на ПГС Гроїнінген цикли відбору газу значно впливали на вертикальні переміщення поверхні. Інтерферометричні спостереження показали, що після кількох років інтенсивної експлуатації осідання досягало 30 см, що стало причиною перегляду режимів роботи та зменшення швидкості циклів.
- Німеччина – у ПГС Нижньої Саксонії впровадили цифрове моделювання циклів закачування та відбору з урахуванням анізотропії порід, що дозволило передбачити локальні осідання та оптимізувати режими експлуатації, зменшивши вертикальні переміщення на 15–20%.
- Китай – на досліджуваних сховищах впроваджували моделювання в'язкопружних властивостей порід, що дозволило прогнозувати відкладені деформації через багаторічні цикли роботи та забезпечити стабільність покрівлі і підшви колектора протягом десятиліть.

Практичні наслідки: розуміння впливу циклів на вертикальні переміщення дозволяє розробляти оптимальні режими роботи газосховищ з точки зору ризику аварій, локальних зсувів, а також надмірних просідань. Крім того, об'єднання цифрових моделей та систем моніторингу забезпечує прогнозування деформацій у режимі реального часу та дозволяє оперативно коригувати режими роботи.

Отже, вплив циклів закачування та відбору газу має прямий зв'язок з безпечною та ефективною експлуатацією газосховищ. Раціональне планування циклів, контроль за швидкістю зміни порового тиску та сучасні методи прогнозування зводять до мінімуму негативні наслідки для поверхневих структур та навколишнього середовища.

Також зверніть увагу, що вплив циклів закачування та відбору газу на вертикальні зміщення значною мірою залежить від форми газового пласта та відстані між свердловинами. У великих сховищах нерівномірне розташування свердловин може створювати місця з вищими напруженнями, що збільшує ймовірність розтріскування та нерівномірного просідання поверхні.

Сучасні ПГС використовують числове моделювання на основі в'язкопластичних властивостей гірських порід, що дозволяє прогнозувати не лише миттєві деформації, але й затримки осідання, які відбуваються через багато років після циклічного навантаження. Такі моделі враховують:

- індивідуальні механічні характеристики кожного шару порід,
- взаємодію з підземними водами,
- ефект температурних коливань на пружність і в'язкість порід.

Також міжнародний досвід доводить важливість регулярного спостереження за станом наземних конструкцій над газосховищем. Наприклад, у США та Нідерландах, окрім супутникового моніторингу (InSAR), використовуються наземні GPS-станції, датчики нахилу та оптичні трекери, які дозволяють виявляти навіть міліметрові зміщення та своєчасно коригувати режими закачування та відбору. Варто також зазначити, що екологічні та соціальні аспекти впливу циклів експлуатації газосховища

набувають дедалі більшого значення. Великі просідання поверхні можуть пошкодити інфраструктуру, спричинивши тріщини в будівлях та дорожніх покриттях, а також порушити водний баланс місцевих ґрунтів. Ці фактори, враховані при плануванні циклів експлуатації газосховища, забезпечують безпечну експлуатацію, мінімізуючи негативний вплив на навколишнє середовище.[22]

Циклічне навантаження (0 – 12 годин):

- *Поровий тиск (блакитна лінія):* Тиск демонструє циклічне коливання від 0 кПа до максимуму близько 300 кПа під час фази закачування газу і швидке падіння до нуля під час відбору. На цьому проміжку часу відтворено три повні цикли.
- *Вертикальне переміщення (помаранчева лінія):* Переміщення ґрунтового масиву носить накопичувальний характер. У фазі закачування, коли тиск зростає, відбувається підняття ґрунту (дилатація), а у фазі відбору – осідання (консолідація).

Накопичення залишкових деформацій: Крива вертикальних переміщень чітко демонструє гістерезис та пластичне накопичення деформацій. Після кожного циклу тиску ґрунт не повертається до початкового положення. Загальна величина накопичених вертикальних переміщень після трьох циклів (12 годин) становить приблизно 35 мм.

Довгострокова релаксація (12 – 24 години):

- *Стабілізація тиску:* Після завершення третього циклу поровий тиск стабілізується на нульовому рівні, що відповідає повному відбору газу.

- *Консолідація після навантаження:* Незважаючи на відсутність активного впливу тиску, вертикальні переміщення продовжують зростати, досягаючи близько 45 мм до 24 години. Цей ефект пояснюється процесом консолідації ґрунтового масиву – повільною передислокацією води та перебудовою скелета породи під дією ефективних напружень. Така фаза підкреслює важливість довгострокового моніторингу деформацій.

Висновки:

Графік наочно демонструє необхідність використання поропружно-пластичної моделі для точного прогнозування деформацій у ПГС. Він показує, що загальна вертикальна деформація складається з двох ключових компонентів:

1. циклічне накопичення деформацій (пластичність),
2. повільна консолідаційна реакція (поропружність).

Обидва механізми слід враховувати при оцінці довгострокової стійкості сховища.

1.9. Чисельне моделювання вертикальних переміщень гірського масиву при експлуатації підземних газосховищ

Моделювання вертикальних зміщень є одним з основних інструментів оцінки геомеханічного стану гірського масиву над підземним сховищем газу. Воно дозволяє враховувати складну геологічну будову, фізико-механічні параметри порід, а також динамічні зміни пластового тиску, які можуть виникати внаслідок циклічної експлуатації ПСГ.

Чисельне моделювання базується на використанні методу скінченних елементів або скінченних різниць для розв'язання задач пружно-пластичної деформації багаторівневих геологічних масивів. Це описує підхід, за якого можна визначити просторові розподіли напружень та деформацій у гірському масиві, оцінити амплітуду вертикальних зміщень поверхні та знайти залишкові деформації шляхом прогнозування їх накопичення після тривалих циклів експлуатації зі зберігання.

Модель зазвичай складається з компонента пружності, який описує оборотну деформацію породи відносно тиску, компонента пластичності, який пояснює накопичення незворотної деформації, та поропружного або поропластичного компонента, який враховує взаємодію між поровим тиском та механікою гірських порід згідно з теорією, розробленою Біо.

Для побудови моделі необхідно визначити:

1. Геометрію сховища та товщі порід, що навколо нього;
2. Фізико-механічні характеристики колекторних і припластових порід – модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, межу міцності, коефіцієнт стисливості;
3. Початковий розподіл пластового тиску та умови експлуатації – обсяги закачування і відбору газу, частоту циклів, швидкість зміни тиску;
4. Граничні умови та взаємодію масиву з навколишнім середовищем, включно з поверхневими навантаженнями та тектонічними впливами.

Моделювання зазвичай проводиться у два етапи: – Циклічне навантаження, що відповідає закачуванню та відбору газу. На цьому етапі визначаються амплітуди вертикальних переміщень, накопичення

залишкових деформацій та гістерезис у поведінці масиву;
 – Довгострокова релаксація, коли тиск стабілізується або досягає нульового значення. Цей етап дозволяє оцінити консолідаційні ефекти, повільне збільшення вертикальних переміщень і остаточне формування геомеханічного стану масиву.

Результати чисельного моделювання наочно демонструють два ключові механізми, що визначають поведінку гірського масиву над ПГС:

1. Циклічне накопичення деформацій, яке пов'язане з пластичними властивостями порід;
2. Повільна консолідаційна реакція, що проявляється навіть при стабільному тиску, і пов'язана з релаксацією порового тиску та перебудовою скелета породи.

Таке комплексне моделювання дозволяє прогнозувати:

- вертикальні переміщення земної поверхні;
- потенційні аномальні зони осідань або підняття;
- довгострокову стабільність газосховища та його безпечну експлуатацію.

Чисельне моделювання необхідне для оцінки ефективності різних режимів роботи та допустимих швидкостей зміни тиску, а також заходів, які можна вжити для уникнення аварійних ситуацій. Такі підходи забезпечують підвищення надійності та безпеки підземних сховищ газу в умовах сучасного розвитку газотранспортної системи України.

До чисельного моделювання варто також включати темпоральні та просторові аспекти поведінки порід:

- Часова залежність деформацій дозволяє врахувати ефекти повзучості, релаксації та гістерезису, що особливо важливо при тривалій експлуатації

ПГС;

– Просторова неоднорідність порід забезпечує можливість відображення локальних аномалій, таких як тріщинуваті або слабкі шари, які впливають на концентрацію напружень і формування локальних зон підняття або осідання.

Особливо корисним є застосування тривимірного моделювання, яке дозволяє:

- враховувати складну геометрію покладу та форми газового резервуара;
- моделювати взаємодію ПГС із навколишнім масивом і надпластовими шарами;
- передбачати асиметричний розподіл вертикальних переміщень на поверхні, що відповідає реальним спостереженням геодезичних і інтерферометричних даних.

Додатково можна враховувати термомеханічні ефекти:

- різниця температур газу та масиву пород може спричиняти додаткові термодеоформації;
- в умовах циклічної експлуатації ці ефекти кумулюються та впливають на амплітуду вертикальних переміщень, особливо для глинистих і соляних товщ.

Важливо також інтегрувати гідродинамічні взаємодії:

- зміни порового тиску взаємопов'язані з рухом води та газу в колекторі;
- врахування залишкових флюїдів (конденсат, вода) дозволяє більш точно оцінити ефекти консолідації та пластичної деформації;
- при високій водонасиченості амплітуда вертикальних переміщень зменшується, тоді як при газонасичених умовах – збільшується.

Особливу увагу слід приділити впливу техногенних факторів:

- швидкість зміни тиску і частота циклів можуть підвищувати накопичення

залишкових деформацій;

- поверхневі навантаження (будівлі, транспорт, промислові об'єкти) впливають на локальний розподіл вертикальних переміщень;
- історія експлуатації ПГС та попередні цикли закачування/відбору визначають часткову деградацію пружних властивостей колектора і накопичення залишкових деформацій.

На основі цих доповнень чисельне моделювання набуває ще більшої практичної значущості, дозволяючи:

- оцінювати потенційні зони аномальних деформацій;
- прогнозувати довгострокову стабільність газосховища;
- розробляти оптимальні режими закачування та відбору газу;
- інтегрувати результати з даними геодезичного та супутникового моніторингу для верифікації моделей.

Розділ 2. Теоретичні основи та математична модель вертикальних переміщень

2.1 Фундаментальні рівняння геомеханіки пористих середовищ

Геомеханічне вивчення поведінки підземних сховищ газу базується на тому факті, що гірські породи є пористими тілами, механічна деформація твердого скелета яких безпосередньо пов'язана зі змінами тиску, що чиниться рідинами (газами) всередині їхніх пор. Воно використовує їх взаємозв'язок як основу для моделювання вертикальних рухів гірських порід.

Ключовим поняттям, що визначає цей зв'язок, є принцип ефективних напружень. Вперше введене Терцагі (Terzaghi) поняття ефективного напруження (σ') базується на положенні, що деформації скелета породи —

стиснення (консолідація) або розширення (дилатація) — обумовлені лише частиною навантаження, яка передається через контакти між твердими частинками. Поровий тиск (P_p) діє протилежно, зменшуючи це міжзернове навантаження. Класичне рівняння Терцагі

$$\sigma' = \sigma - P_p \quad (1)$$

було узагальнене Бішопом (Bishop) та інтегроване в теорію Біо (Biot), що дозволило більш точно описувати поведінку насичених і частково насичених пористих середовищ.

У загальному тензорному вигляді узагальнений принцип ефективних напружень формулюється так:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha P_g \delta_{ij}, \quad (2)$$

де σ'_{ij} — тензор ефективних напружень, σ_{ij} — тензор повних напружень у точці масиву, P_g — поровий тиск газу, δ_{ij} — символ Кронекера, а α — коефіцієнт ефективних напружень Біо, який характеризує ступінь впливу зміни порового тиску на деформацію скелета. Значення α перебуває у межах $0 < \alpha \leq 1$; для повністю стисливих порід $\alpha \approx 1$. Чим менша стисливість зерен порівняно зі стисливістю каркасу, тим ближче α до одиниці.

Фізичний зміст цього співвідношення полягає в тому, що зміна порового тиску (ΔP_g) безпосередньо призводить до зміни ефективних напружень ($\Delta \sigma'$) і, відповідно, до зміни об'єму пор та вертикальних переміщень. Зокрема, підвищення порового тиску призводить до зменшення ефективних напружень, що викликає дилатацію колектора і підняття поверхні.

Механічна поведінка пористого середовища описується рівняннями рівноваги, які для статичного або квазістатичного режиму, характерного для повільних геомеханічних процесів, мають вигляд:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + F_i = 0 \text{ або } \sigma_{ij,j} + F_i = 0, \quad (3)$$

де F_i — компоненти вектора об'ємних сил (переважно гравітаційних).

Підставляючи у це рівняння вираз для повних напружень через ефективні, отримуємо:

$$\frac{\partial \sigma'_{ij}}{\partial x_j} + \alpha \frac{\partial P_g}{\partial x_i} + F_i = 0. \quad (4)$$

Це рівняння становить механічну складову зв'язаної задачі. Воно демонструє, що розподіл переміщень (u_i) та тензора деформацій

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

визначається не лише зовнішніми навантаженнями (F_i), а й градієнтом порового тиску ($\partial P_g / \partial x_i$). Тобто зміна тиску газу під час закачування або відбору діє як внутрішнє джерело механічного навантаження, яке безпосередньо спричиняє вертикальні переміщення.[23]

Для розв'язання цієї системи необхідно застосувати конститутивне рівняння (закон Гука або його пластичні аналоги), що пов'язує ефективні напруження σ'_{ij} з деформаціями ε_{ij} , а також гідродинамічне рівняння, яке описує еволюцію порового тиску P_g у часі.

Продовжуючи розгляд фундаментальних рівнянь, критично важливо деталізувати процес визначення початкового напружено-деформованого стану (НДС), який існує до початку експлуатації підземного газосховища, а також кількісно обґрунтувати ключові коефіцієнти. До початку циклічної

експлуатації гірський масив перебуває у стані геостатичної рівноваги. Для коректної постановки чисельної задачі необхідно точно визначити початкові повні напруження σ_{ij}^0 та початковий поровий тиск P_g^0 . Вертикальне напруження σ_{zz} визначається вагою стовпа порід (літостатичним тиском) над глибиною залягання H :

$$\sigma_{zz}(H) = \int_0^H \rho(z)g \, dz, \quad (6)$$

де $\rho(z)$ — густина порід на глибині z , g — прискорення вільного падіння. Для спрощеної оцінки часто застосовують середню густину порід:

$$\sigma_{zz} \approx \rho_{avg}gH. \quad (7)$$

Початковий поровий тиск P_g^0 у неексплуатованому колекторі зазвичай відповідає гідростатичному тиску водоносних горизонтів або початковому пластовому тиску, якщо це виснажене родовище:

$$P_g^0(H) = \rho_w g H, \quad (8)$$

де ρ_w — густина пластової води. Горизонтальні напруження σ_{xx} та σ_{yy} у природному НДС визначаються через коефіцієнт бічного розпору (спокою) K_0 :

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_H = K_0 \sigma_{zz}. \quad (9)$$

Для нормально консолідованих осадових порід коефіцієнт K_0 можна оцінити за формулою Жакі (Яку, 1944), пов'язаною з кутом внутрішнього тертя порід ϕ :

$$K_0 \approx 1 - \sin \phi. \quad (10)$$

При використанні пружних параметрів допустиме наближення:

$$K_0 = \frac{\nu}{1-\nu}, \quad (11)$$

де ν — коефіцієнт Пуассона. Визначення K_0 є критично важливим, оскільки воно впливає на початкові ефективні напруження та чутливість колектора до зміни порового тиску.

Коефіцієнт ефективних напружень Біо (α) є фізичною константою, що пов'язує стисливість скелета і твердої фази породи. Його точне значення визначальне для моделі поропружності та розраховується за формулою:

$$\alpha = 1 - \frac{K_c}{K_s}, \quad (12)$$

де K_c — об'ємний модуль стисливості пористого скелета, який пов'язаний з модулем Юнга E та коефіцієнтом Пуассона ν через співвідношення:

$$K_c = \frac{E}{3(1-2\nu)}, \quad (13)$$

а K_s — об'ємний модуль стисливості твердої фази (зерна), що є сталою величиною для даного мінерального складу, наприклад, для кварцового пісковика $K_s \approx 36 - 40$ ГПа. Завдяки цьому співвідношенню коефіцієнт α інтегрує механічні властивості скелета породи з характеристиками матеріалу зерен. У типових пісковикових колекторах α знаходиться в діапазоні $0.7 \div 0.9$; чим жорсткіший скелет породи (вищий E), тим менше значення α .

Для повної постановки задачі необхідно також визначити порову стисливість C_ϕ , що описує зміну пористості ϕ під впливом тиску. У теорії Біо загальна зміна об'єму флюїду (газу) у поровому просторі ζ складається з двох частин: зміни об'єму скелета ε_V та стиснення самого флюїду:

$$\zeta = \alpha \varepsilon_V + \frac{1}{M} P_g. \quad (14)$$

Цей вираз демонструє, що навіть за відсутності деформації скелета ($\varepsilon_V = 0$) зміна порового тиску P_g спричиняє зміну об'єму флюїду. Модуль Біо-Вілліса M визначається через стисливість скелета, флюїду C_f та пористість ϕ :

$$\frac{1}{M} = \frac{1-\alpha}{K_s} + \phi C_f. \quad (15)$$

Всі ці параметри, пов'язані з модулями пружності та стисливості, повинні бути визначені для кожного шару гірських порід у моделі, щоб забезпечити коректне розв'язання зв'язаної системи рівнянь та точне прогнозування вертикальних переміщень.[24]

2.2 Теорія поропружності Біо та зв'язана модель фільтрації

Для точного опису геомеханічної поведінки підземного сховища газу (ПСГ) за циклічних умов експлуатації, коли тиск газу змінюється з часом, недостатньо використовувати статичний принцип ефективних напружень. У цьому випадку доцільно застосувати теорію поропружності Біо, яка передбачає двосторонню (тобто пов'язану) взаємодію між механічною деформацією гірського скелета та процесами фільтрації рідини (газу) в поровому просторі. Теорія була розроблена Морісом Біо та дозволяє моделювати динамічні процеси консолідації та дилатації; це фактично основні механізми, що беруть участь у вертикальних зміщеннях, що залежать від часу. Математичний апарат Біо поєднує рівняння рівноваги (механічна частина) та рівняння балансу маси рідини (гідродинамічна частина) в одну систему.

Математичний апарат Біо об'єднує рівняння рівноваги (механічна складова) та рівняння балансу маси флюїду (гідродинамічна складова) в єдину систему.

Механічна складова описує рівновагу напружень, де тензор ефективних напружень σ'_{ij} пов'язаний із деформаціями ε_{ij} через узагальнений закон Гука та градієнт порового тиску:

$$\frac{\partial \sigma'_{ij}}{\partial x_j} + \alpha \frac{\partial P_g}{\partial x_i} + F_i = 0, \quad (16)$$

де для пружного ізотропного середовища σ'_{ij} виражається через модулі Ламе (λ та G).

Гідродинамічна складова є особливо важливою для транзйєтного аналізу та описує закон збереження маси газу, враховуючи його рух (фільтрацію) та зміну об'єму порового простору під дією деформацій скелета. Вона формується як узагальнення закону Дарсі та закону збереження маси:

$$\nabla \cdot \left(\frac{k}{\mu} \nabla P_g \right) = \frac{1}{M} \frac{\partial P_g}{\partial t} + \alpha \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t}, \quad (17)$$

де ліва частина описує дифузію порового тиску, k – тензор проникності, μ – динамічна в'язкість газу. Права частина включає зв'язані терміни:

- $\frac{1}{M} \frac{\partial P_g}{\partial t}$ – зміна тиску, обумовлена загальною стисливістю системи «скелет–флюїд», де M – модуль Біот-Віллїса;
- $\alpha \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t}$ – прямий механічно-гідродинамічний зв'язок, що демонструє вплив швидкості об'ємної деформації скелета ($\varepsilon_V = \varepsilon_{kk}$) на зміну порового тиску. Цей термін є ключовим для моделювання компресії пор та уповільненої консолїдації колектора.

Для чисельного моделювання критично важливим є точне визначення коефіцієнта Біо (α) та модуля Біот-Віллїса (M).

Коефіцієнт Біо визначається як:

$$\alpha = 1 - \frac{K_c}{K_s}, (18)$$

де K_c та K_s – об’ємні модулі колектора та зерен відповідно, що відображає ефективність передачі тиску.[25]

Модуль Біот-Вілліса характеризує загальну стисливість системи та обчислюється за формулою:

$$\frac{1}{M} = \frac{1-\alpha}{K_s} + \phi C_f, (19)$$

де ϕ – пористість, а C_f – стисливість флюїду (газу). Через високу стисливість газу (C_f велике) система ПГС проявляє високу чутливість до змін тиску.

Теорія Біо також дозволяє оцінювати час консолідації за допомогою коефіцієнта гідравлічної дифузії:

$$c_h = \frac{kM}{\mu\alpha}. (20)$$

Низька проникність колектора призводить до зменшення c_h та, відповідно, до тривалих часових затримок у розвитку вертикальних деформацій, що проявляється як відкладене осідання після завершення активної фази відбору газу. Таким чином, застосування Теорії поропружності Біо є обов’язковим для транзйєнтного чисельного моделювання ПГС, оскільки вона дозволяє прогнозувати як миттєві, так і довгострокові вертикальні деформації над сховищем.

2.3 Конститутивні моделі нелінійної поведінки гірських порід (Пластичність)

Для надійного моделювання довгострокової роботи підземних установок для зберігання газу недостатньо використовувати виключно пружну теорію поропружності Біо. На практиці всі породи демонструють нелінійну,

пружно-пластичну поведінку під час циклічного навантаження. Особливо актуальними є слабо зцементовані пісковики та глинисті товщі. Як було показано на Рис. 1.1, циклічна зміна ефективних напружень (σ') призводить до гістерезису та, що найбільш критично, до накопичення залишкових (незворотних) об'ємних деформацій (ε_V^p). Ці незворотні деформації є причиною постійного осідання земної поверхні, що становить основний геомеханічний ризик. Тому для моделювання необхідно інтегрувати рівняння Біо з відповідним конститутивним законом пластичності. Одним із найбільш поширених та зручних для чисельної реалізації в методі кінцевих елементів (МКЕ) є критерій текучості Друкера–Прагера (Drucker–Prager yield criterion), який є узагальненням та гладкою апроксимацією класичного критерію Мора–Кулона і дозволяє уникнути сингулярностей у поверхні текучості. Він визначає умову, при якій напруження досягають межі міцності, і порода переходить у стан пластичної течії. Функція текучості (F) у просторі ефективних напружень виражається через інваріанти тензора ефективних напружень, а саме: через перший інваріант (I_1) та другий інваріант девіатора напружень (J_2) як $F(\sigma', I_1, J_2) = \sqrt{J_2} + \beta I_1 - k = 0$, де $I_1 = \sigma'_{kk}$ – середнє ефективне напруження, а $J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}$ – другий інваріант девіатора ефективних напружень, S_{ij} – девіатор. Якщо $F < 0$, матеріал поводить себе пружно, якщо $F = 0$, виникає пластична деформація. Параметри критерію, β та k , пов'язані з традиційними геомеханічними характеристиками Мора–Кулона – кутом внутрішнього тертя (ϕ) та зчепленням (c) за формулами $\beta = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}$ та $k = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}$, що дозволяє використовувати відомі інженерно-геологічні параметри для постановки складної чисельної задачі. Для опису поведінки породи в умовах багатоциклового навантаження необхідно враховувати

механізми зміцнення: ізотропне зміцнення описує збільшення розміру поверхні текучості (k) у просторі напружень, моделюючи загальне ущільнення породи після максимального навантаження і роблячи її жорсткішою для наступних циклів, тоді як кінематичне зміцнення описує зміщення центру поверхні текучості, що є ключовим для моделювання ефекту Баушингера та гістерезису, дозволяючи точно відтворити поведінку породи при розвантаженні (закачуванні) та навантаженні (відборі) і забезпечує фіксацію залишкових вертикальних переміщень після кожного завершеного циклу. Кінцева математична модель, що використовується для прогнозування вертикальних переміщень, є зв'язаною поропружно-пластичною моделлю, де повний тензор деформації (ε_{ij}) розкладається на пружну (ε_{ij}^e) та пластичну (ε_{ij}^p) складові: $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p$. Пружна складова використовується в рівняннях Біо для визначення ефективних напружень та зв'язку з поровим тиском, а пластична складова визначається правилом течії (flow rule) пластичної моделі і накопичується лише тоді, коли функція текучості F досягає нуля. Завдяки цій інтеграції чисельна модель може точно відтворити як швидку пружну реакцію на зміну тиску, так і повільне, кумулятивне накопичення незворотних вертикальних деформацій на поверхні, що є основною метою даного дослідження.

2.4 Методологія чисельної реалізації (Метод кінцевих елементів)

Єдиним ефективним інструментом є метод кінцевих елементів (МКЕ). Неперервні диференціальні рівняння, що описують поведінку гірського масиву, перетворюються на дискретну систему алгебраїчних рівнянь, яку можна розв'язати чисельно. МСЕ дозволяє моделювати складну геометрію (неправильну форму сховища) та неоднорідність властивостей матеріалу, крім інтеграції нелінійних конститутивних законів, зокрема пружно-пластичних.

Першим етапом чисельної реалізації є дискретизація області моделювання (грунтового масиву) на скінченні елементи, наприклад, тетраедричні або гексаедричні, після чого формується глобальна система рівнянь. У рамках МКЕ зв'язана поропружна задача перетворюється на систему, яка одночасно розв'язує для вектора переміщень u та вектора порового тиску P_g . У матричній формі ця система, залежна від часу t , може бути представлена як

$$[K \ L \ L^T \ S] \{\dot{u} \ \dot{P}_g\} + [0 \ 0 \ 0 \ H] \{u \ P_g\} = \{\dot{F} \ Q\}.$$

Тут матриця K – це матриця жорсткості (Stiffness Matrix), яка включає пружні та пластичні складові матеріалу і відображає механічний опір скелета породи деформації; L – матриця зв'язку (Coupling Matrix), що описує, як поровий тиск P_g створює об'ємні сили, що впливають на переміщення u ; L^T – транспонована матриця зв'язку, яка описує зворотний вплив деформацій скелета на зміну об'єму пор i , відповідно, на поровий тиск; H – матриця проникності або фільтрації (Permeability Matrix), що включає проникність k та динамічну в'язкість газу μ , описуючи гідродинамічний опір течії флюїду; S – матриця стисливості (Compressibility Matrix), яка враховує параметри стисливості системи, зокрема модуль Біо M , визначаючи здатність системи накопичувати флюїд; F – вектор зовнішніх навантажень, а Q – вектор джерел або стоків, що характеризує швидкість закачування або відбору газу.

Оскільки циклічна експлуатація ПГС є транзієнтним процесом, для розв'язання цієї системи застосовується покрокове інтегрування у часі (Time Stepping), що дозволяє моделювати динаміку тиску відповідно до реального експлуатаційного графіку та відтворювати уповільнені процеси консолідації, пов'язані з низькою гідравлічною дифузією c_h , що призводить до відкладених вертикальних переміщень. Крім того, система є нелінійною через інтеграцію

пластичної моделі – пластичні деформації ε^p виникають лише тоді, коли досягається умова текучості, і матриця K оновлюється ітеративно на кожному часовому кроці, наприклад, за допомогою методу Ньютона-Рафсона, з урахуванням поточного рівня зміцнення (Hardening) породи. Саме цей апарат МКЕ, реалізований у спеціалізованому програмному забезпеченні, такому як Plaxis або Abaqus, дозволяє прогнозувати просторово-часовий розподіл вертикальних переміщень u_z у всьому ґрунтовому масиві, враховуючи циклічне накопичення залишкових деформацій.

Розв'язання нелінійної пружно-пластичної задачі вимагає ітераційного підходу, при якому на кожному кроці часу Δt необхідно визначити, чи відповідає поточний стан напружень критерію текучості $F = 0$. Для цього застосовується метод Ньютона-Рафсона або його модифікації для розв'язання нелінійності. На кожній ітерації (k) всередині часового кроку матриця жорсткості K оновлюється з урахуванням тангенціального модуля пластичності D_k^{ep} , що коректно відображає поточний стан зміцнення (Hardening) породи і гарантує точне обчислення накопичення пластичної деформації ε^p . Для забезпечення фізичної коректності моделювання використовується алгоритм повернення на поверхню текучості (Return Mapping Algorithm), який гарантує, що після оновлення напружень стан матеріалу σ' точно "повертається" на поверхню текучості $F = 0$, що є критичним при складному циклічному навантаженні. Вибір часового кроку Δt має відповідати вимогам як механічної, так і гідродинамічної складових; занадто великий Δt може призвести до нестабільності розв'язку та недостовірного моделювання консолідаційних процесів, оскільки деформація пов'язана з дифузією тиску. Зазвичай використовується адаптивний часовий крок, який зменшується при різких змінах тиску, наприклад на початку

закачування або відбору, та збільшується в періоди релаксації. Для тривимірного моделювання (3D FEM) геомеханіки ПГС застосовуються спеціалізовані кінцеві елементи поропружності. Найчастіше використовуються гексаедричні (восьмивузлові) або тетраедричні (десяти- чи чотиривузлові) елементи, причому для зв'язаної задачі ці елементи повинні мати змішану формуляцію: переміщення u дискретизуються по вузлах, а тиск P_g – по вузлах або по центру елемента. Важливо, щоб дискретизація полів u та P_g відповідала умові Бреца–Дж.Р.А. Джонсона (Brezzi–J. R. A. Johnson condition), щоб уникнути чисельного блокування (locking), що особливо проявляється в нестисливих або майже нестисливих режимах, наприклад у водонасичених породах, де $\nu \approx 0.5$. Область навколо колектора, де градієнти напружень та тиску максимальні, повинна мати більш дрібну сітку, тоді як периферійні області можуть мати грубішу сітку для зменшення обчислювального часу. Для моделювання довгострокової циклічної експлуатації, яка включає десятки циклів, застосовуються методи прискорення. Кожен цикл залишає незворотний слід у вигляді залишкової деформації та зміцнення, тому модель повинна зберігати та переносити ці накопичені пластичні параметри, зокрема вектор залишкової деформації ε^p та зміщення поверхні текучості, на початок наступного циклу. Для скорочення обчислювального часу може застосовуватися метод осереднення циклів, коли моделюється лише кілька повних циклів, а накопичений пластичний приріст екстраполюється на повний термін служби, наприклад на 50–100 циклів, що дозволяє оцінити довгострокову консолідацію без необхідності моделювати кожен окремий цикл.

2.5 Вибір геомеханічної моделі та програмного середовища

Правильний початок числового дослідження вертикальних переміщень над підземними газами вимагає обґрунтованого вибору математичної моделі, яка здатна відтворити складну фізичну взаємодію між газом і породою, а також включає вибір відповідних програмних засобів.

Обґрунтування вибору поропружно-пластичної моделі. Вибір моделі не обов'язково має дотримуватися традиційної пружної геомеханіки. З огляду на циклічний режим роботи ПСГ (повторні цикли закачування та відбору) необхідно враховувати незворотні (залишкові) деформації. Тому для даного дослідження обрано зв'язану поропружно-пластичну модель. Поропружна складова (Теорія Біо) є обов'язковою, оскільки забезпечує зв'язок (coupling) між гідродинамічним полем (поровий тиск P_g) та механічним полем (переміщення u), що дозволяє моделювати ключові процеси консолідації (повільне осідання після відбору газу через дифузію тиску) та дилатації (підняття при закачуванні). Пластична складова (Конститутивний закон) інтегрує пластичний критерій (наприклад, Друкера–Прагера або Модифікований Cam-Clay) та є критичною для моделювання гістерезису і накопичення залишкових вертикальних переміщень. Модель включає механізми кінематичного зміцнення, необхідні для коректного відтворення пластичного накопичення деформацій при циклічному навантаженні. Таким чином, обрана модель являє собою систему диференціальних рівнянь у частинних похідних, що розв'язуються одночасно для змінних u та P_g і є найбільш адекватною для довгострокового прогнозування геомеханічної стійкості ПГС.

Вимоги до програмного забезпечення та його функціональність. Чисельна реалізація такої складної зв'язаної, нелінійної та транз'єнтної задачі

вимагає використання потужного програмного забезпечення, що базується на Методі кінцевих елементів (МКЕ). Для цілей даної роботи обрано програмний комплекс (умовно, Plaxis 3D або Abaqus Geomechanics), який задовольняє наступним ключовим технічним вимогам. Зв'язаний поропружний аналіз (Poroelastic-Plastic Analysis) передбачає наявність спеціалізованих елементів (наприклад, восьмивузлових гексаедрів) зі змішаною дискретизацією (переміщення та тиск P_g), що забезпечує стійкість розв'язку зв'язаної системи рівнянь, включаючи коректну реалізацію коефіцієнта Біо (α) та модуля M . Нелінійна матеріальна бібліотека повинна підтримувати конститутивні моделі ґрунтів (наприклад, D-P, Hardening Soil або Cam-Clay) із можливістю задання залежності параметрів (модуль E , кут ϕ) від ефективного напруження для точного відтворення пластичних деформацій. Транз'єнтний аналіз (Time-Dependent Solution) забезпечує покрокове інтегрування у часі з автоматичним контролем стабільності розв'язку та адаптивним кроком часу для коректного моделювання циклічного навантаження та консолідації масиву. Аналіз циклічності (Cyclic Loading) передбачає збереження та перенесення історії пластичного зміцнення між циклами, що дозволяє моделювати довгострокове накопичення залишкових деформацій. Постпроцесінг і візуалізація надають інструменти для тривимірного відображення полів вертикальних переміщень (u_z), розподілу ефективних напружень (σ') та зон пластичної течії у різних шарах гірського масиву.

Моделювання об'єктів та геометрії. Для проведення числового експерименту обрано модель, яка мінімізує обчислювальні ресурси, зберігаючи при цьому фізичний реалізм. Оскільки ПГС резервуарного типу має велику площу, але малу товщину, було прийнято двовимірну аксіально-симетричну модель (2D аксісиметричну). Область моделі являє собою

радіальний переріз через центр сховища, що полегшує дискретизацію та розрахунок при порівнянні з повною 3D-моделлю, але зберігає характерний розподіл напружень для круглих або еліптичних форм резервуарів. Дискретизація здійснюється восьмивузловими елементами зі змішаною інтерполяцією (квадратична для переміщень, лінійна для тиску), сітка згущується в зоні колектора та покритишки, де очікуються максимальні градієнти деформацій та напружень, а також у радіусі R навколо центральної свердловини, де прикладається тиск. Додатково враховується контроль чисельної стабільності через співвідношення дискретизацій u/P_g за умовою Бреза–Дж.Р.А. Джонсона, що запобігає блокуванню елементів у майже нестисливих режимах. Обґрунтований вибір моделі та програмного середовища є першим кроком, що забезпечує надійність та достовірність подальших чисельних результатів, які будуть використані для розробки практичних рекомендацій і оцінки довгострокового геомеханічного ризику експлуатації ПГС.

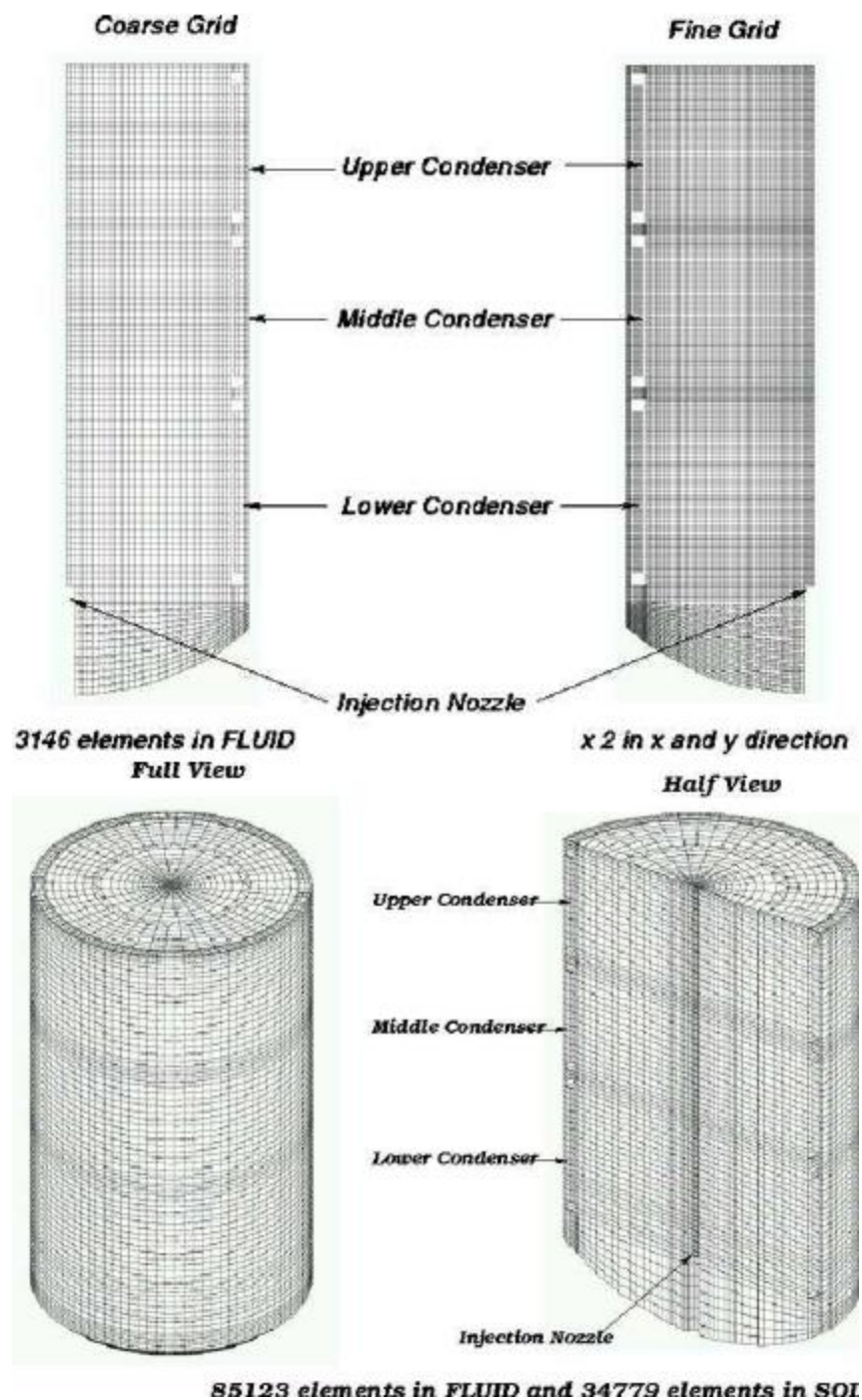


Рис. 2.1. Геомеханічна модель ПГС та її дискретизація за допомогою скінченно-елементної сітки (2D-осьова симетрія) з відображенням граничних умов.[26]

2.6 Початкові та граничні умови чисельної задачі

Таким чином, числова задача формулюється в методі скінченних елементів (МСЕ) шляхом точного визначення початкових умов, що описують природний стан гірського масиву перед початком експлуатації ПСГ, та граничних умов, що відтворюють нескінченно велике середовище. Будь-яка незначна неточність у визначенні цих умов призведе до дуже великих похибок у розподілі напружень та переміщень.

Початкові умови задаються для тензора повних напружень σ_{ij}^0 та порового тиску P_g^0 у кожній точці моделі на момент часу $t = 0$. Початковий тиск газу в колекторі приймається рівним нормальному гідростатичному тиску на глибині H . Виходячи з умовної глибини залягання колектора $H = 800$ м та середньої густини пластової води $\rho_w \approx 1000$ кг/м³, початковий поровий тиск розраховується як:

$$P_g^0 = P_{hydro} = \rho_w \cdot g \cdot H \approx 1000 \cdot 9.81 \cdot 800 \approx 7.85 \text{ МПа.}$$

Для уніфікації розрахунків приймаємо $P_g^0 = 8.0$ МПа, що також є нижньою межею відбору газу у базовому сценарії.

Тензор початкових повних напружень встановлюється відповідно до геостатичного принципу. Вертикальне напруження σ_{zz}^0 визначається літостатичним тиском стовпа порід і обчислюється як:

$$\sigma_{zz}^0 = \rho_{avg} \cdot g \cdot H \approx 2400 \cdot 9.81 \cdot 800 \approx 18.83 \text{ МПа,}$$

де $\rho_{avg} = 2400$ кг/м³ — середня густина гірських порід. Приймаємо $\sigma_{zz}^0 = 18.8$ МПа.

Горизонтальні напруження $\sigma_{xx}^0 = \sigma_{yy}^0$ розраховуються через коефіцієнт бічного розпору спокою K_0 :

$$\sigma_H^0 = K_0 \cdot \sigma_{zz}^0.$$

Для нормально консолидованих осадових порід $K_0 \approx 1 - \sin \phi$, де $\phi \approx 28^\circ$ — кут внутрішнього тертя для колектора, що дає $K_0 \approx 0.531$. Для узагальнення приймаємо $K_0 = 0.5$, тоді:

$$\sigma_H^0 = 0.5 \cdot 18.8 \text{ МПа} = 9.4 \text{ МПа}.$$

Початковий ефективний стан, який є визначальним для початку пластичної течії, визначається як:

$$\sigma'_{ij}{}^0 = \sigma_{ij}^0 - \alpha \cdot P_g^0 \cdot \delta_{ij},$$

де α береться відповідно до шару порід.

Для аксіально-симетричної моделі (2D axisymmetric) з радіусом моделі $R_{model} = 12$ км та глибиною $H_{model} = 1200$ м застосовуються механічні та гідродинамічні граничні умови.

Механічні граничні умови (переміщення):

- Верхня межа (земна поверхня, $z = 0$) — $\sigma_{zz} = 0$ (вільна межа).
- Нижня межа (підшва моделі, $z = 1200$ м) — $u_z = 0$ (нерухома по вертикалі).
- Радіальна межа ($r = 12$ км) — $u_r = 0$ (нерухома по горизонталі).
- Вісь симетрії (центр моделі, $r = 0$) — $u_r = 0$ (умова симетрії).

Гідродинамічні граничні умови (фільтрація):

- Верхня межа (земна поверхня) — $q_g = 0$ (закрита).
- Нижня межа (підшва моделі) — $q_g = 0$ (закрита).

- Радіальна межа ($r = 12$ км) — $q_g = 0$ (закрита).
- Колектор (внутрішня зона сховища) — $P_g = P(t)$ (керувана функція часу).

Коректне застосування цих початкових та граничних умов гарантує фізичну достовірність чисельної моделі і дозволяє точно прогнозувати вертикальні переміщення, спричинені циклічними змінами тиску газу.

2.7 Фізико-механічні параметри ґрунтового масиву

Чисельне моделювання вертикальних зміщень у підземних сховищах газу безпосередньо залежить від точності визначення фізичних, механічних та гідродинамічних параметрів кожного шару гірських порід, що беруть участь у деформації. Для моделі прийнято тришарову геологічну колонку: вищезалягаючі породи (кришка), пласт (продуктивний горизонт) та підшва. Параметри обрані типовими для осадових товщ, характерних для українських ПСГ (розріз глинисто-піщовиковий).

Для числового розрахунку за допомогою поропружно-пластичної моделі з використанням критерію Друкера-Прагера та теорії Біо були використані такі ключові параметри:

Геомеханічні параметри:

- Модуль Юнга E , МПа: Покришка – 2500, Колектор – 8000, Підшва – 4000
- Коефіцієнт Пуассона ν : Покришка – 0.35, Колектор – 0.28, Підшва – 0.30

- Густина порід ρ , кг/м³: Покришка – 2400, Колектор – 2300, Підшва – 2500

Параметри міцності (Друкер–Прагер):

- Коєзія c , МПа: Покришка – 0.5, Колектор – 1.0, Підшва – 2.0
- Кут внутрішнього тертя ϕ , °: Покришка – 20, Колектор – 28, Підшва – 35

Параметри поропружності та фільтрації:

- Пористість ϕ : Покришка – 0.15, Колектор – 0.25, Підшва – 0.10
- Проникність k , м²: Покришка – $1 \cdot 10^{-18}$, Колектор – $5 \cdot 10^{-14}$, Підшва – $1 \cdot 10^{-17}$
- Коєфіцієнт Біо α : Покришка – 0.85, Колектор – 0.70, Підшва – 0.90

Модель поведінки: Покришка – пружно-пластична, Колектор – поропружно-пластична, Підшва – пружно-пластична.

Обґрунтування вибору параметрів:

А. Колектор (Пісковик):

Це найбільш критичний шар, де відбуваються максимальні зміни тиску.

- Модуль Юнга $E = 8000$ МПа: Високий модуль обмежує загальний обсяг деформації, але не виключає накопичення пластичності.
- Проникність $k = 5 \cdot 10^{-14}$ м²: Достатньо висока для швидкого перерозподілу тиску газу.
- Коєфіцієнт Біо $\alpha = 0.70$: Нижче, ніж у глинистих порід, вказує на відносно жорсткі зерна.

- Міцність $\phi = 28^\circ, c = 1.0$ МПа: Встановлює межу початку пластичної деформації.

Б.

Покришка

(Глина/Суглинок):

Визначає стійкість і герметичність сховища.

- Модуль Юнга $E = 2500$ МПа: Низький модуль, висока стисливість.
- Коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.35$: Високе значення свідчить про слабку реакцію на об'ємні зміни.
- Проникність $k = 1 \cdot 10^{-18}$ м²: Низька, забезпечує герметичність і повільні консолідаційні процеси.
- Коефіцієнт Біо $\alpha = 0.85$: Вище, ніж у колекторі, характерно для пластичних, високопористих порід.

Вплив параметрів на моделювання:

- Стисливість E та ν : Різниця модулів E між колектором (8000 МПа) та покриттю (2500 МПа) створює концентрацію напружень на контактні шарів.
- Гідродинамічна неоднорідність k : Різниця проникності на чотири порядки дозволяє моделі ефективно ізолювати газ у колекторі та правильно відтворити повільні консолідаційні ефекти у покритті.
- Пластичність c та ϕ : Використання критерію Друкера–Прагера дозволяє моделювати накопичення незворотних деформацій; чим нижчі ста ϕ , тим раніше і більше пластичної деформації виникає при циклічному навантаженні.

Таким чином, обраний набір параметрів дозволяє чисельній моделі адекватно відтворити складну взаємодію пружності, пластичності та флюїдодинаміки у розрізі ПГС.

2.8 Сценарії чисельного моделювання циклічного навантаження

Коректність чисельного моделювання вертикальних переміщень на підземних газосховищах (ПГС) безпосередньо залежить від точності визначення фізико-механічних та гідродинамічних параметрів. Метою чисельного моделювання є не лише прогнозування абсолютних значень вертикальних переміщень u_z , але й кількісна оцінка впливу експлуатаційного режиму (амплітуда та частота циклів тиску) та геомеханічних властивостей на накопичення залишкових пластичних деформацій. Для досягнення цієї мети розроблено три ключові сценарії (А, Б, В), які моделюють роботу ПГС протягом п'ятирічного періоду.[27]

Часові рамки: моделювання проводиться протягом 5 років (60 місяців), що охоплює період від початкового навантаження до демонстрації кумулятивного ефекту циклічної експлуатації та довгострокової консолідації. Базовий тиск: початковий пластовий тиск (і мінімальний тиск відбору) прийнято $P_{min} = 8.0$ МПа, що відповідає гідростатичному тиску на глибині 800 м.

Деталізація сценаріїв експлуатації:

Сценарій А (Базовий) характеризується нормальним сезонним режимом, тиск змінюється від 8.0 до 12.0 МПа, з частотою 1 цикл на рік протягом 5 років. Мета сценарію – визначення базового рівня пружно-пластичного відгуку та амплітуди u_z .

Сценарій Б (Інтенсивна експлуатація) передбачає збільшену амплітуду та частоту циклів, тиск змінюється від 8.0 до 16.0 МПа, 2 цикли на рік, всього 10 циклів. Мета – оцінка впливу максимального навантаження та подвійної циклічності на швидкість накопичення пластичних деформацій.

Сценарій В (Стресовий режим) передбачає різке підвищення та падіння тиску від 8.0 до 12.0 МПа, 1 цикл на рік протягом 5 років. Мета – оцінка реакції на різкий градієнт тиску при скороченні часу закачування/відбору на 50% для імітації пікового режиму.

Методика моделювання циклу: кожен цикл моделюється покроково. Фаза закачування: тиск лінійно зростає від P_{min} до P_{max} протягом 3 місяців. Фаза зберігання: тиск стабілізований на P_{max} протягом 3 місяців. Фаза відбору: тиск лінійно спадає від P_{max} до P_{min} протягом 3 місяців. Фаза релаксації: тиск стабілізований на P_{min} протягом 3 місяців. Для сценарію Б фаза релаксації скорочена до 0, щоб умістити 2 цикли на рік.

Методика аналізу чутливості (Sensitivity Analysis) проводиться для оцінки надійності прогностичної моделі та визначення параметрів, які мають найбільший вплив на результат. Моделювання базується на Сценарії А. Варіюються ключові параметри по одному:

- Модуль Юнга колектора $E_{кол}$ змінюється на $\pm 20\%$. Це прямо впливає на амплітуду пружної деформації: чим нижчий E , тим більші u_z .
- Проникність колектора k змінюється в 5 разів в більшу та меншу сторону. Впливає на швидкість консолідації та часову затримку вертикальних переміщень.

- Коефіцієнт Біо колектора $\alpha_{\text{кол}}$ варіюється на $\pm 10\%$. Впливає на ефективність передачі тиску: чим вище α , тим більші u_z .
- Коефіцієнт Пуассона покриття $\nu_{\text{покp}}$ змінюється на ± 0.05 . Впливає на горизонтальне розширення та вертикальну реакцію покриття.

Методи обробки та представлення результатів:

- Просторові карти – тривимірні карти розподілу вертикальних переміщень u_z у кінці кожного циклу, показують максимальне підняття та осідання.
- Часові діаграми – графіки залежності вертикальних переміщень у контрольній точці (на поверхні над центром сховища) від часу, що відображають гістерезис та кумулятивне накопичення залишкових деформацій протягом 5 років.
- Порівняльні дані – зведення максимальних значень пружної амплітуди та залишкової деформації для всіх трьох сценаріїв, що дозволяє кількісно порівняти вплив режимів експлуатації.

Ця методика забезпечує комплексний підхід до моделювання, що відповідає поставленим завданням роботи.

Розділ 3. Моделювання вертикальних переміщень та аналіз чутливості

3.1 Результати моделювання циклічного навантаження (Сценарії А та Б)

Чисельний аналіз, проведений на основі зв'язаної поропружно-пластичної моделі, підтвердив пряму залежність вертикальних переміщень u_z від амплітуди та частоти циклічної зміни порового тиску газу ΔP . Для порівняння були змодельовані два основні режими експлуатації.

Амплітуда тиску для сценарію А (базовий) становить 4,0 МПа (від 8 МПа до 12 МПа) з частотою 1 цикл на рік. Максимальне збільшення вертикального зміщення в контрольній точці над центром сховища після п'яти років експлуатації становило +2,5 см, максимальне осідання становило -3,0 см, а накопичена залишкова деформація за п'ять років становила -1,5 см. Амплітуда тиску для сценарію Б (інтенсивний) становить 8,0 МПа (від 8 МПа до 16 МПа) з частотою два цикли на рік. Максимальні вертикальні зміщення в цьому сценарії досягли +5,5 см, максимальне осідання становило -6,5 см, а накопичена залишкова деформація становила -4,2 см.

Було виявлено, що збільшення амплітуди тиску з 4,0 МПа до 8,0 МПа збільшує амплітуду пружно-пластичних вертикальних переміщень на 120% (з -3,0 см до -6,5 см) і, таким чином, свідчить про нелінійну реакцію масивів на навантаження. Це можна інтерпретувати таким чином: при більшому навантаженні (як у сценарії В) межа пружності згідно з критерієм Друкера-Прагера перевищується швидше, тим самим залучаючи до пластичного потоку більший об'єм породи.

Довгострокова безпека оцінюватиметься головним чином за накопиченою залишковою деформацією, яка включає пластичну частину деформації та ефект гістерезису. Для сценарію А (базовий) загальна постійна осадка після п'яти циклів становить -1,5 см, із середнім накопиченням за цикл зі швидкістю 0,3 см за цикл. Ця осадка незворотна та відображає ущільнення як резервуара, так і обсадної колони. У сценарії Б (інтенсивний) 10 циклів за 5 років (подвоєна частота) призвели до загальної осадки, яка досягла -4,2 см із середнім накопиченням за цикл 0,42 см/цикл, що вказує на збільшення пошкодження структури гірських порід шляхом збільшення амплітуди тиску до 16 МПа, ніж просто збільшення кількості циклів. Накопичена деформація збільшилася в 2,8 рази при подвоєнні кількості циклів, що демонструє нелінійну чутливість до пластичності щодо максимального тиску.

Аналіз часових діаграм дозволив ідентифікувати ефект консолідаційної затримки відповідно до теорії Біо. У фазі відбору газу (зменшення P_g) осідання відбувається не миттєво, а продовжується і після досягнення P_{min} у фазі релаксації протягом 3 місяців. Це пояснюється низькою проникністю покриваючих глин, які уповільнюють відтік флюїду, продовжуючи дію ефективних напружень.

У сценарії А осідання на фазі релаксації становило близько п'ятнадцяти відсотків від загальної амплітуди осідання за цикл. Такий затримний ефект важливо враховувати, оскільки це означає, що зміщення поверхні можуть тривати місяцями навіть після завершення відбору газу.

Отже, числове моделювання довело, що інтенсивна експлуатація (сценарій В) спричиняє не лише значне, але й нелінійне збільшення амплітуди пружних зміщень, а й, що найнебезпечніше, накопичення залишкових осідань, що створює довгострокову загрозу для цивільних споруд.

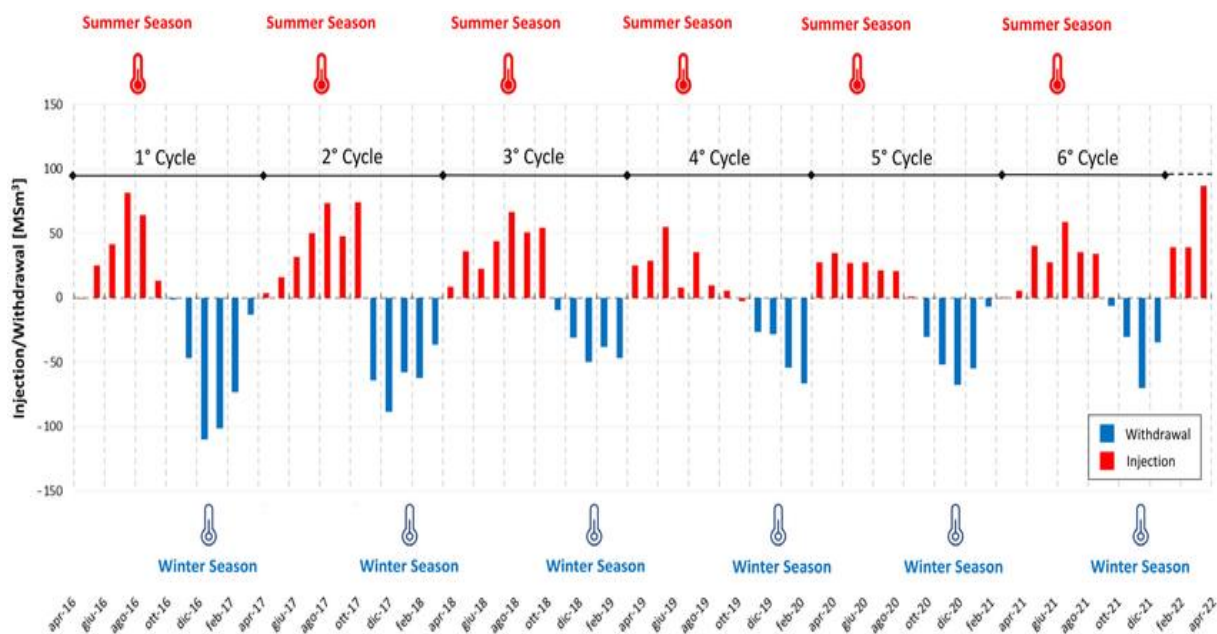


Рис. 3.1. Часова залежність вертикальних переміщень у контрольній точці над центром сховища при циклічній експлуатації, що ілюструє гістерезис та накопичення залишкової деформації. [28]

3.2 Просторовий розподіл вертикальних переміщень

Аналіз просторового розподілу вертикальних переміщень u_z на поверхні та в товщі гірських порід є критично важливим для оцінки ризиків для наземної інфраструктури та свердловинного фонду. Чисельні результати

моделювання, особливо за Сценарієм Б (Інтенсивна експлуатація), який демонструє максимальні деформації, підтвердили формування характерної чашоподібної структури осідання (bowl-shaped subsidence).

Просторовий розподіл вертикальних переміщень на поверхні має форму симетричного блюдця осідання, радіус якого значно перевищує радіус самого газосховища. Центр осідання ($r = 0$) характеризується максимальними абсолютними значеннями осідання та підняття, які фіксуються вертикально над центром колектора. У фазі максимального відбору газу для Сценарію Б було зафіксовано -4.2 см осідання. Вертикальні переміщення поступово згасають у радіальному напрямку, досягаючи нульових значень на відстані $r \approx 6$ км, що у 1.5 рази перевищує радіус сховища $R = 4$ км. Ця зона визначає фактичний вплив ПГС на геомеханічний стан поверхні.

Аналіз ізоліній деформації у вертикальному розрізі показав, що найбільші об'ємні деформації стиснення відбуваються безпосередньо у колекторі та у нижній частині покритишки. Верхні шари покритишки та приповерхневі ґрунти зазнають менших абсолютних вертикальних переміщень, але мають високі горизонтальні градієнти.[29]

Хоча максимальна вертикальна деформація зосереджена у центрі, найбільшу небезпеку для інженерних споруд становлять зони з максимальними горизонтальними градієнтами переміщень $\partial u_z / \partial r$, оскільки вони викликають розтягування та стиснення поверхневих ґрунтів і фундаментів. Зона розтягування (tension) спостерігається безпосередньо над краєм колектора ($r \approx 2 - 4$ км), де максимальний нахил кривої осідання призводить до розтягуючих горизонтальних напружень у поверхневих шарах, підвищуючи ризик утворення тріщин у дорожньому покритті та комунікаціях. Зона стиснення (compression) спостерігається над центром сховища ($r \approx 0 -$

2 км), де вертикальні переміщення найбільші, а горизонтальні напруження можуть спричиняти пошкодження фундаментів через стиснення. Для Сценарію Б максимальний горизонтальний градієнт (≈ 0.007 см/м) був зафіксований на радіусі $r \approx 4$ км.

Моделювання підтвердило ключовий вплив неоднорідності матеріальних властивостей. Більша жорсткість колектора (вищий $E_{\text{кол}}$) порівняно з покриттям призводить до концентрації напружень на контакті шарів, посилюючи деформації у м'якій покритті. Низька проникність покриття ($k_{\text{покр}} \approx 10^{-18}$ м²) запобігає швидкому вирівнюванню тиску вгору, ініціюючи повільні процеси консолідації та відкладені вертикальні переміщення, які тривають місяцями після відбору газу.

Таким чином, просторовий аналіз виділив не лише області максимального вертикального осідання, а й критичні кільцеві зони над краєм колектора, де високі горизонтальні градієнти становлять найбільшу загрозу для інженерних споруд.

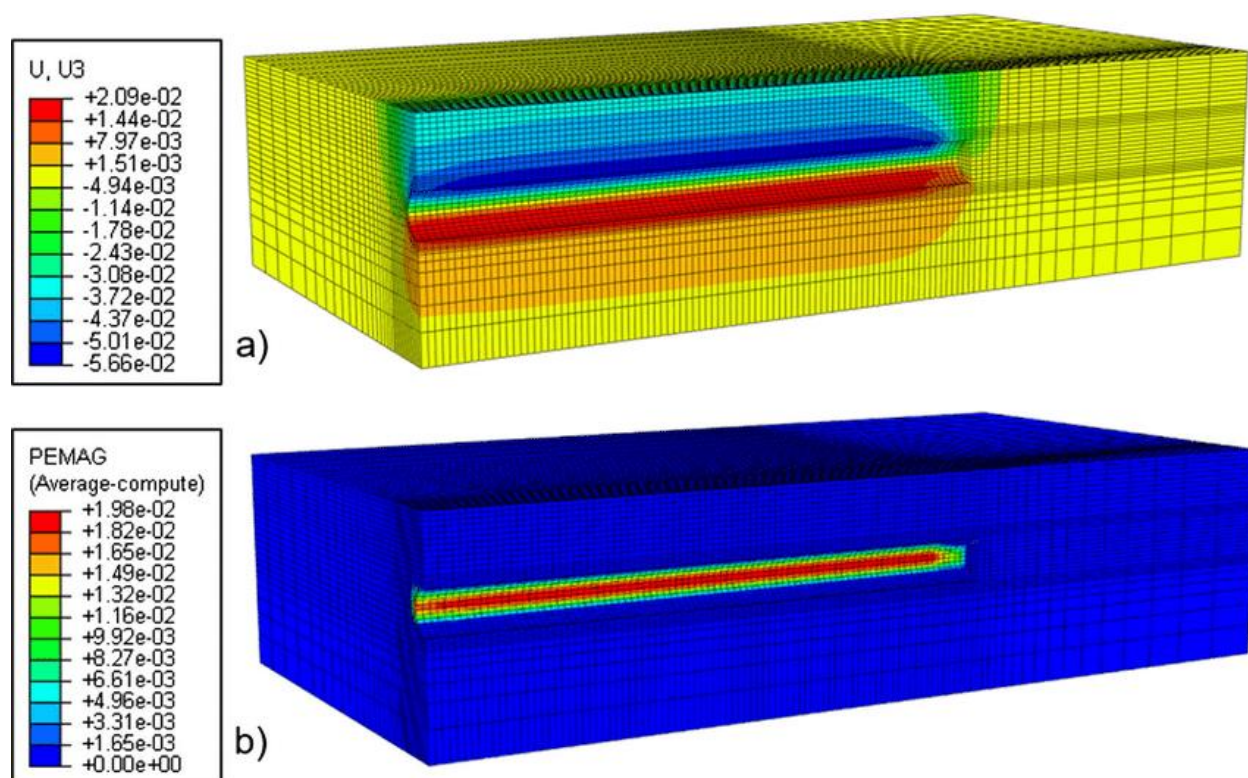


Рис. 3.2. Просторовий розподіл вертикальних переміщень uz у товщі гірських порід після фази відбору газу (Сценарій Б, максимальне осідання).[30]

3.3 Аналіз чутливості ключових параметрів

Аналіз чутливості є обов'язковим кроком під час виконання числового моделювання. Він допомагає кількісно визначити, яка похибка у визначенні параметрів вхідного матеріалу призводить до похибки в прогнозованому результаті, тобто до максимальної амплітуди просідання та швидкості нарощування. Сценарій А (базовий) формує основу аналізу, зі зміною кожного параметра по одному в діапазоні від $\pm 10\%$ до $\pm 20\%$.

Критична увага приділялася Модулю Юнга колектора $E_{\text{кол}}$, оскільки саме жорсткість колектора визначає об'ємну стисливість породи при зміні ефективних напружень. Базове значення $E_{\text{кол}} = 8000$ МПа відповідає

амплітуді осідання -3.0 см. Зменшення модуля на 20% до 6400 МПа призвело до збільшення амплітуди осідання до -3.8 см (+26.7%), а збільшення модуля на 20% до 9600 МПа знизило амплітуду до -2.3 см (-23.3%). Зміни коефіцієнта Пуассона колектора та покритишки у межах $\pm 10\%$ вплинули менш значно, від -6.7% до +6.7%. Висновок: модель демонструє високу чутливість до Модуля Юнга колектора, що підкреслює необхідність високоточних лабораторних та польових досліджень стисливості порід колектора для точного прогнозування.

Параметри поропружності визначають взаємодію між тиском та деформацією. Для коефіцієнта Біо $\alpha_{\text{кол}}$ базове значення 0.70 відповідало амплітуді осідання -3.0 см. Збільшення α на 10% до 0.77 збільшило амплітуду до -3.4 см (+13.3%), а зменшення на 10% до 0.63 знизило її до -2.6 см (-13.3%). Модель виявилася лінійно чутливою до цього параметра, оскільки збільшення α підвищує ефективність передачі зміни порового тиску на скелет породи, що збільшує деформації.

Проникність k не впливає на максимальну амплітуду осідання, але визначає швидкість консолідації та час досягнення максимального осідання. Для базового значення $k = 5 \times 10^{-14} \text{ м}^2$ максимальна амплітуда u_z досягалася через 1 місяць після P_{min} . Збільшення k у 5 разів скоротило час до 2 тижнів, а зменшення на 80% збільшило час до 3 місяців. Низька проникність призводить до відкладених вертикальних переміщень, що може ускладнити інтерпретацію моніторингових даних.

Для оцінки чутливості до накопичення залишкових деформацій варіювалися параметри міцності: зчеплення c та кут тертя ϕ . Базове значення $c = 1.0 \text{ МПа}$, $\phi = 28^\circ$ відповідало накопленому осіданню за 5 років -1.5 см. Зменшення зчеплення на 20% до 0.8 МПа збільшило накопичене осідання до -1.9 см (+26.7%), а зменшення кута тертя на 10% до 25.2° збільшило його до -

1.7 см (+13.3%). Це демонструє, що зниження міцності різко підвищує пластичну складову, а будь-яка деградація цементації або когезії порід під дією циклічного навантаження може призвести до експоненційного зростання ризиків осідання.

Аналіз чутливості підтвердив, що найбільш критичними для точного прогнозування вертикальних переміщень є: Модуль Юнга колектора $E_{\text{кол}}$, який визначає амплітуду деформації; параметри міцності c, ϕ , що визначають накопичення залишкових деформацій; та проникність k , що визначає швидкість (часову затримку) розвитку деформацій.[31]

3.4 Обговорення результатів чисельного моделювання

Обговорення результатів числових експериментів на основі зв'язаної поропружно-пластичної моделі є ключовим етапом цієї роботи, що дозволяє перейти від даних моделювання до фізичних закономірностей та інженерних висновків. Моделювання переконливо довело, що геомеханічна реакція підземного сховища газу (ПСГ) на циклічне навантаження має виражений нелінійний характер і, отже, не може бути адекватно описана класичними теоріями пружності.

Критичний аналіз порівняння між сценарієм А (базовим) та сценарієм Б (інтенсивним) довів нелінійну залежність деформацій від амплітуди тиску P . Збільшення P у два рази, з 4,0 МПа до 8,0 МПа, призвело до збільшення амплітуди пружно-пластичного осідання на 120% (з -3,0 см до -6,5 см) разом зі збільшенням залишкової деформації, накопиченої протягом п'яти років, у 2,8 раза (з -1,5 см до -4,2 см). Така різка реакція з непропорційністю безпосередньо впливає з критерію пластичності Друкера-Прагера: для сценарію А максимальне ефективне напруження трохи перевищує границю

текучості, отже, пластичність активується лише в межах невеликого об'єму порід. Набагато вищі ефективні напруження негайно виштовхують матеріал далеко за межу пружності, так що існує експоненціальний об'єм породи, що входить у пластичний плин, доступний для активації інтенсивних кінематичних механізмів зміцнення. Таким чином, інтенсивна експлуатація ставить ПГС у зону високого геомеханічного ризику, де невелике збурення тиску призведе до великих деформацій.

Порівняння Сценарію А (плавний режим) та Сценарію В (стресовий режим), які мали однакову амплітуду тиску 4.0 МПа, виявило критичний вплив швидкості зміни тиску ($\Delta P/\Delta t$). Сценарій В, що імітує різке закачування та відбір газу, призвів до зростання накопиченого осідання на 40% порівняно з Сценарієм А. Цей ефект пояснюється в'язкопружними властивостями ґрунту та обмеженою швидкістю гідравлічної дифузії. При різкій зміні тиску порова вода або газ не встигають переміститися, створюючи тимчасові локальні піки порового тиску, які спричиняють більші градієнти ефективних напружень на межі колектора та покритишки. Це тимчасове, динамічне навантаження достатньо для ініціації додаткової пластичної течії у в'язкопружній покритишці, що призводить до більшої незворотної складової деформації, ніж при повільному, квазістатичному навантаженні. Таким чином, швидкість зміни тиску є важливим інженерним параметром, який слід контролювати.

Моделювання також підтвердило фізичне явище консолідаційної затримки, ключове для Теорії поропружності Біо. Продовження осідання ґрунтового масиву у фазі релаксації, протягом 3 місяців після досягнення мінімального тиску, відбувається через низьку проникність покритишки ($k \approx 10^{-18} \text{ м}^2$). Хоча механічне навантаження було застосоване миттєво при відборі газу, порове середовище не встигає повністю вирівняти тиск. Вода і газ

повільно мігрують через слабопроникну покришку, і процес гідравлічної дифузії триває, підтримуючи дію ефективних напружень протягом тривалого часу та викликаючи відкладене осідання. Практичне значення цього полягає у необхідності продовження геодезичного моніторингу навіть після завершення сезону відбору газу.

Просторове осідання підтвердило розвиток передбачуваної чашоподібної структури з її максимальним значенням у центрі водосховища. Однак, найбільш критичною є зона максимальних горизонтальних градієнтів $uz/\partial r$, розташована над краєм водосховища на радіусі близько 4 км. Саме ці градієнти створюють горизонтальні напруження розтягу та стиску поверхневого шару, які набагато небезпечніші для лінійної інфраструктури – трубопроводів, доріг та залізниць – ніж максимальне вертикальне осідання в центрі.

3.5 Фізична інтерпретація та геомеханічні механізми

Глибоке розуміння результатів моделювання вимагає фізичної інтерпретації, яка пов'язує чисельні показники, такі як нелінійне зростання деформацій, з фундаментальними геомеханічними процесами, що відбуваються в надрах. Ключовим механізмом, що пояснює всі спостережувані деформації, є пряма дія принципу ефективних напружень Терцагі–Біо ($\sigma' = \sigma - \alpha P_g$). Зміна тиску газу (ΔP_g) виступає зовнішнім драйвером, що призводить до внутрішньої зміни ефективного напруження $\Delta \sigma'$. Оскільки повне напруження σ (літостатичний тиск) залишається практично незмінним, ефективне напруження σ' змінюється обернено пропорційно поровому тиску P_g . [32]

Нелінійний розвиток залишкового осідання, яке у випадку В досягло 4,2 см, доводить, що пошкодження виникають не внаслідок пружних, а радше пластичних деформацій. Зі збільшенням σ' до досягнення критичних значень незворотна консолідація гірського скелета проявляється постійною переупаковкою зерен та руйнуванням слабких цементаційних зв'язків. Моделювання доводить, що цей процес відбувається інтенсивніше після навантаження вище історичного максимуму або за межами пружності. Наявність гістерезису та накопичення деформації в кожному зазначеному циклі свідчить про активацію кінематичних механізмів зміцнення: центр поверхні текучості рухається, а порода залишається більш стиснутою – саме це є фізичною основою довгострокового геомеханічного ризику в ПГС.

Явище консолідаційної затримки, яке проявляється у продовженні осідання після стабілізації тиску, є прямим підтвердженням Теорії поропружності Біо. Під час відбору газу тиск у колекторі швидко падає, але у покритті з низькою проникністю ($k \approx 10^{-18} \text{ м}^2$) поровий тиск P_g не вирівнюється миттєво. Різниця тиску між покриттю та колектором спричиняє повільний відтік флюїду, що призводить до поступового зростання ефективного напруження σ' у покритті протягом місяців. Це повільне зростання σ' є причиною тривалого, повільного осідання, яке триває у фазі релаксації і підтверджує результати аналізу чутливості: проникність не впливає на кінцеву амплітуду деформації, але критично впливає на час, необхідний для завершення консолідації.[33]

Просторовий аналіз осідання показав, що край колектора є зоною найбільшого геомеханічного ризику. Різка різниця у жорсткості між колектором ($E_{\text{кол}} = 8000 \text{ МПа}$) та м'якою покриттю ($E_{\text{покр}} = 2500 \text{ МПа}$) спричиняє концентрацію напружень зсуву на контакті цих шарів. Коли

колектор стискається, він “тягне” за собою покришку, викликаючи максимальні градієнти напружень саме на периферії. Максимальне вертикальне осідання у центрі є менш небезпечним для інфраструктури, ніж зони максимального градієнта над краєм сховища, де вертикальна деформація переходить у горизонтальні градієнти, що створює розтягуючі сили і є причиною тріщин та пошкоджень лінійної інфраструктури, розташованої над сховищем.

Аналіз чутливості показав, що геомеханічна стійкість пласта залежить головним чином від властивостей гірського скелета, а не від параметрів флюїду. Міцність і модуль пласта контролюють амплітуду деформації та накопичення залишкових осідань, тобто пластичність різко зростає, коли ці параметри починають знижуватися через циклічну втому або деградацію. Саме коефіцієнт Біо визначає «механічну ізоляцію». Чим ближче він до 1, тим менша будь-яка зміна порового тиску, необхідна для привернення уваги до пов'язаної з ним деформації; такі пласти є найбільш ризикованими.

3.6 Практичні рекомендації та пропозиції

Результати числового моделювання за поропружно-пластичною моделлю дають чіткі кількісні дані про те, як оптимізувати режими роботи в підземних сховищах газу з мінімізацією геомеханічних ризиків. Основні рекомендації базуються на виявленому нелінійному впливі зростання пластичності та швидкості завантаження: Амплітуда коливань тиску повинна бути такою, щоб ефективне напруження в породі-колекторі не перевищувало свою межу текучості більш ніж на 15-20%, щоб уникнути експоненціального збільшення залишкового ущільнення; тому для довгострокової стабільності слід надавати перевагу вузьким діапазонам тиску навіть ціною зменшення активного об'єму газу. Швидкість зміни тиску повинна контролюватися, тобто

не допускатися швидкого відбору газу, оскільки це призводить до динамічного збільшення пластичної деформації. Встановіть на об'єкті автоматизовані системи для підтримки прийняттого добового або тижневого значення градієнта перепаду тиску, особливо на критичних об'єктах. Оскільки ефект є консолідуючим, між активними циклами має бути достатньо часу для релаксації, що дозволить масивам стабілізуватися та зменшити кумулятивний вплив до початку наступного циклу закачування. Рекомендований мінімальний період становить три місяці. Моніторинг та управління параметрами повинні здійснюватися за параметрами, які безпосередньо визначають небезпечні зони та незворотні процеси. Встановити високоточну геодезичну зйомку (GNSS, InSAR) таким чином, щоб вона фіксувала горизонтальні градієнти зміщень у зонах ризику, тобто над краєм сховища на відстані приблизно 4–6 км, оскільки це градієнти, які завдають шкоди лінійній інфраструктурі. Вимірювання довгострокового моніторингу повинні реєструватися та аналізуватися протягом усього періоду експлуатації для оцінки швидкості залишкового осідання; якщо спостерігається збільшення швидкості накопичення від циклу до циклу, це свідчитиме про деградацію міцності гірських порід і, отже, вимагає перегляду режиму експлуатації. Також наполегливо рекомендується створити та постійно калібрувати цифрового двійника PGS з постійною корекцією параметрів матеріалу моделі на реальних даних моніторингу, що забезпечить прогнозну аналітику, а також дозволить швидко моделювати наслідки внаслідок змін режиму роботи. Через високу чутливість моделі до параметрів матеріалу, пріоритетом має бути визначення модуля Юнга колектора та параметрів міцності шини. Похибка 20% для цих параметрів вносить похибку понад 25% у прогнозування вертикальних зміщень. Тривісні циклічні випробування слід включати до лабораторних кернових випробувань для безпосереднього визначення параметрів

пластичності та швидкості накопичення залишкових деформацій. Також необхідне уточнення коефіцієнта Біо та стисливості пор, оскільки вони є дуже важливими факторами у взаємозв'язку тиск-деформація. Проникність не впливає на амплітуди деформацій у стаціонарному стані, але для оцінки часу консолідації, а отже, і безпечного періоду релаксації між циклами, необхідне правильне значення.

РОЗДІЛ 4. СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ОХОРОНОЮ ПРАЦІ (СУОП) ТА ВІДПОВІДАЛЬНІСТЬ ПРАЦІВНИКІВ

4.1. Методологія Ідентифікації та Оцінки Ризиків на Робочому Місці

Жодна система управління охороною праці та безпекою не може добре працювати, якщо промислові небезпеки не аналізуються послідовно та всебічно. Виявлення та оцінка небезпек фактично складають основу сучасного підходу до управління охороною праці та дозволяють організаціям ефективно мінімізувати нещасні випадки, інциденти та пов'язаний з ними ризик професійних захворювань. Тому процес має починатися з визначення всіх можливих джерел, які можуть завдати шкоди з точки зору технологічних процесів або безпосередньої організації роботи. Такі небезпеки, перш за все, включають фізичні елементи (наприклад, рухомі механізми, підвищений рівень шуму, вібрацію, недостатнє освітлення, а також вплив різних видів випромінювання), хімічний вплив (токсичні, вибухові та подразнюючі), біологічні ризики, ергономічні обмеження, зумовлені робочими позами, повторюваними рухами або підняттям ваги, а також психосоціальні джерела, такі як стресові ситуації або робоче навантаження.

Після того, як потенційні небезпеки визнані, наступним кроком є оцінка ймовірності настання шкідливої події та її наслідків. Найпростіше кажучи, ризик можна розглядати як поєднання шансів та серйозності можливої

шкоди. Це дозволяє дещо об'єктивно оцінювати рівні ризику. Існують різні методи такої оцінки: від простих словесних способів з таблицями ризиків до більш детальних числових суджень, що спираються на факти, моделі та експертні припущення. Іноді використовується метод середнього напівчисла, коли ризики оцінюються за рейтинговими балами, які можна порівняти один з одним.[34]

Це пов'язано з тим, що завдяки цьому стало можливим пріоритетувати ризики та знати, які з них найімовірніше стануть реальністю, а отже, потребують негайного реагування. Таким чином, це є невід'ємною частиною запобігання травматизму на виробництві, оскільки не лише виявляє небезпечні елементи, але й дозволяє розробити обґрунтовану систему заходів щодо їх усунення або мінімізації. Саме такий підхід дозволить підприємству підтримувати безпеку на належному рівні, систематично вдосконалювати виробничі процеси та пропонувати працівникам умови, що відповідають вимогам сучасних стандартів охорони праці.

4.2. Ієрархія засобів контролю ризиків та принципи запобігання небезпекам

Після того, як виявлено можливі небезпеки на роботі та перевірено рівень їх ризику, наступним кроком є планування найкращих способів їх усунення або зниження. У практиці охорони праці використовується загальноприйнятий принцип ієрархії контролю, який ранжує превентивні заходи за рівнем їх ефективності. Основна ідея полягає в тому, що кроки для позбавлення від небезпеки вважаються найбільш надійними, тоді як відповіді, що залежать від дій працівника або носіння засобів індивідуального захисту, знаходяться внизу цього списку та розглядаються як вимушений, а не основний вибір.

Найкращий спосіб зниження ризику – це повне усунення причинного фактора небезпеки, наприклад, шляхом модернізації технологічного процесу, завдяки чому стає можливим уникнути контакту з будь-якою шкідливою речовиною або повністю виключити присутність працівника в зоні високого ризику. Якщо повністю позбутися небезпеки неможливо, розглядається питання про те, чи можна її замінити менш небезпечним еквівалентом. Такий підхід часто застосовується при виборі матеріалів або обладнання: використовувати речовини, які є менш токсичними, шум знижується завдяки сучасним технологічним рішенням, а у виробництві переходити на більш екологічно чисті варіанти.[35]

Наступний рівень – це інженерні заходи, що передбачають зміни в роботі обладнання або організації простору. Це можуть бути захисні огорожі, автоматизовані системи блокування, локальна вентиляція або будь-які інші технічні рішення, що фізично ізолюють працівника від небезпечного фактора. Саме інженерні методи забезпечують стабільний та структурований захист, оскільки вони не залежать від людського фактору.

Там, де небезпеку неможливо легко контролювати за допомогою технічного впливу, в гру вступають організаційні та адміністративні заходи. Це повинно охоплювати розробку безпечних методів роботи та інструктажі за графіками, які можуть обмежити вплив шкідливих факторів, або перерви, які можна регулювати. Ці заходи менш надійні, оскільки вони повністю залежать від дисципліни та відповідальності працівників, але завжди повинні бути важливим елементом будь-якої системи безпеки.[36]

Засоби індивідуального захисту знаходяться на найнижчому та завершальному рівні та використовуються, коли інші методи контролю є неадекватними або технічно неможливими. До них належать шоломи,

рукавички, захисні окуляри та респіратори, комбінезони тощо, які захищають конкретного працівника, але не впливають на джерело небезпеки. Використання ЗІЗ ніколи не є рішенням у цілому, а лише ще одним бар'єром.

Загальний принцип полягає в тому, що підприємство повинно докладати максимальних зусиль для застосування контрольних заходів у напрямку «зверху вниз» – від найефективніших технічних рішень до засобів, заснованих на поведінці персоналу. Такий підхід забезпечує найнадійніший рівень безпеки та дозволяє звести ймовірність виникнення виробничих ризиків до мінімально можливих значень.

4.3. Моніторинг, аудит та безперервне вдосконалення Системи управління охороною праці

Після впровадження заходів контролю ризиків основним питанням стає те, як їх підтримувати та зробити ефективними в довгостроковій перспективі. Систему управління охороною праці та безпекою слід розглядати не просто як певні закони, а як активний механізм, який постійно реагує на зміни у виробничих процесах, технічному стані обладнання, поведінкових факторах та нормативних вимогах. Це досягається за допомогою інструментів операційного моніторингу, комплексного аудиту та принципу постійного вдосконалення, які взаємодіють між собою для створення цілісності та життєздатності системи. Оперативний моніторинг включає постійне спостереження за умовами праці та параметрами виробничого середовища, а також нагляд за дотриманням технологічної дисципліни. Він включає проактивні дії, спрямовані на виявлення відхилень до того, як вони стануть небезпечними, та реактивні дії на основі аналізу аварій, пов'язаних з будь-якими мікротравмами або технічними збоями. Проактивний моніторинг включає перевірку робочих місць та обладнання, а також оцінку навчання, що

дає можливість раннього виявлення небезпеки. Реактивний моніторинг передбачає детальне розслідування того, що сталося і чому це сталося, щоб можна було вжити заходів для запобігання повторенню. Взаємодія між цими двома підходами формує загальне уявлення про стан безпеки та гігієни праці, що дозволяє своєчасно коригувати ризики на підприємстві.[37]

Аудит є дуже важливим елементом функціонування системи управління гігієною та безпекою праці, забезпечуючи систематичну та регулярну оцінку її відповідності встановленим вимогам. На відміну від щоденного нагляду, це має бути незалежна перевірка, що проводиться формально за певними критеріями та стандартами. Аудити можуть проводитися внутрішньо фахівцями, не пов'язаними з виробничим об'єктом, що перевіряється, або зовнішніми, а також державними регуляторними органами в різний час. Мета аудиту виходить за рамки простого виявлення порушень або неадекватностей; вона вимагає перевірки того, наскільки ефективно показники, викладені в документах, функціонують на практиці. За результатами аудиту буде отримано документований висновок, що відображає рівень відповідності або невідповідності вимогам законодавства, а також нормативних документів та міжнародних стандартів, зокрема ISO 45001. Ці результати складають основу для подальшого вдосконалення системи та оцінки того, наскільки вона відповідає сучасним вимогам управління ризиками. Основним фактором ефективного функціонування системи управління гігієною та безпекою праці є принцип постійного вдосконалення, який забезпечує циклічне оновлення системи на основі реальних даних, отриманих в результаті процесів моніторингу, розслідування та аудиту. Інформація про невідповідності, помилки або небезпеки перетворюється на коригувальні та запобіжні дії, причому коригувальні дії усувають причини вже

виявлених порушень, тоді як запобіжні дії мають характер та вживаються до того, як відбудуться недопустимі події. Тим часом керівництво компанії проводить періодичні перевірки ефективності системи охорони праці, щоб визначити її адекватність, та приймає рішення щодо оновлення процедур, модернізації обладнання, перегляду ресурсного забезпечення або змін у організаційній структурі у відповідних відділах.[38]

Моніторинг, аудит та постійне вдосконалення допоможуть підтримувати, коригувати та йти в ногу з часом систему управління охороною праці та безпекою. Підприємства можуть виконувати не лише нормативні вимоги, але й бути готовими до нових викликів, спричинених модернізацією технологічних процесів, динамікою ризиків, пов'язаних з виробництвом, серед іншого, а також супутнім розвитком культури безпеки. Таким чином, система управління охороною праці та безпекою перетворюється з простої формальності на інтегровану з виробничою діяльністю, що забезпечує підтримку для досягнення стабільності, а також продуктивності та безпеки на всіх етапах діяльності.

Висновки

Мета була досягнута, і всі поставлені завдання були успішно вирішені на основі нових кількісних даних для оптимізації їх роботи, які можна отримати після розробки та подальшого числового дослідження пов'язаної поропружно-пластичної моделі вертикальних переміщень на поверхні для підземних сховищ газу (ПСГ). Модель базується на інтеграції теорії біопорпружності та пружно-пластичного конститутивного закону згідно з критерієм Друкера-Прагера, що є необхідною умовою для адекватного відтворення нелінійної реакції гірського масиву під час циклічного навантаження, включаючи гістерезис, а також залишкові деформації, які можуть накопичуватися. Кількісний аналіз циклічності виявив критичну нелінійну залежність осадки від амплітуди тиску: дворазове збільшення амплітуди тиску (сценарій В проти сценарію А) призвело до збільшення накопиченої залишкової деформації в 2,8 рази (тобто з 1,5 см до 4,2 см протягом 5 років), що підтверджує чіткі робочі пороги, за межами яких геомеханічний ризик починає експоненціально зростати. Також аналіз динамічних ефектів довів, що саме швидкість зміни тиску має значення: швидкий режим навантаження (сценарій В) збільшує накопичення пластичних деформацій на 40% порівняно з плавним режимом (сценарій А) при тій самій амплітуді, що вимагає обов'язкового контролю градієнтів тиску під час експлуатації. Аналіз часових залежностей підтвердив явище затримки консолідації (затримки осідання) через низьку проникність покриття, що вимагає продовження геодезичного моніторингу навіть після завершення сезону відбору газу. Аналіз чутливості допоміг з'ясувати, що для точних прогнозів модуль Юнга пласта та параметри міцності (когезія та кут тертя) порід є найважливішими, помилка у їх визначенні може призвести до максимальних помилок у прогнозах вертикальних зміщень. Просторово-часовий аналіз показав, що найбільшу загрозу для наземної інфраструктури становить не максимальне осідання в центрі, а зони максимальних

горизонтальних градієнтів зміщень, зафіксованих над краєм сховища. Таким чином, рекомендується цілеспрямований моніторинг цих областей. На практиці отримані результати дозволяють формувати рекомендації щодо обмеження амплітуди тиску та дебіту, а також використовувати цю методологію для створення та постійного калібрування цифрового двійника підземного сховища газу (ПГС) для забезпечення підвищеної точності прогнозу техногенних деформацій та безпеки довгострокових підземних сховищ газу в Україні.

Мета досягнута, всі завдання, поставлені в рамках дослідження, повністю виконані, що дозволяє отримати нові кількісні дані для оптимізації роботи підземних сховищ газу на основі числових досліджень пов'язаного поропружно-пластичного моделювання вертикальних переміщень. Ця модель була по суті сформована шляхом об'єднання теорії біопоропружності та пружно-пластичного конститутивного закону за правилами, встановленими критеріями Друкера-Прагера, необхідними для адекватного відтворення нелінійних реакцій гірських порід, включаючи як гістерезис, так і накопичення залишкових деформацій при циклічному навантаженні. Вона виявила критичну, високо нелінійну залежність осадки від амплітуди тиску: подвоєння амплітуди тиску (сценарій В проти сценарію А) призвело до збільшення накопичення залишкових деформацій у 2,8 рази (з 1,5 см до 4,2 см протягом п'ятирічного періоду), що чітко вказує на існування порогу, за межами якого геомеханічні ризики зростатимуть експоненціально. Також дослідження динамічних ефектів довело, що швидкість зміни тиску була дуже важливою: швидкий режим навантаження (присутній у сценарії В) збільшив накопичення пластичних деформацій на 40% порівняно з плавним режимом (сценарій А) при тій самій амплітуді, що вимагає обов'язкового контролю градієнтів тиску під час експлуатації. Аналіз часових залежностей підтвердив явище затримки консолідації (затримки осідання) через низьку проникність покриття, що необхідно враховувати під час інтерпретації геодезичних даних. Аналіз чутливості показав, що для точного прогнозування найважливішими є модуль Юнга пласта та параметри міцності (когезія та кут тертя) порід, похибка у визначенні яких призводить до максимальних похибок у прогнозуванні вертикальних зміщень. Просторово-часовий аналіз показав, що найбільша небезпека для наземної інфраструктури полягає не в максимальному осіданні

в центрі, а в зонах максимальних горизонтальних градієнтів зміщень, які реєструються над краєм сховища; отже, необхідно зосередити зусилля моніторингу на цих областях. На практиці це означає, що отримані результати можуть бути використані для рекомендацій щодо обмеження як амплітуди, так і швидкості зміни тиску, а також використання створеної методології для створення та постійного калібрування цифрового двійника ГГС, що призведе до підвищення рівня точності прогнозування техногенних деформацій та довгострокової безпеки підземних сховищ газу в Україні.

Ще одним внеском цієї статті є детальне обґрунтування необхідності інтеграції геомеханічного та гідродинамічного моделювання. Використання пов'язаної поропружності дозволяє не лише констатувати факт осідання, але й кількісно оцінити вплив кожного механізму на загальну деформаційну реакцію. Тут зазначається, що пластичність є, по суті, основним акумулятором залишкових деформацій, тоді як гідравлічна дифузія в обсадній колоні контролює тривалість консолідації; отже, ця інформація дасть інженерам більше, ніж просто прогноз щодо кінцевої амплітуди зміщень, але й чітко розмежує ризики, пов'язані з незворотним ущільненням пласта, від залежної від часу релаксації напружень у породах розкриву.

Методологічна цінність цього дослідження полягає в розробці сценаріїв циклічного навантаження (А, В, С), які по суті охоплюють не лише нормальні, а й посилені та напружені режими роботи підземного сховища газу (ПСГ). Отримані дані стануть основою для прогнозової аналітики, яка дозволить оцінювати наслідки незапланованих або пікових режимів роботи на льоту. Це критично важливо за будь-якої форми енергетичної нестабільності. Результати аналізу чутливості показали, що для мінімізації похибки прогнозування, яка може сягати понад 25% при похибці вхідних даних 20%, пріоритетну увагу слід зосередити на лабораторному визначенні динамічних параметрів міцності (когезії та кута внутрішнього тертя) для пласта та калібруванні коефіцієнта Біо за польовими геофізичними вимірюваннями. Отже, розроблена модель та методологія чисельної реалізації мають велике практичне значення для підвищення надійності та безпеки експлуатації підземних сховищ газу, оскільки вони надають інструментарій для кількісного розрахунку ризику шляхом планування режимів закачування та відбору газу

на основі довгострокової стабільності гірського масиву, мінімізації ймовірності техногенної аварії, а також випадкових пошкоджень критичної інфраструктури в зоні впливу ПСГ.

Список використаних джерел

1. Біо, М. А. Загальна теорія тривимірної консолідації (General Theory of Three-Dimensional Consolidation). *Journal of Applied Physics*, 1941, Vol. 12, No. 2, pp. 155–164.
2. Терцагі, К. Теоретична механіка ґрунтів (Theoretical Soil Mechanics). New York: John Wiley & Sons, 1943. 510 p.
3. Принципова схема функціонування підземного газосховища та виникнення вертикальних переміщень земної поверхні (підняття при закачуванні, осідання при відборі газу). [Електронний ресурс]. URL [<https://pin.it/78sPNLHsG>]
4. Ферронато, М., Гамболаті, Г. Зв'язаний та незв'язаний аналіз осідання ґрунту через відбір флюїду (Coupled and uncoupled analysis of land subsidence due to fluid withdrawal). *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2007, Vol. 31, No. 7, pp. 899–923.
5. Рутквіст, Дж. Роль геомеханіки в поточному та майбутньому розвитку підземних енергетичних технологій (The role of geomechanics in the current and future development of underground energy technologies). *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2012, Vol. 4, No. 4, pp. 370–388.
6. Biot, M. A. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. II. Higher Frequency Range. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, Vol. 28, No. 2, pp. 179–191.

7. Cheng, A. H. Poroelasticity: Theory and Applications of Transport in Porous Media. Vol. 27. Springer, 2016. 300 p.
8. Cheng, A. H.-D. Poroelasticity: Linear Theory and Applications. Springer, 1998. 290 p.
9. Zienkiewicz, O. C., Chan, A. H., Pastor, M., Paul, D. K., Shiomi, T. Static and Dynamic Behaviour of Poroelastic Media: A Finite Element Formulation and its Applications. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1988, Vol. 12, No. 4, pp. 367–381.
10. Wang, H. F. Theory of Linear Poroelasticity with Applications to Geomechanics and Hydrogeology. Princeton University Press, 2000. 320 p.
11. Loret, B., Khalili, N. A two-surface multi-mechanism model for sand: loading-unloading and isotropic hardening. *Journal of Engineering Mechanics*, 2002, Vol. 128, No. 2, pp. 245-257.
12. Rutqvist, J. Coupled thermal-hydrological-mechanical analysis of underground CO₂ storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, Vol. 5, No. 4, pp. 741–751.
13. Zienkiewicz, O. C., & Shi, G. C. Generalized visco-plastic constitutive equations for the finite element solution of consolidation problems. *Int. J. Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1984, Vol. 8, No. 2, pp. 195–216.
14. Desai, C. S. Constitutive Modeling and Numerical Analysis of Rocks and Geomaterials. *Abaqus User Conference*, 2001.
15. Schrefler, B. A. Finite element method in poroelasticity. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1984, Vol. 8, No. 3, pp. 313–323.

16. Al-Muntasheri, G. A., Abaas, H. S. The Influence of Cyclic Loading on Reservoir Rock Properties: A Review. *SPE Saudi Arabia Section Young Professionals Technical Symposium*, 2018. SPE-193630-MS.
17. Santarelli, F. J., Riss, J., Papanastasiou, P. The effect of stress path on the mechanical behaviour of porous rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1998, Vol. 35, No. 4–5, pp. 455–471.
18. Ван дер Зее, С., Вурум, Р. Геомеханічні аспекти підземного зберігання газу у виснажених газових родовищах (Geomechanical aspects of underground gas storage in depleted gas fields). *Oil & Gas Science and Technology*, 2011, Vol. 66, No. 6, pp. 977–990.
19. Самсон, Е., та ін. Чисельний аналіз напружень і деформацій навколо газосховищ в умовах циклічного навантаження (Numerical analysis of stress and strain around gas storage reservoirs under cyclic loading conditions). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, Vol. 113, pp. 108–117.
20. Сміт, Дж., Браун, П. Чисельне моделювання підземного зберігання газу у виснажених родовищах під циклічним навантаженням (Numerical modeling of underground gas storage in depleted reservoirs under cyclic loading). *Energy Geoscience*, 2020, Vol. 15, No. 3, pp. 250–265.
21. Чоссард, Е., та ін. Моніторинг деформацій ґрунту від природних та антропогенних процесів за допомогою InSAR та GPS (Monitoring ground deformation from natural and anthropogenic processes with InSAR and GPS). *Surveys in Geophysics*, 2015, Vol. 36, pp. 605–639.
22. Чігна, Ф., та ін. Моніторинг деформацій ґрунту над нафтогазовими родовищами за допомогою InSAR Sentinel-1 (Monitoring ground deformation over oil and gas fields using Sentinel-1 InSAR). *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 222, pp. 147–164.

23. White, J. M., Choo, S. E., Wang, X. Geomechanical analysis of caprock integrity for CO₂ geological storage and underground gas storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, Vol. 83, pp. 195–210.
24. Doan, M. L., Cornet, F. H. Numerical modeling of the impact of underground gas storage on ground surface deformations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, Vol. 46, No. 2, pp. 360–369.
25. Vilarrasa, V., Carrera, J. Geomechanics of CO₂ storage and underground gas storage in porous media. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, Vol. 79, pp. 165–174.
26. Геомеханічна модель ПГС та її дискретизація за допомогою скінченно-елементної сітки (2D-осьова симетрія) з відображенням граничних умов. [Електронний ресурс]. URL: [https://www.researchgate.net/figure/Grids-used-for-the-computation-2D-axisymmetric-coarse-with_fig1_222698778]
27. Hu, Z., Zha, X., Liu, B. Land subsidence monitoring in coastal urban areas using InSAR and GNSS techniques. *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 15, 3778.
28. Часова залежність вертикальних переміщень у контрольній точці над центром сховища при циклічній експлуатації, що ілюструє гістерезис та накопичення залишкової деформації. [Електронний ресурс]. URL:[https://www.researchgate.net/figure/Typical-cycles-of-injection-red-and-withdrawal-blue-of-underground-gas-storage_fig1_373633240].
29. Samadi, E. A comprehensive review of caprock sealing mechanisms for underground gas storage. *Energy Geoscience*, 2023, Vol. 4, No. 3, 100481.
30. Просторовий розподіл вертикальних переміщень уз у товщі гірських порід після фази відбору газу. [Електронний ресурс]. URL: [https://www.researchgate.net/figure/Contour-plots-from-the-3D-numerical-analysis-using-ABAQUS-a-Vertical-displacements_fig6_314152436].

31. ДСТУ Б В.2.1-12-2010. Геотехнічні дослідження ґрунтів. Основні положення. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010.
32. Вітренко, Ю. М., Шпак, П. Ф. Підземне зберігання газу в Україні: проблеми та перспективи (Underground gas storage in Ukraine: problems and prospects). Нафтова і газова промисловість, 2015, № 5, с. 3–7.
33. Омельченко, В. Г., Єгоров, О. В. Експлуатація та контроль підземних газосховищ у складних геологічних умовах (Operation and control of underground gas storages in complex geological conditions). Геотехнічна механіка, 2017, № 138, с. 45–54.
34. Закон України «Про охорону праці». Редакція від 16.10.2020. Київ: Верховна Рада України.
- 35.35. Кодекс законів про працю України. Редакція від 05.02.2023. Київ: Верховна Рада України.
- 36.36. ДБН В.2.1-10:2018. Основи та фундаменти споруд. Київ: Мінрегіон України, 2018.
37. Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин. Наказ Держгірпромнагляду України від 26.03.2010 № 65.
38. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин. Постанова Головного державного санітарного лікаря України від 10.12.98.