

Описана методика дослідження геомеханічних процесів в соляній камері при закладці твердих відходів содового виробництва шляхом математичного моделювання. Завдяки отриманій моделі, можна прогнозувати зсуви без закладки і з проведенням закладних робіт в підземні порожнини

Ключові слова: геомеханічні процеси, соляна камера, відходи содового виробництва

Описана методика исследования геомеханических процессов в соляной камере при закладке твердых отходов содового производства путем математического моделирования. Благодаря полученной модели, можно прогнозировать оползни без закладки и с проведением закладочных работ в подземные полости

Ключевые слова: геомеханические процессы, соляная камера, отходы содового производства

The method of research of geomechanical processes is described in a hydrochloric chamber at the book-mark of hard wastes of soda production by a mathematical design. Due to the got model it is possible to forecast landslides without a book-mark and with the leadthrough of book-mark works in underground cavities

Keywords: geomechanical processes, hydrochloric chamber, wastes of soda production

ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ НАВКОЛО СОЛЯНОЇ КАМЕРИ ПРИ ЇЇ ЗАКЛАДЦІ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

О. В. Шестопалов

М. А. Цейтлін

Доктор технічних наук, професор*

В. Ф. Райко

Кандидат технічних наук, доцент*

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
ул. Фрунзе, 21, Харків, 61002

Актуальність теми

Найбільш шкідливим і об'ємним відходом виробництва кальцинованої соди аміачним способом є дистилерна суспензія, що утворюється в кількості 8-10 м³ на 1 т соди. Це зумовлено самою технологією, по якій неможливо досягти повного використання сировини. Дистилерна суспензія є розчин хлоридів кальцію і натрію, гідроксиду і сульфату кальцію із загальним масовим вмістом компонентів 15 - 16% [1].

Наразі відходи содового виробництва повністю скидаються в шламонакопичувачі (так звані «білі моря»), що займають сотні гектарів земельних угідь і вимагають для свого будівництва і експлуатації дуже великих капітальних витрат.

Складування в наземних полігонах і скидання рідких відходів в підземні водоносні горизонти не вирішує проблеми і приводить до ще більшого порушення екологічної рівноваги.

В зв'язку з цим, використання підземних порожнин, може знайти широке застосування для вирішення проблеми накопичування відходів содового виробництва внаслідок їх використання в якості тапонажного матеріалу, що, в свою чергу, сприятиме підвищенню стійкості земної поверхні. На підставі цього, авторами був розроблений і запатентований спосіб закладки твердих відходів содового виробництва у соляних камерах [2]. Для оцінки техногенної безпеки зони видобування розсолу було виконане математичне моделювання геомеханічних процесів, які відбуваються навколо соляної камери при її закладці твердими відходами содового виробництва.

Постановка задачі

Відпрацьована і заповнена розсалом соляна камера, розташовується на глибині H від поверхні і має форму

циліндра з діаметром d , і висотою h . Передбачається, що пласт солі відпрацьований на повну потужність. Породи покрівлі і підшви соляного пласта прийняті без деталізації і задані середніми для Артемівського родовища значеннями. Потужність покривних відкладень прийнята 10 м. Завдання вирішується покроково. Кожен крок відповідає закладці матеріалу на $0,25h$. Це дозволяє виявити особливості зміни геомеханічної ситуації в тих породах, що вміщують камеру при її закладці.

Рішення задачі проводиться методом кінцевих елементів [3, 4], реалізація якого відбувається за допомогою програмного комплексу ANSYS. Завдання сформульоване в об'ємній постановці, масштаб моделювання 1:1.

Моделюється ділянка масиву з розмірами 700×700 м, що вміщає вказану камеру. Масив розбивався на об'ємні кінцеві елементи тетрагонів. Через вісесиметричності завдання моделювалася половина перетину.

Загальний вид моделі представлений на рис. 1.

Моделювана ділянка масиву, розбита на кінцеві елементи, представлена на рис. 2.

Завдання вирішується в нелінійній постановці, що пов'язане з наявністю в завданні контактних елементів. Властивості матеріалів підбиралися у відповідності до [5].

При рішенні вводяться наступні властивості досліджуваних геоматеріалів – модуль пружності E (МПа), коефіцієнт Пуасона ν , об'ємна вага ρ кг/м^3 , коефіцієнт тертя між шарами 0,8, контакт між закладним матеріалом і породами прийнятий жорстким і рівним 1.

Властивості матеріалів зведені в табл. 1, у відповідності до [6].

Таблиця 1

Властивості порід і закладних матеріалів прийняті при математичному моделюванні

№ п/п	Найменування матеріалу	Модуль пружності E (ГПа)	Коефіцієнт Пуасона ν	Об'ємна вага, кг/м^3
1	Породи кривлі та підшви	8,25	0,3	2500
2	Покривні відкладення	0,625	0,3	2000
3	Соляний шар	95	0,26	2200
4	Закладний матеріал	9,5	0,3	2650
5	Соляний розчин	-	-	1200

Дія сил гірського тиску в масиві приводить до деформацій порід покрівлі камери, що викликає зсуви земної поверхні над камерою і руйнування безпосередньої покрівлі в самій камері. Наслідки цих процесів можуть виражатися у появі на земній поверхні провалів і воронок обвалення, а також в додаткових зсувах і деформаціях земної поверхні. Ведення закладних робіт істотним чином підвищує стійкість камери і призводить до зниження зсувів земної поверхні, зокрема виключає виникнення провалів над відпрацьованими камерами.

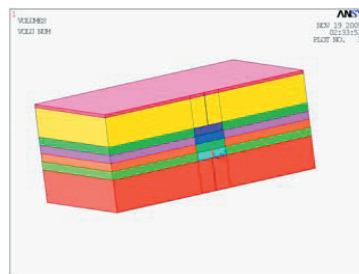


Рис. 1. Загальний вигляд модельованої ділянки масиву



Рис. 2. Модельована ділянка масиву, розбита на кінцеві елементи

Моделювання процесу

Приведене завдання вирішується в два етапи. Метою першого етапу є встановлення закономірностей підвищення стійкості потолочини камери і зменшення зсувів земної поверхні в процесі ведення закладних робіт. Для вирішення цього завдання прийняті характерні умови для розсолотропного родовища. Глибина закладання камери 100 м, камера має циліндрову форму з діаметром 100 м, і заввишки також 100 м. Передбачається, що пласт солі відпрацьований на повну потужність.

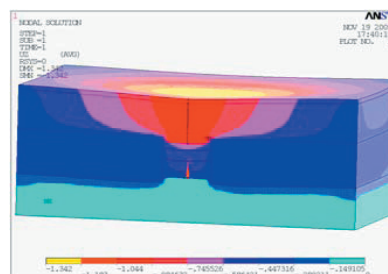


Рис. 3. Картина розподілу вертикальних зсувів в моделі до початку закладки

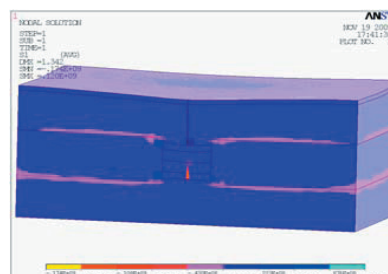


Рис. 4. Картина розподілу напруги, розрахованої по першій теорії міцності, до початку закладки

Картини розподілу вертикальних зсувів і напруги після проведення закладних робіт приведені на рис. 5 та 6 відповідно.

Приведені на рисунках ізополя напруги дають уявлення про якісну сторону процесів, що відбуваються, проте не дозволяють їх оцінити кількісно.

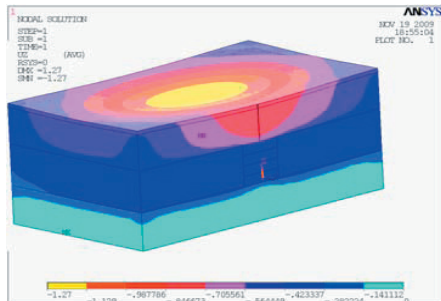


Рис. 5. Картина розподілу вертикальних зсувів в моделі після проведення закладних робіт

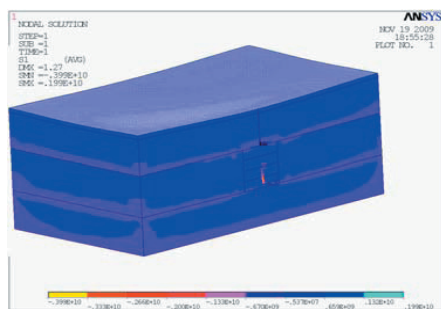


Рис. 6. Картина розподілу напруги, розрахованої по першій теорії міцності, після проведення закладних робіт

Для кількісної оцінки побудуємо графіки розподілу вертикальних зсувів, що реалізуються на рівні умовної осі свердловини циліндрової форми, що проходить через центр підстави, на рівні поверхні (рис. 7 та 8), і поточини свердловини (рис. 9 та 10). Аналіз показує, що область впливу свердловини обмежується зоною в 300 м від її центру, максимальні зсуви при цій базі без проведення закладних робіт складають 0,529 м (ця різниця 1019-490 мм – див. графік), а з проведенням закладки 0,335 м.

На підставі графіків зсувів порід на рівні поточини камери, бачимо, що вони складають 0,655 і 0,09 м відповідно.

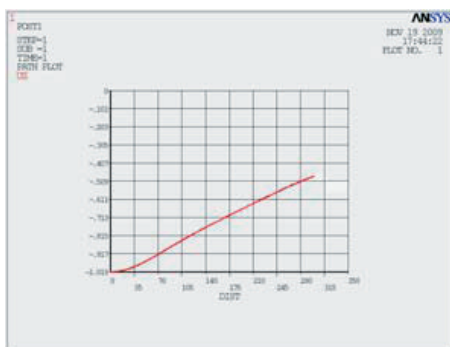


Рис. 7. Графік зсувів земної поверхні без закладки камери

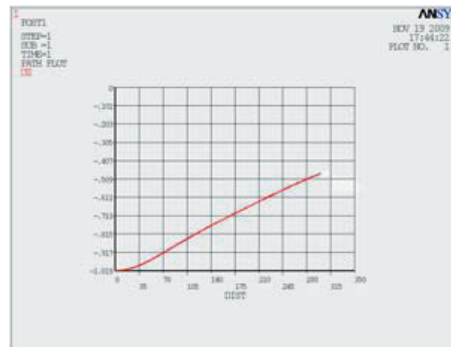


Рис. 8. Графік зсувів земної поверхні після закладки камери

Знаючи, що максимально допустимі (до межі міцності) відносні деформації порід покрівлі знаходяться в діапазоні 0,02-0,03 [9], можемо з упевненістю сказати, що поточина камери в першому випадку руйнуватиметься, оскільки відносні зсуви останньої складають 0,0542. При цьому можливе утворення провалів на поверхні, що обумовлене перевищенням фактичними зсувами величини допустимих відносних деформацій, що приведе до руйнування несучого порідного шару, розвитку тріщин і утворення провалу. Аналіз графіка зсувів земної поверхні показує, що середні по базі 300м відносні деформації складають 0,0017, а отже миттєвого об'ємного провалу не відбудеться, проте шматковий аналіз кривої зсувів показує, що на ділянці 300-280 м від центру підстави циліндра виникають відносні деформації 0,0095, тобто виникає реальна загроза розвитку обвалення порід і просідання земної поверхні.

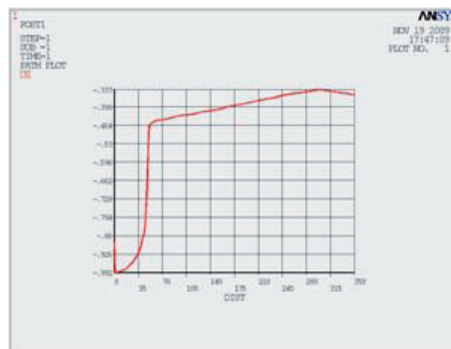


Рис. 9. Графік зсувів земної поверхні після закладки камери

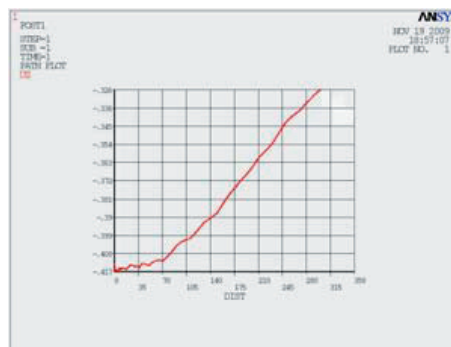


Рис. 10. Графік зсувів порід на рівні поточини камери після закладки

Після проведення закладки на повну потужність шару бачимо, що руйнування поточчини камери не відбувається, оскільки відносні деформації безпосередньої покрівлі 0,0009, що свідчить про те, що породи покрівлі знаходяться в пружній стадії. Небезпеки провалу і розвитку мульди зсуву також не виникає, оскільки за рахунок зниження після закладки на 63% зсувів земної поверхні, відносні деформації в два рази менше граничних. Це дозволяє зі всією упевненістю стверджувати, що провали повністю виключені.

Співвідношення отриманих результатів з [7], показує, що після проведення закладки в зоні впливу камери, з урахуванням коефіцієнта надійності, можна закладати фундаменти виробничих і цивільних одноповерхових і багатоповерхових будівель з повним сталевим каркасом, будівлі і споруди, в конструкціях яких не виникають зусилля від нерівномірних осідань, проміжні прямі опори повітряних ліній електропередачі.

При цьому відповідно до [8], який рекомендує територію підрозділяти на групи залежно від значень деформацій земної поверхні відбувається перехід територій від першої до другої групи, тобто підвищується стійкість земної поверхні і її можна використовувати для будівництва.

Аналіз покрової закладки моделі показав, що перші кроки закладки, аж до моменту її закінчення не надають істотного впливу на стійкість камери, і зсуви земної поверхні, оскільки з погляду геомеханіки закладка приводить до збільшення бічного підпору в камері, але при цьому ця відсіч пасивна, тобто при постійному градієнті напруги дотична напруга не змінюється і не здійснює істотного впливу на стійкість даної геомеханічної системи. Після повної закладки камери відбувається різке зниження деформацій земної поверхні, що пояснюється збігом вектора зсувів з напругою відсічі закладного матеріалу.

На другому етапі було проведено математичне моделювання по викладеній вище схемі із зміною параметрів модельованої камери. Як змінні параметри були вибрані діаметр камери (межі зміни 20-200 м), глибина розташування камери (межі зміни 20-200 м) і її висота (межі зміни 20-200 м). Це дає можливість прослідкувати вплив кожного з чинників на зсуви поверхні і поточчини камери, а також отримати математичну залежність, що дозволяє прогнозувати зсуви без проведення закладки і з проведенням закладних робіт.

Обробка результатів

Для отримання рівняння залежності всіх трьох досліджуваних чинників на зсуви поверхні і поточчини камери за наслідками проведеного математичного моделювання методом кінцевих елементів, був проведений математичний аналіз із застосуванням програмного продукту SPSS 13.0 [10].

Аналіз результатів моделювання проводився у декілька етапів.

На першому етапі всі результати, отримані при моделюванні, ділилися на дві групи. До першої групи входили результати математичного моделювання

без проведення закладки, в другу – із закладкою камери.

На другому етапі проводився пошук всіх існуючих стандартних видів залежностей, вживаних при статистичній обробці результатів.

На третьому етапі здійснювався вибір із стандартних видів залежностей тих, які можна використовувати при існуючій постановці завдання.

На четвертому етапі за допомогою засобів програмного пакету SPSSv13.0, використовуючи вибрані види залежностей визначалися коефіцієнти рівняння множинної регресії. На основі отриманих коефіцієнтів складалися рівняння регресії.

На п'ятому етапі для вибраних видів залежностей визначався коефіцієнт детермінації R_{yx}^2 .

Коефіцієнт детермінації R_{yx}^2 розраховувався по формулі [11, 12]:

$$R_{yx}^2 = \frac{\sum(y - \bar{y})^2 - \sum(y - \bar{y}_x)^2}{\sum(y - \bar{y})^2} \tag{1}$$

де y - фактичне значення результативної ознаки (в даному випадку – фактичне значення критичної конвергенції або критичного навантаження на заанкеровані шари порід);

\bar{y} - значення загальної середньої результативної ознаки (в даному випадку – середнє значення фактичної критичної конвергенції або критичного навантаження на заанкеровані шари порід);

\bar{y}_x - розрахункове значення результативної ознаки (в даному випадку – розрахункове значення критичної конвергенції або критичного навантаження на заанкеровані шари порід).

Коефіцієнт детермінації визначає, яка частинка варіації ознаки y враховується в моделі і обумовлена впливом на неї незалежних чинників. Таким чином, чим вище коефіцієнт детермінації, тим вище та частинка варіації ознаки y , яка враховується в моделі і обумовлена впливом на неї незалежних чинників.

Для коефіцієнта детермінації визначалася статистична достовірність [13]:

$$\frac{R_{yx}^2}{\sigma_R} > 3 \tag{2}$$

де σ_R - середньоквадратична помилка коефіцієнта детермінації, яка розраховувалася по формулі [12]:

$$\sigma_R = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \tag{3}$$

де n - кількість дослідів.

Якщо нерівність (2) вірна, то коефіцієнт детермінації достовірний.

На шостому етапі проводився остаточний вибір виду залежності. Критеріями вибору служив найбільший коефіцієнт детермінації.

Найбільш близьким виявився логарифмічний вид залежності для визначення зсувів до закладки і ступеневою – для визначення зсувів після закладки. Формули отримані для розрахунку зсувів і кореляційні відносини відповідних залежностей приведені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати кореляційного аналізу

№ п/п	Рівняння регресії	Коефіцієнт кореляції, R ²
1	$U_{\text{пов1}} = -0,766 \cdot \ln(D) - 0,820 \cdot \ln(H) - 0,60 \cdot \ln(L) + 0,18 \cdot H + 6,238$	0,779
2	$U_{\text{пот1}} = 0,102 \cdot \ln(D) - 0,564 \cdot \ln(H) - 0,138 \cdot \ln(L) + 0,16 \cdot H + 1,717$	0,958
3	$U_{\text{пот2}} = 4 \cdot 10^{10} \cdot H^{-8,69} + 0,02 \cdot D - 0,01L + 0,119$	0,874
4	$U_{\text{пот2}} = -424,529 \cdot H^0 + 0,02 \cdot D - 0,01L + 421,176$	0,704

де $U_{\text{пов1}}$, $U_{\text{пов2}}$ - зсуви поверхні без і з проведенням закладки відповідно, м;

$U_{\text{пот1}}$, $U_{\text{пот2}}$ - зсуви поточини камери без і з проведенням закладки відповідно, м;

D – діаметр камери, м;

використовуючи [7] і [8]. і описану вище методику визначити чи можна закладати фундаменти і до якої групи територій для споруди будівель відноситься дана площа.

H – глибина заставляння камери, м.

L – висота камери, м.

Таким чином, знаючи розміри камери і глибину її закладання, користуючись отриманими формулами можна прогнозувати зсуви без закладки і з проведенням закладних робіт, визначити коли виникає реальна загроза розвитку обвалення порід і просідання земної поверхні чи можна їй запобігти, а також

Література

- Ткач Г.А., Шаповорев В.П., Титов В.М. Производство соды по малоотходной технологии. – Харьков: ХГПУ, 1998. – 429 с.
- Декл. патент №35317 А Україна, МПК 7 B65G5/00, E21F 17/16. Спосіб закладки твердих відходів содових виробництв в підземних соляних камерах / Шестопапов О. В., Цейтлін М. А., Райко В. Ф., Надрук. 10.09.2008, Бюл. № 17. З. Норри Д., де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 304 с.
- Агапов В.П. «Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости пространственных тонкостенных подкрепленных конструкций». Уч. пос./ М; Изд. АСВ, 2000,-152 с.
- Описание поведения материалов в системах автоматизированного инженерного анализа А.Ю. Муйземнек Учебное пособие / Пенза ИИЦПГУ 2005, -157с.
- Протождьяконов М.М., Тедер Р.И., Ильницкая Е.И. и др. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород: Справочное пособие. – М.: «Недра» – 1981. – с. 185-187.
- СНиП 2.02.01-83 (Основания зданий и сооружений).
- СНиП 2.01.09-91 (Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и посадочных грунтах).
- Черняк И.Л. Повышение устойчивости подготовительных выработок. – М.: Недра, 1993. – 256с.
- SPSS для Windows. Руководство пользователя SPSS, Книга 1. - М.: Статистические системы и сервис. 1995.
- Практикум по теории статистики: Учебное пособие / Сидорова А.В., Леонова Н.В., Масич Л.А., и др. – Донецк: ДонНУ, 2003. с. 220-236.
- Математическая статистика: Учебник / Иванова В.М., Калинина В.Н., Нешумова Л.А. и др. – М.: Высш. школа, 1981. – с. 364-365.
- Рыжов П.А. Математическая статистика в горном деле: Учебное пособие. – М.: Высш. школа, 1973. – 286с.