

УДК 551.24.035+551.242.1.02

<https://doi.org/10.17721/1812-5409.2023/2.20>

Лубков М. В., д.ф.-м.н., с.н.с

M. V. Lubkov, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Sr. Sci. Researcher

Моделювання деформування соляних структур внаслідок гравітаційної плавучості

Modelling of the salt structures deforming due to gravitational buoyancy

Полтавська гравіметрична обсерваторія
НАНУ, 36014, м. Полтава, вул. М'ясоєдова
27/29,
e-mail: mikhail.lubkov@ukr.net

Poltava Gravimetric Observatory of NASU, 36014,
Poltava, Myasoedova st., 27/29,
e-mail: mikhail.lubkov@ukr.net

Розглянуто моделювання і геофізичну інтерпретацію деформування соляних структур внаслідок гравітаційної плавучості (галокінез). Для вирішення цієї геофізичної проблеми застосовано варіаційний скінченно-елементний метод розв'язання задачі пружності з урахуванням неоднорідного розподілу геологічних порід всередині розглянутих соляних структур.

Ключові слова: неоднорідна задача пружності, галокінез, варіаційний скінченно-елементний метод.

We consider modeling and geophysical interpretation of the obtained results in the deforming process of the salt structures due to gravitational buoyancy (halokinesis). For solving this geophysical problem, we use variation finite element method of elastic problem resolving with calculation of heterogeneous rocks distribution into considering salt structures. We have defined that salt structures deforming amplitudes mainly depend on linear sizes (length and thickness) of the bottom parts of these structures. Decreasing of these parameters lead to noticeable drop of the press-strain state near the whole region of the salt structure (diapirs). Another hand forms and linear sizes of the top parts of the salt stocks influence only on the deforming of the local regions near these structure elements and don't essentially influence on the whole region deforming around the stock. Quantity characteristics of linear sizes of the salt diapirs structural elements define the whole picture of the stress-strain state around these objects.

Key Words: heterogeneity elastic problem, halokinesis, variation finite element method.

Статтю представив член-кореспондент НАН України Жук Я.О.

1. Вступ

У наш час є важливим розуміння основних етапів розвитку соляного діапіризму. Це пов'язано з тим, що чисельні та різноманітні локальні соляні структури представляють собою ідеальні пастки для накопичення вуглеводневої сировини. Це повною мірою відноситься, наприклад, до локальних соляних структур Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ), що характеризуються різноманітною будовою, літологією та історією формування [1, 2, 4, 6]. Галокінез (деформування соляних структур і навколишнього середовища внаслідок гравітаційної плавучості соляних товщ відносно більш щільних теригенних порід), безумовно, відіграє важливу роль у формуванні та розвитку соляного діапіризму, тому важливо розуміти механізми цього процесу не тільки на якісному, але й кількісному рівні. Проблемами

галокінезу займалися багато дослідників, які будували відповідні геофізичні та математичні моделі цього процесу, але в силу присутності багатьох стратиграфічно-геологічних та тектонічних факторів, як правило, обмежувались лише окремими якісними висновками [2, 3, 6 - 9].

У даній роботі на основі варіаційного скінченно-елементного методу для пружної задачі буде проведено кількісне моделювання галокінезу різних структурних форм, тобто процесів деформування різних соляних структур, пов'язаних з гравітаційною плавучістю соляних шарів відносно більш щільних навколишніх теригенних порід [5].

2. Постановка та метод розв'язання задачі

Припустимо, що розміри шаруватих фрагментів розрізу осадового чохла розглянутих локальних соляних структур значно менші від розмірів навколишніх блоків кристалічного фундаменту.

Внаслідок цього деформування відповідного фрагменту може розглядатися як плоске. У цьому випадку загальна постановка задачі пружності в системі відліку, яка жорстко пов'язана з розглянутими блоками кристалічного фундаменту, має вигляд [5]:

$$\sigma_{ij,j} + F_i = 0; \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} = 2\mu\epsilon_{ij} + k\theta\delta_{ij}; \quad (2)$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(\mathbf{u}_{i,j} + \mathbf{u}_{j,i}); \quad \sigma_{ij}\mathbf{n}_j - \mathbf{f}_i = 0, \mathbf{u}_i = \mathbf{u}_i^*; \quad (3)$$

Тут (1) – рівняння рівноваги; (2) – закон Гука; (3) – співвідношення Коші та граничні умови I – го й II – го роду відповідно; \mathbf{u}_i – компоненти переміщень; σ_{ij} – компоненти тензора напружень; ϵ_{ij} – компоненти тензора деформацій; \mathbf{F}_i – компонента об'ємної сили, яка в даному випадку збігається із силою виштовхування соляних масивів; \mathbf{f}_i – поверхневі зовнішні сили; \mathbf{n}_j – одиничний вектор нормалі до поверхні; ρ – густина, μ – модуль зсуву; k – модуль всебічного стиску; θ – дилатація; δ_{ij} – символ Кронекера.

Складемо функціонал Лагранжу двовимірної пружної задачі з відповідними граничними умовами, що виражає повну механічну енергію об'єкту, якій досліджується, у неруходій декартовій системі координат (x, y) [5]:

$$E = \frac{1}{2} \iint_S [C_1(\epsilon_{xx}^2 + \epsilon_{yy}^2) + 4C_2\epsilon_{xy}^2 + 2C_3\epsilon_{xx}\epsilon_{yy} - (\rho_T - \rho_C)gw] dx dy - \int_L (\mathbf{f}_{xn}u + \mathbf{f}_{yn}w) dl; \quad (4)$$

де $C_1 = k + 4\mu/3$, $C_2 = \mu$, $C_3 = k - 2\mu/3$ – пружні коефіцієнти; u , w – компоненти переміщень уздовж осей x і y відповідно; g – прискорення сили тяжіння; ρ_T – густина теригенних порід; ρ_C – густина сольових товщ; S – площа перерізу розглянутого об'єкту; L – контур, що охоплює площу S ; dl – елемент контуру.

Для розв'язання двовимірної пружної задачі застосовується метод скінчених елементів, заснований на варіаційному принципі Лагранжа [5], що виражає мінімум повної механічної енергії системи:

$$\delta E(u, w) = 0. \quad (5)$$

При розв'язанні варіаційного рівняння (5) застосовуємо восьмивузловий ізопараметричний чотирикутний криволінійний скінчений елемент [5]. Як глобальна система координат, тобто система в якій поєднуються всі скінчені елементи, використовується декартова система координат (x, y) . Як локальна система координат, у якій для кожного елемента визначаються функції форми і проводиться чисельне інтегрування, використовується допоміжна нормалізована система координат (ξ, η) . При побудові функцій форми, що апроксимують змінні й функції в межах кожного елемента, використовуються квадратичні алгебраїчні поліноми [5]. Алгоритм скінчено-елементного розв'язання варіаційної задачі (5) полягає в наступному [5]. Спочатку в локальній системі координат відбувається апроксимація усіх компонент переміщень і деформацій, що входять до функціоналу Лагранжа (4), з використанням отриманих функцій форми. Потім проводиться диференціювання функціоналу (4) по всіх вузлових складових переміщень і прирівнювання відповідних похідних нулю. В результаті для кожного скінченого елемента одержуємо лінійну алгебраїчну систему, що складається з 16 рівнянь. Далі в глобальній системі координат (x, y) відбувається підсумовування локальних систем лінійних алгебраїчних рівнянь по всіх скінчених елементах, на які розбито область, що досліджуємо, і формування глобальної системи рівнянь. Розв'язання глобальної системи лінійних алгебраїчних рівнянь проводиться за допомогою чисельного методу Гауса [5], внаслідок чого визначаються компоненти переміщень в усіх вузлових точках скінчено-елементної сітки. По знайдених вузлових значеннях переміщень можуть бути визначені компоненти переміщень, деформацій, напружень та інші величини у довільній точці скінченного елемента, тобто в будь-якій точці області, що досліджується.

3. Моделювання галокінезу соляних структур

Розглянемо умовні, характерні для ДДЗ, геологічні розрізи осадових порід, які мають пружні властивості [1, 2, 5]. Так, при моделюванні процесів галокінезу (гравітаційного деформування соляних структур) будемо вважати, що на відстанях вглибину від 0 до 2000 м розташовані глини та алеврити; на відстанях від 2000 до 6000 м розташовані різні конфігурації соляних структур, що складаються з шарів кам'яної солі та навколишніх теригенних порід (піщаників); на

відстанях від 6000 до 7000 м – доломіти. Пружні властивості вказаних геологічних порід було обрано з наступних літературних джерел [1, 2, 5]. Нижче на рисунках представлено деформування різних конфігурацій соляних структур, що розташовані у розглянутому фрагменті осадового чохла. Ці конфігурації в двовимірному випадку представлено у вигляді: а) прямокутних соляних подушок, що мають довжину по горизонталі та товщину по вертикалі; б) соляних штоків, які складаються з нижнього прямокутника-основи та верхнього прямокутника-вершини й відповідно мають довжини та товщини.

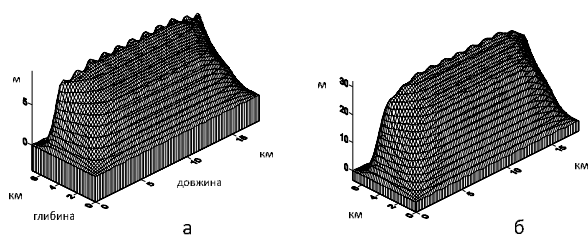


Рис. 1 Розподіл вертикальної складової переміщення при деформуванні соляних подушок довжиною 18 км та товщиною : а) 1 км; б) 2 км.

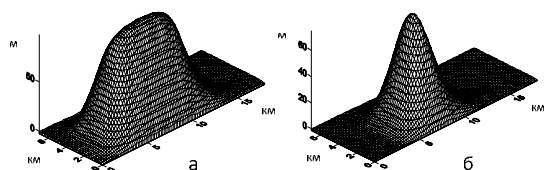


Рис. 2 Розподіл вертикальної складової переміщення при деформуванні соляних подушок товщиною 4 км та довжиною : а) 9 км; б) 3 км.

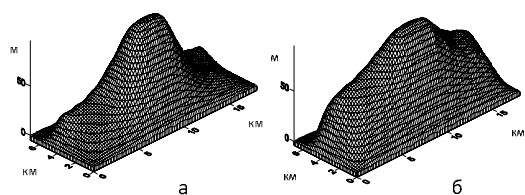


Рис. 3 Розподіл вертикальної складової переміщення при деформуванні соляних штоків довжиною основи 18 км та: а) товщиною 2 км, довжиною вершини 6 км та товщиною 2 км; б) товщиною 3 км, довжиною вершини 6 км та товщиною 1 км.

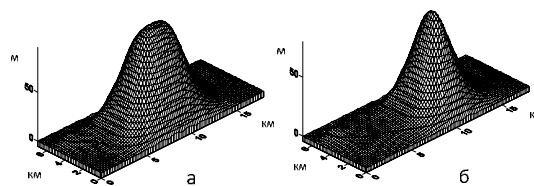


Рис. 4 Розподіл вертикальної складової переміщення при деформуванні соляних штоків довжиною основи 18 км та товщиною 1 км: а) довжиною вершини 6 км та товщиною 3 км; б) довжиною вершини 3 км та товщиною 3 км.

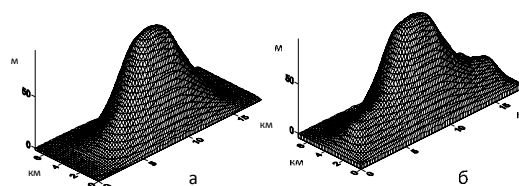


Рис. 5 Розподіл вертикальної складової переміщення соляних штоків товщиною основи 3 км та: а) довжиною 6 км, довжиною вершини 9 км та товщиною 1 км; б) довжиною 6 км, довжиною вершини 18 км та товщиною 1 км.

Висновки

Встановлено, що амплітуди деформування соляних діапирів головним чином залежать від лінійних розмірів (довжини та товщини) нижніх основ (базисів) цих структур. Зменшення цих параметрів призводить до значного зниження напружено-деформованого стану навколо всієї області соляних діапирів. По-друге, форми та лінійні розміри верхніх частин соляних штоків впливають у значній мірі на деформування локальних областей поблизу цих структурних елементів й не мають суттєвого впливу на деформування всієї області навколо соляного штоку. Кількісні характеристики лінійних розмірів структурних елементів соляного діапіру визначають загальну картину напружено-деформованого стану навколо розглянутого об'єкту. Так, для подолання позначки амплітуди деформації в 50 м загальна товщина соляного діапіру повинна бути не менше 3 км.

Список використаних джерел

1. Айзенверг Д. Е. Геология и нефтегазоносность Днепровско-Донецкой впадины. Стратиграфия / Д.Е. Айзенверг, О.И. Берченко, Н.Бражникова. – Киев: Наук. думка, 1988. – 147с.
2. Гавриш В. К. Геология и нефтегазоносность Днепровско-Донецкой впадины. Глубинное строение и геотектоническое развитие / В.К. Гавриш, Г. Д. Забелло, Л. М. Рябчун. – Киев: Наук. думка, 1989. – 208с.
3. Кудельский А.В. Эксгальционно-осадочный галокинез в Припятском палеорифте / А.В. Кудельский // Геология и минерально-сырьевые ресурсы запада Восточно-Европейской платформы. Минск, 2017. – С. 167- 171.
4. Куриленко В.С. Соляной диапиризм Днепровско-Донецкой впадины с позиций флюидодинамических представлений / В.С. Куриленко // Допов. Нац. акад. наук Укр. - 2019. – N 6. – С. 43 -47.
5. Лубков М. В. Утворення вуглеводневих пасток у локальних соляних структурах Дніпровсько-Донецької западини / М.В. Лубков, О.О. Захарчук // Геоінформатика. – 2019. – 70, N 2. – С. 50 – 57.
6. Стовба С.Н. Про механізми соляного тектогенезу в Дніпровсько-Донецькій западині / С.Н. Стовба // Геолог України. – 2005. - N 1. - С. 23 – 29.
7. Bahroudi A. Effect of spatial distribution of Hormuz salt on deformation style in the Zagros fold-thrust belt / A. Bahroudi, H.A. Koyi // Journal of the Geological Society of London. – 2003. – vol. 160. – P. 719 – 733.
8. Schultz-Ela D.D. Modeling of grabens extending above evaporites in Canyon-lands National Park, Utah / D.D. Schultz-Ela, P. Walsh // Journal of Structural Geology. – 2002. – vol. 24, N 2. – P. 247 -275.
9. Stewart S.A. Salt tectonics in the North Sea Basin: a structural style template for seismic interpreters / S.A. Stewart // Space publications of the geological Society. London. – 2007. – vol. 272. – P. 361 – 396.

References

1. AIZENVERG, D.E., BERCHENKO, O.I., BRAZHNKOVA, N. (1988) *Geologija i neftegazonosnost' Dneprovsko-Donckoj vpadiny. Stratigrafija*. Kiev: Nauk. dumka.
2. GAVRISH, V. K., ZABELLO, G. D., RYABCHUN, L.M. (1989) *Geologija i neftegazonosnost' Dneprovsko-Donckoj vpadiny. Glubinnoe stroenie i geotektonicheskoe razvitie*. Kiev: Nauk. dumka.
3. KUDEL'SKIJ, A.V. (2017) Jeksgaljacionno-osadochnyj galokinez v Pripjatskom paleorifte. *Geologija i mineral'no-syr'evye resursy zapada Vostochno-Evropejskoj platformy*. Minsk. p. 161 – 171.
4. KURILENKO, V.S. (2019) Soljanoj diapirizm Dneprovsko-Donckoj vpadiny s pozicij fljuidodinamicheskij predstavlenij. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.* N 6. p. 43 –47.
5. LUBKOV, M., ZAHARCHUK, O. (2019) Utvorennja vuglevodnevy'x pastok u lokal'ny'x soljany'x strukturax Dniprovs'ko-Doncz'koyi zapady'ny'. *Geoinformatics*. 2(70). p. 50 – 57.
6. STOVBA, S.N. (2005) Pro mexanizmy' solyanogo tektogenezu v Dniprovs'ko-Doncz'kij zapady'ni. *Geolog Ukrainy*'. N 1. p. 23 – 29.
7. BAHROUDI, A., KOUI, H.A. (2003). Effect of spatial distribution of Hormuz salt on deformation style in the Zagros fold-thrust belt. *Journal of the Geological Society of London*. Vol. 160. p. 719 – 733.
8. SCHULTZ-ELA, D.D., WALSH, P. (2002). Modeling of grabens extending above evaporites in Canyon-lands National Park, Utah. *Journal of Structural Geology*. Vol. 24, N 2. p. 247 -275.
9. STEWART, S.A. (2007). Salt tectonics in the North Sea Basin: a structural style template for seismic interpreters. *Space publications of the geological Society*. London. Vol. 272. p. 361 – 396.

Надійшла до редколегії 01.07.23