

doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.09.028>

УДК 622.279

**А.Ф. Булат, О.П. Круковський,
В.В. Круковська, К.А. Безручко**

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро

E-mail: igtm@ukr.net

Чисельне моделювання геомеханічних і фільтраційних процесів, що відбуваються в породному масиві при відпрацюванні газових родовищ

*Представлено академіком НАН України А.Ф. Булатом
та членом-кореспондентом НАН України О.П. Круковським*

Розроблено математичну модель процесів, що протікають при розробці газового родовища. Враховано вплив напруженого стану на проникність породного масиву та вплив зміни тиску газу в колекторі на напружений стан масиву. Для тестової моделі газового родовища отримано розподіли значень напружень, переміщень, тиску газу в колекторі на різних часових ітераціях. Наведено графіки зміщень земної поверхні та зміни різних геомеханічних параметрів. Показано, що значне зниження тиску газу при тривалій експлуатації родовища зумовлює деформування вищерозміщеної товщі гірських порід. Підвищена різнокомпонентність поля напружень спричиняє зростання проникності порід поблизу пласта-колектора при виснаженні запасів вуглеводнів.

Ключові слова: чисельне моделювання зв'язаних процесів, деформування породного масиву, фільтрація газу, розробка газового родовища.

Огляд результатів досліджень напружено-деформованого стану масивів гірських порід при розробці газових родовищ показав: видобуток вуглеводнів зумовлює деформування колекторів і гірських порід, що їх вміщують. Зазначені деформації можуть мати різноманітний характер: пружний, пружно-пластичний тощо [1]. Картину зміни напружено-деформованого стану масиву гірських порід при розробці нафтових і газових родовищ характеризують просадка земної поверхні, руйнування обсадних колон свердловин, зміна колекторських властивостей продуктивних пластів і їх газовіддача [2]. Зміна поля напружень, що пов'язана з видобутком вуглеводнів, може призводити до активізації розломів, тим самим викликаючи сейсмічність [3].

Нізькопроникні колектори вельми чутливі до деформації системи “продуктивний пласт—гірські породи”. Геодинамічні процеси, що протікають в таких колекторах, можуть викликати порушення суцільності продуктивного пласта, утворення і розвиток мікротріщинуватості і, як наслідок, збільшення фільтраційної проникності [4].

© А.Ф. Булат, О.П. Круковський, В.В. Круковська, К.А. Безручко, 2018

Однак механізм і закономірності деформування шаруватого породного масиву, що вміщує пласти-колектори газу, в процесі розробки газового родовища вивчені недостатньо. На сьогодні не існує універсальних методів і універсальних обчислювальних комплексів для вирішення задач цього класу, які могли б мати практичне значення. У зв'язку з цим необхідно застосовувати комбінований метод досліджень, який включає натурні спостереження і вимірювання, а також чисельне моделювання поведінки складної багатшарової і багатокомпонентної структури газового родовища протягом тривалого часу, в тому числі після завершення його експлуатації.

При розробці газових родовищ відбувається процес фільтрації газу з порового простору колектора в свердловину, пластовий тиск знижується, що призводить до перерозподілу поля напружень. Тому математична модель, що відображає перебіг цих процесів у часі повинна включати зв'язані рівняння зміни напружено-деформованого стану твердого тіла і несталі фільтрації газу. Зміна в часі напружено-деформованого стану породного масиву без урахування сил інерції описується системою рівнянь [5]:

$$\sigma_{ij,j} + X_i(t) + T_i(t) + P_i(t) = 0, \quad (1)$$

де $\sigma_{ij,j}$ – похідні від компонент тензора напружень по x, y ; $X_i(t)$ – проекції зовнішніх сил, що діють на одиницю об'єму тіла; $T_i(t)$ – проекції сил, викликаних внутрішнім тертям, що діють на одиницю об'єму тіла; $P_i(t)$ – проекції сил, зумовлених тиском флюїдів в тріщинувато-пористому середовищі.

Сили $T_i(t)$ пропорційні швидкості зміни переміщень:

$$T_i(t) = -c_s \frac{\partial}{\partial t} u_i,$$

де c_s – коефіцієнт демпфування; u_i – переміщення.

В якості початкових і граничних умов для поставленої задачі задаються:

$$\sigma_{yy}|_{t=0} = \gamma h; \quad \sigma_{xx}|_{t=0} = \lambda \gamma h; \quad u_x|_{\Omega_1} = 0; \quad u_y|_{\Omega_2} = 0, \quad (2)$$

де σ_{ij} – компоненти тензора напружень; γ – усереднена вага вищерозташованих гірських порід; λ – коефіцієнт бокового розпору; h – глибина розробки; Ω_1 – вертикальні межі зовнішнього контуру; Ω_2 – горизонтальні межі зовнішнього контуру.

Сумарна сила, прикладена в точках розглянутої області, дорівнює сумі сил, зумовлених дією геостатичного тиску і тиску газу, що визначається шляхом розв'язання задачі про фільтрацію газу в тріщинувато-пористому деформівному середовищі. Задача розв'язується в пружно-пластичній постановці [6]. Для математичного опису процесу переходу гірських порід в порушений стан застосовується критерій міцності Кулона–Мора [7]. Для аналізу напружено-деформованого стану породного ма-

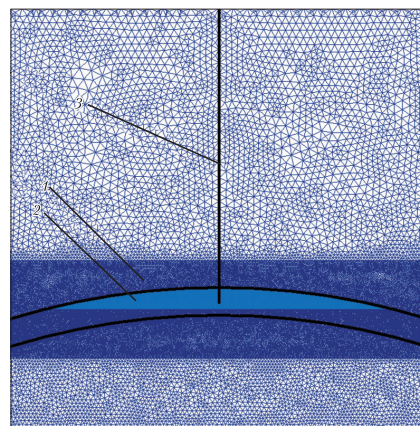


Рис. 1. Фрагмент скінченно-елементної сітки: 1 – непроникині породи; 2 – пласт-колектор газу; 3 – свердловина

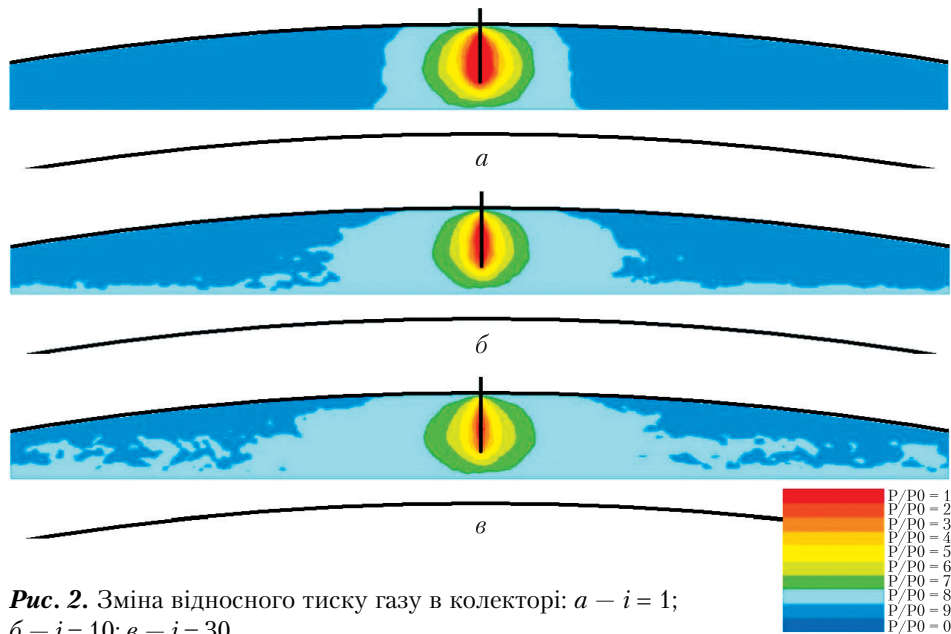


Рис. 2. Зміна відносного тиску газу в колекторі: $a - i = 1$;
 $б - i = 10$; $в - i = 30$

сиву використовуються параметри, що характеризують різнокомпонентність поля напружень і розвантаження від гірського тиску [8]:

$$Q^* = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\gamma h}; \quad P^* = \frac{\sigma_3}{\gamma h},$$

де σ_1, σ_3 — максимальна і мінімальна компоненти тензора головних напружень.

Рівняння нерозривності газового потоку [5] в плоскій постановці при наявності джерела газовиділення можна представити у вигляді:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + K \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) + q(t) = 0, \quad (3)$$

де p — тиск газу; K — проникність масиву, що дорівнює сумі природної та техногенної проникності, $K = k + k_{\text{техн}}$; $q(t)$ — функція газовиділення.

У процесі видобутку вуглеводнів змінюється поле напружень в породному масиві, що призводить до зміни його проникності. На поле природної проникності k накладається поле техногенної проникності $k_{\text{техн}}$, яке залежить від співвідношення компонент тензора головних напружень [9].

Початкові і граничні умови для цієї задачі:

$$p|_{t=0} = p_0, \quad p|_{\Omega_3(t)} = p_0; \quad p|_{\Omega_4} = p_{\text{св}}, \quad (4)$$

де p_0 — тиск газу в момент часу $t = 0$; $\Omega_3(t)$ — межа області фільтрації, що змінюється у часі; Ω_4 — контур свердловини; $p_{\text{св}}$ — тиск у свердловині.

Система рівнянь (1)–(3) з початковими і граничними умовами (2) та (4) розв'язується за допомогою методу скінченних елементів.

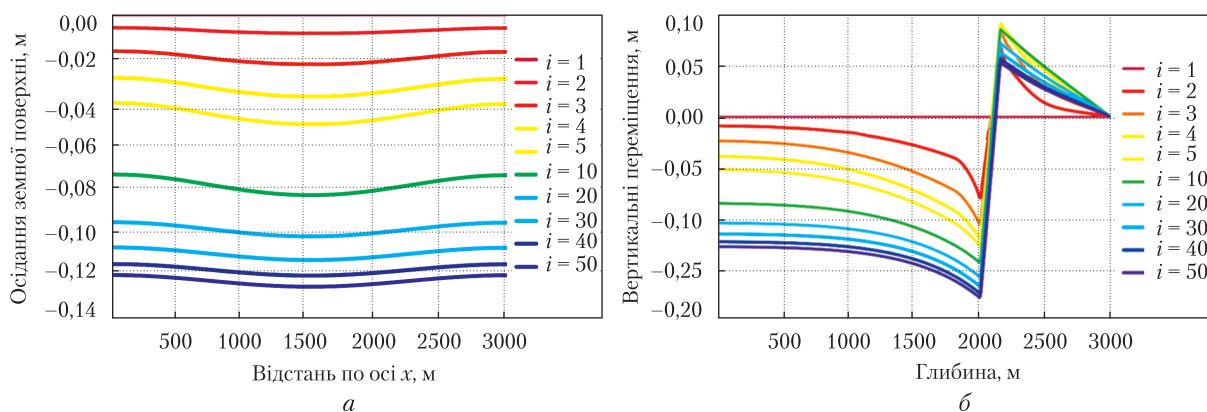


Рис. 3. Осідання земної поверхні на різних часових ітераціях (а) та вертикальні зміщення вздовж прямої, що проходить через центр скінченно-елементної моделі, на різних часових ітераціях (б)

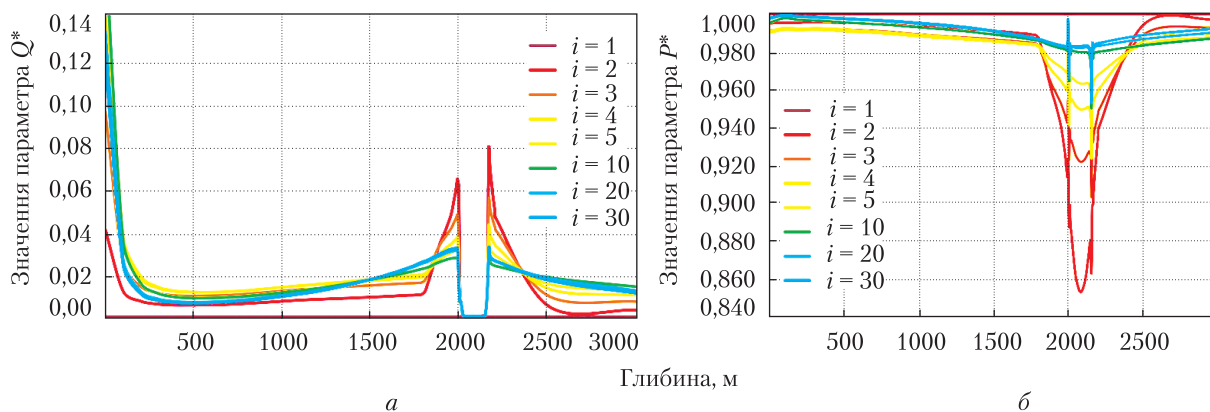


Рис. 4. Розподіл значень параметрів Q^* (а) та P^* (б) на різних часових ітераціях

Розглянемо область породного масиву розміром 3000×3000 м. Верхня межа області — земна поверхня. Пласт-колектор газу знаходиться на глибині 2000–2200 м (по центру). Радіус кривизни пласта — 5000 м. Висота області колектора, зайнятої газом, — 150 м (по центру). Початковий тиск газу в резервуарі — 20 МПа. Колектор має початкову проникність, зверху і знизу він обмежений непроникними породами. Скінченно-елементна сітка, яка використовується при розрахунках, показана на рис. 1.

На початку експлуатації газового родовища зміна тиску газу в пласті-колекторі незначна і не впливає помітно на зміну поля напружень, зміщення породних шарів і земної поверхні. На рис. 2 показано розподіл відносного тиску газу в колекторі на різних часових ітераціях i , на початковому етапі роботи свердловини при фіксованих витратах газу.

Виснаження запасів газу викликає помітний перерозподіл поля напружень в резервуарі та у вмисних породах. Максимальні переміщення точок породного масиву і земної поверхні відбуваються після того, як тиск газу в колекторі падає до мінімального значення P_{\min} . Припустимо, що $P_{\min} = 3$ МПа і виконаємо розрахунок при фіксованому значенні пластового тиску $p = P_{\min}$.

На рис. 3, а показано зміщення земної поверхні на різних часових ітераціях, на рис. 3, б — вертикальні зміщення вздовж прямої, що проходить через центр скінченно-елементної моделі. Видно, що максимальне зміщення — в центральній точці поверхні моделі, над свердловиною при $x = 1500$, рис. 3, а. На 50-й часовій ітерації $u = 12,5$ см.

В результаті значного зниження пластового тиску газу в колекторі і стиснення під дією ваги вищерозміщеної породної товщі відбувається зменшення об'єму газоносного пласта. Породи, розташовані над колектором ($h < 2000$ м), зміщуються вниз ($u < 0$), рис. 4, б під колектором ($h > 2150$ м) — вгору ($u > 0$). Видно, що максимальні значення переміщень “підробленого” масиву з плином часу зростають швидше. При $i = 50$ вони перевищують максимальні значення переміщень порід, розташованих нижче колектора, вдвічі. Прийнята в даній моделі однорідність фізико-механічних властивостей гірських порід зумовлює рівномірність їх деформування.

На рис. 4 представлено графіки зміни значень параметрів Q^* і P^* , що характеризують напружений стан породного масиву, вздовж вертикальної прямої, яка проходить через центр скінченно-елементної моделі. Підвищена різнокомпонентність поля напружень поблизу пласта-колектора, рис. 4, а, обумовлює можливість збільшення тріщинуватості, тому проникність порід в цій зоні при виснаженні колектора може збільшитися. На завершальному етапі експлуатації газового родовища значення параметра P^* в області колектора мінімальні (рис. 4, б), що свідчить про розвантаження пласта в цій зоні. Згодом криві P^* вирівнюються, перерозподіл поля напружень призводить до просідання гірського масиву над пластом-колектором.

Таким чином, розроблено математичну модель “зміна напружено-деформованого стану породного масиву — нестала фільтрація газу” для моделювання процесів, що відбуваються при розробці газового родовища. Виконано чисельне моделювання зміни геомеханічних і фільтраційних параметрів на початковому і кінцевому етапах розробки для тестової моделі газового родовища. Отримано розподіли значень напружень, деформацій, тиску газу в колекторі на різних часових ітераціях. Побудовано графіки зміщення земної поверхні, вертикальних переміщень, зміни значень геомеханічних параметрів. Показано, що значне зниження тиску газу при тривалій експлуатації родовища зумовлює деформування вищерозміщеної товщі гірських порід. Підвищена різнокомпонентність поля напружень поблизу пласта-колектора зумовлює можливість збільшення тріщинуватості, тому проникність порід в цій зоні при виснаженні колектора може зростати.

Для дослідження нерівномірності деформації верхніх породних шарів, зумовленої відмінністю їх міцнісних властивостей, а також можливості зміни фільтраційних властивостей колекторів-супутників при їх “підробці” необхідна побудова більш складної чисельної моделі свити газоносних пластів.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Николаевский В. Н. Геомеханика и флюидодинамика. Москва: Недра, 1996. 448 с.
2. Трубецкой К.Н., Гурьянов В.В. Интенсификация газоотдачи угольных пластов на основе регулирования их напряженно-деформированного состояния. *Уголь*. 2006. № 2. С. 64–66.
3. Orlic B., Wassing B.T. A Study of Stress Change and Fault Slip in Producing Gas Reservoirs Overlain by Elastic and Viscoelastic Caprocks. *Rock Mech. Rock Eng.*, 2013. P. 421–435.

4. Зотов Г.Ф., Динариев О.Ю., Крупин Г.С. и др. Физические явления в низкопроницаемых деформируемых породах при разработке месторождений природного газа. Геотехнологические проблемы разработки месторождений природного газа. Москва: ВНИИГАЗ. 1992. С. 15–24.
5. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. Butterworth-Heinemann, 2000. 690 p.
6. Круковский А.П., Круковская В.В. Обзор существующих методов расчета напряженно-деформированного состояния и устойчивости массива горных пород. *Геотехн. механика*. 2002. № 36. С. 178–186.
7. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкций крепей. Москва: Недра, 1984. 415 с.
8. Круковский А.П., Курносое С.А., Круковская В.В. и др. Определение рациональных параметров породно-анкерных и охранных конструкций на сопряжении лавы с выемочным штреком. *Вісн. КрНУ ім. Михайла Остроградського*. 2016. Вип. 4(99). С. 54–60.
9. Круковская В.В. Моделирование связанных процессов, происходящих в углепородном массиве при ведении горных работ. *Геотехн. механика*. 2015. № 121. С. 48–99.

Надійшло до редакції 02.05.2018

REFERENCES

1. Nikolaevskiy, V. N. (1996). Geomechanics and Fluid Dynamics, Moscow: Nedra (in Russian).
2. Trubetskoy, K. N. & Guryanov, V. V. (2006) Intensification of coal seams gas recovery on the basis of regulation of their stress-strain state. *Coal*, No. 2, pp. 64-66 (in Russian).
3. Orlic, B. & Wassing, B. T. (2013). A Study of Stress Change and Fault Slip in Producing Gas Reservoirs Overlain by Elastic and Viscoelastic Caprocks. *Rock Mech. Rock Eng.*, pp. 421-435.
4. Zotov, G. F., Dinariev, O. Yu., Krupin, G. S. et al. (1992). Physical phenomena in low-permeability deformable rocks in the development of natural gas fields. *Geotekhnologicheskie problemyi razrabotki mestorozhdeniyi prirodnogo gaza*, Moscow: VNIIGAZ, pp. 15-24 (in Russian).
5. Zienkiewicz, O. C. & Taylor, R. L. (2000). The finite element method. Butterworth-Heinemann.
6. Krukovskiy, A. P. & Krukovska, V. V. (2002). Review of existing methods for calculating the stress-strain state and stability of a rock massif. *Geotechnical Mechanics*, No. 36, pp.178-186 (in Russian).
7. Baklashov, I. V. & Kartoziya, B. A. (1984.) *Mechanics of underground structures and supports constructions*. Moscow: Nedra (in Russian).
8. Krukovskiy, A. P., Kurnosov, S. A. & Krukovska, V. V. (2016). Determination of rational parameters for the rock-bolting and protective structures in the face end. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, No. 4(99), pp. 54-60 (in Russian).
9. Krukovska, V. V. (2015). Simulation of coupled processes that occur in coal-rock massif during mining operations. *Geotechnical Mechanics*, No. 121, pp.48-99 (in Russian).

Received 02.05.2018

*А.Ф. Булат, А.П. Круковский,
В.В. Круковская, К.А. Безручко*

Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Днепр
E-mail: igtm@ukr.net

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ И ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В ПОРОДНОМ МАССИВЕ ПРИ ОТРАБОТКЕ ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Разработана математическая модель процессов, происходящих при разработке газового месторождения. Учтено влияние напряженного состояния на проницаемость породного массива и влияние изменения давления газа в коллекторе на напряженное состояние массива. Для тестовой модели газового месторождения получены распределения значений напряжений, перемещений, давления газа в коллекторе на различных временных итерациях. Построены графики смещения земной поверхности и изменения различных геомеханических параметров. Показано, что значительное снижение давления газа при длительной эксплуатации месторождения обуславливает деформирование вышележащей толщи горных

пород. Повышенная разнокомпонентность поля напряжений приводит к росту проницаемости пород вблизи пласта-коллектора при истощении запасов углеводородов.

Ключевые слова: численное моделирование связанных процессов, деформирование породного массива, фильтрация газа, разработка газового месторождения.

*A.F. Bulat, A.P. Krukovskiy,
V.V. Krukovska, K.A. Bezruchko*

Institute of Geotechnical Mechanics of the NAS of Ukraine, Dnipro
E-mail: igtm@ukr.net.

NUMERICAL SIMULATION OF GEOMECHANICAL AND FILTRATION PROCESSES IN A ROCK MASSIF DURING THE GAS FIELD DEVELOPMENT

A mathematical model of the processes occurring during the gas field development is created. In it, the effect of a stressed state on the rock permeability and the effect of a gas pressure in the reservoir on the stress state of the massif are taken into account. Distributions of values of gas stresses, displacements, and the pressure in the reservoir at various time iterations are specified for a testing model of the gas field. Curves of Earth's surface displacement and changes of various geomechanical parameters are built. It is shown that a significant reduction of the gas pressure during the long-term field development causes deformations of the overlying rock massif. High variability of the stress field leads to an increased rock permeability near the reservoir bed, when hydrocarbon reserves are depleted.

Keywords: numerical simulation of coupled processes, rock massif deformation, gas filtration, gas-field development.