Оригинальная статья

Original Paper

УДК 622.023.62:658.012.001.57 © К.В. Халкечев✉[1], Ю.М. Левкин[2], 2026

[1] НИТУ МИСИС, 119049, г. Москва, Россия
[2] ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», 107023, г. Москва, Россия
✉ e-mail: h_kemal@mail.ru

UDC 622.023.62:658.012.001.57 © K.V. Khalkechev✉[1], Yu.M. Levkin[2], 2026

[1] National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation
[2] Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation
✉ e-mail: h_kemal@mail.ru

Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния трещиноватых газоносных пористых угольных пластов

Mathematical modeling of the stress-strain state of fractured gas-bearing porous coal seams

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2026-8-65-67

В статье проведен анализ существующих математических моделей напряженно-деформированного состояния трещиноватых газоносных пористых угольных пластов. Установлено, что в существующих математических моделях учитываются поле напряжений в микроструктурных составляющих и давление в газонаполненных порах. Но остаются без внимания напряжения, обусловленные сжимаемостью газов и трещиноватостью угольного пласта. В результате искажается реальная картина поля напряжений, являющегося одной из основных характеристик, влияющих на добычу угля. Для решения данной проблемы предложена математическая модель, учитывающая сжимаемость газа в порах, при которой выделяется тепло, и вместе с этим возникает термическое напряжение. При построении модели доказано, что различные виды газов в порах могут рассматриваться как идеальные, поскольку у них коэффициент сжимаемости близок к единице. Приведен пример расчета дополнительного термического напряжения при сжатии метана с заданными начальными параметрами.

Ключевые слова: *поле напряжений, угольный пласт, термическое напряжение, трещиноватость, модель, сжимаемость газа, газонаполненные поры, магистральная трещина.*

Для цитирования: Халкечев К.В., Левкин Ю.М. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния трещиноватых газоносных пористых угольных пластов // Уголь. 2026;(8):65-67. DOI: 10.18796/0041-5790-2026-8-65-67.

Abstract

The article analyzes existing mathematical models of the stress-strain state of fractured gas-bearing porous coal seams. It has been established that current mathematical models take into account the stress field in microstructural components and the gas pressure in gas-filled pores. However, stresses caused by gas compressibility and the fracturing of the coal seam are not considered. As a result, the actual stress field is distorted, although it is one of the key factors influencing coal extraction. To address this problem, a mathematical model

ХАЛКЕЧЕВ К.В.
Доктор физ.-мат. наук, доктор техн. наук, профессор кафедры Геологии и маркшейдерского дела НИТУ МИСИС, 119049, г. Москва, Россия, e-mail: h_kemal@mail.ru

ЛЕВКИН Ю.М.
Доктор техн. наук, профессор кафедры Промышленного, гражданского и подземного строительства ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», 107023, г. Москва, Россия, e-mail: lev5353@bk.ru

is proposed that accounts for gas compressibility in pores, during which heat is released and thermal stress arises. When constructing the model, it is shown that different types of gases in pores can be treated as ideal gases, since their compressibility factor is close to one. An example calculation of the additional thermal stress during methane compression under given initial parameters is presented.

Keywords

Stress field, coal seam, thermal stress, fracturing, model, gas compressibility, gas-filled pores, main crack.

For citation

Khalkechev K.V., Levkin Yu.M. Mathematical modeling of the stress-strain state of fractured gas-bearing porous coal seams. *Ugol'*. 2026;(8):65-67. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2026-8-65-67.

ВВЕДЕНИЕ

Напряженно-деформированное состояние газоносных угольных пластов индуцируется горным давлением и обусловлено неоднородностью напряжений на микроструктурных составляющих, давлением в газонаполненных порах и трещиноватостью. Это поле напряжений может быть исследовано с помощью математического моделирования. Наиболее полный обзор существующих моделей представлен в работах [1, 2, 3]. В большинстве существующих моделей исследованы поле напряжений одновременно на микроскопическом уровне [4, 5], давление в газонаполненных порах [6, 7], но нет работ, учитывающих сжимаемость газов и напряжение, обусловленные трещиноватостью угольного пласта. Таким образом, искажается реальная картина поля напряжений, одной из основных характеристик, влияющих на добычу угля. Поэтому определение напряженно-деформированного состояния трещиноватых угольных пластов со сжимаемым газом в порах является актуальной научной задачей**.**

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Согласно общему принципу классического метода разработки математических моделей построим содержательную модель. Пусть упругий угольный пласт с газонаполненными порами находится в породном массиве на определенной глубине. Внешнее поле напряжений считается известным и обусловленным горным давлением. В порах содержится метан (CH_4) – рудничный газ, так как он является преобладающим компонентом, его содержание составляет от 85-90% до 98% и более; также могут содержаться тяжелые углеводороды – этан (C_2H_6), пропан (C_3H_8), бутан (C_4H_{10}) и следы пентана (C_5H_{12}), но в значительно меньших количествах. Их суммарная доля обычно невелика (около 0,02-0,14%). В качестве примеси могут присутствовать неуглеводородные газы, они обычно составляют 1-2% от общего объема; двуокись углерода (CO_2) – распространенная примесь в некоторых пластах может быть доминирующим компонентом; ее содержание часто колеблется от долей процента до 10-15%; азот (N_2) – его концентрация редко превышает 10%, но в зонах газового выветривания ближе к поверхности может достигать 80-99%.

Сернистые соединения для многих угольных пластов не характерны, но в некоторых месторождениях (например, в Астраханском) фиксируется сероводород (H_2S) в концентрациях до 20-25%. Водород (H_2) встречается в небольших количествах, особенно в газах третичных углей. Инертные и редкие газы – в мизерных количествах могут присутствовать гелий (He), аргон (Ar). Окись углерода (CO) может выделяться из пластов в процессе химических реакций. Ее содержание в естественном составе газа обычно не превышает 0,5-1,5%. Сернистый ангидрид (SO_2) встречается в составе рудничного газа некоторых месторождений. При сжатии газы в порах нагреваются, и в результате увеличивается температура угольного пласта в целом. Если при этом пористость достигает 60%, то температуру угольного пласта можно считать равной температуре газа в порах.

На основании данной содержательной модели построим математическую модель напряженно-деформированного состояния трещиноватых угольных пластов со сжимаемым газом в порах. Используя аналогию с работами [8, 9, 10, 11, 12], легко найти поля напряжений на микроструктурных составляющих и обусловленных магистральными трещинами, а также на поле давлений в газонаполненных порах.

Изменение температуры при сжатии идеального газа определяется по известной формуле:

$$T_2 = T_1\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}, \qquad (1)$$

где T_1 и T_2 – начальная и конечная температура соответственно; P_1 и P_2 – начальное и конечное давление соответственно; γ – показатель адиабаты.

Увеличение температуры при сжатии газа в порах ведет к температурному напряжению во всем угольном пласте, которое можно определить из уравнения теплового расширения:

$$\sigma = C\alpha(T_2 - T_1), \qquad (2)$$

где σ – тензор напряжений; C – тензор модулей упругости угольного пласта; α – коэффициент теплового расширения угля.

Коэффициент сжимаемости (Z): метан – 0,99814; этан – 0,99197; пропан – 0,98306; бутан – 0,9625; двуокись углерода – 0,9950; азот – 0,99975; сероводород – 0,99193; водород – 1,0006; гелий – 1,0006; аргон – 0,9993; окись углерода – 0,9995; сернистый ангидрид – 0,979. Все значения близки к 1, и поэтому их можно отнести к идеальным газам. Показатель адиабаты (γ): метан – 1,30-1,32; этан – 1,19-1,20; пропан – 1,13; бутан – 1,10-1,11; двуокись углерода – 1,30; азот – 1,40; сероводород – 1,33; водород – 1,41; гелий – 1,667 (точно 5/3); аргон – 1,667 (точно 5/3); окись углерода – 1,40; сернистый ангидрид – 1,29. Приведем пример расчета дополнительного термического напряжения при сжатии метана с начальными параметрами 296 К (23°С) и 6,2 до 8,8 МПа:

$$\sigma = 3{,}66 \cdot 10^9\,\text{Па} \cdot 2{,}4 \cdot 10^{-5}\,1/\text{К} \cdot (320\text{К}-296\text{К}) =$$
$$= 2{,}10816\ \text{МПа}.$$

Аналогично рассчитываются напряжения для других газов по выражениям (1) и (2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ существующих математических моделей напряженно-деформированного состояния трещиноватых газоносных пористых угольных пластов позволил выявить их достоинства и недостатки. В них учитываются поле напряжений в микроструктурных составляющих от давления в газонаполненных порах и от трещиноватости. Но остаются без внимания напряжения, обусловленные сжимаемостью газов и трещиноватостью угольного пласта. В результате искажается реальная картина поля напряжений, являющегося одной из основных характеристик, влияющих на добычу угля. Для решения данной проблемы предложена математическая модель, учитывающая сжимаемость газа в порах, при которой выделяется тепло, и вместе с этим возникает термическое напряжение. Предлагается также по методу аналогии использовать готовое решение по получению напряжения, обусловленного наличием магистральной трещины в угольном пласте.

Список литературы • References

1. Gao K., Chang S., Zhang S., Liu B., Liu J. Comprehensive Assessment of Coalbed Methane Content Through Integrated Geophysical and Geological Analysis: Case Study from YJP Block. *Processes.* 2025;(13):1401. DOI: 10.3390/pr13051401.
2. Leng K., Guan B., Liu W., Jiang C., Cong S., Xin Y. Research progress of coalbed methane extraction. *Energy Reports*. 2024;(12):5728-5746. DOI: 10.1016/j.egyr.2024.11.030.
3. Guo W., Wei Y., Cao D. et al. Review on Main Controlling Factors and Key Simulation Techniques of Hydro-Fracturing Potential for Coalbed Methane Reservoirs: Recent Progress, Challenges, and Prospects. *ACS Omega*. 2026;(11):15617-15641. DOI: 10.1021/acsomega.5c12789.
4. Bertrand F., Cerfontaine B., Collin F. A fully coupled hydro-mechanical model for the modeling of coalbed methane recovery. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2017;(46):307-325. DOI: 10.1016/j.jngse.2017.07.029.
5. Fan L., Liu S. Numerical prediction of in situ horizontal stress evolution in coalbed methane reservoirs by considering both poroelastic and sorption induced strain effects. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* 2018;(104):156-164. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.02.012.
6. Wen Z., Guo S., Zhao Y. et al. Mechanism of microscopic behind the influence of stress loading on gas adsorption by coal. *Scientific Reports*. 2025;(15):3253. DOI: 10.1038/s41598-025-87477-8.
7. Liu H., Lin B., Mou J., Yang W. Experimental study and modelling of coal stress induced by gas adsorption. *Journal of Natural Gas Science and Engineering.* 2020;(74):103092. DOI: 10.1016/j.jngse.2019.103092.
8. Халкечев К.В. Нелинейная математическая модель динамической системы трещиноватости в минералах углевмещающих горных пород // Уголь. 2019;(10):92-94. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-10-92-94.
   Khalkechev K.V. Nonlinear mathematical model of the fracturing dynamic system in minerals of coal-bearing rocks. *Ugol'*. 2019;(10):92-94. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2019-10-92-94.
9. Халкечев К.В., Халкечев Р.К., Левкин Ю.М., Математическая модель поля напряжений в целиках с учетом магистральной трещины на угольных месторождениях // Уголь. 2023;(7):56-58. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-7-56-58.
   Khalkechev K.V., Khalkechev R.K. & Levkin Yu.M. Mathematical model of the stress field in the pillars with due account taken of the main crack in coal fields. *Ugol'*. 2023;(7):56-58. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-7-56-58.
10. Халкечев Р.К., Левкин Ю.М., Халкечев К.В. Разработка математической модели поля напряжений в целиках слоистой текстуры на угольных месторождениях // Уголь. 2023;(8):84-86. DOI: 10.18796/0041- 5790-2023-8-84-86.
    Khalkechev R.K., Levkin Yu.M., Khalkechev K.V. Mathematical model development of the stress field in the pillars stratified texture in coal deposits. *Ugol'*. 2023;(8):84-86. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-8-84-86.
11. Математическое обеспечение информационной системы анализа процесса разрушения трещиноватой кровли на угольных месторождениях / Р.К. Халкечев, К.В. Халкечев, Ю.М. Левкин и др. // Уголь. 2023;(12):64-66. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-12-64-66.
    Khalkechev R.K., Khalkechev K.V., Levkin Yu.M., Kuzmenko S.Yu. Mathematical support of the information system for analyzing the process of fractured roof destruction in coal fields. *Ugol'*. 2023;(12):64-66. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-12-64-66.
12. Халкечев К.В., Левкин Ю.М., Абрамкин Н.И. Разработка математической модели поля напряжений в окрестности магистральной трещины продольного сдвига в кровле горной выработки // Уголь. 2024;(7):52-54. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-52-54.
    Khalkechev K.V., Levkin Yu.M., Abramkin N.I. Development of a mathematical model of the stress field in the vicinity of a longitudinal shear main crack in the mine roof. *Ugol'*. 2024;(7):52-54. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-52-54.

Authors Information

Khalkechev K.V. – Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Geology and Mine Surveying of the National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation, e-mail: h_kemal@mail.ru

Levkin Yu.M. – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Industrial, Civil and Underground Construction of the Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation, e-mail: lev5353@bk.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 30.04.2026
Поступила после рецензирования: 17.07.2026
Принята к публикации: 30.07.2026

Paper info

Received April 30, 2026
Reviewed July 17, 2026
Accepted July 30, 2026