

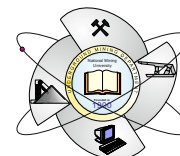


Mining of Mineral Deposits

ISSN 2415-3443 (Online) | ISSN 2415-3435 (Print)

Journal homepage <http://mining.in.ua>

Volume 10 (2016), Issue 1, pp. 16-24



UDC 622.278.6

<http://dx.doi.org/10.15407/mining10.01.016>

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛОСТЕЙ РАССЛОЕНИЯ В ПОРОДАХ КРОВЛИ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

В. Фальштынський¹, В. Лозинський¹, П. Саик¹, Р. Дычковський^{1*}, Н. Табаченко¹

¹Кафедра підземної розробки месторождений, Національний горний університет, Дніпропетровськ, Україна

*Ответственный автор: e-mail dichre@yahoo.com, тел. +380562472348, факс: +380562473209

SUBSTANTIATING PARAMETERS OF STRATIFICATION CAVITIES FORMATION IN THE ROOF ROCKS DURING UNDERGROUND COAL GASIFICATION

V. Falshtynskiy¹, V. Lozynskiy¹, P. Saik², R. Dychkovskiy^{1*}, M. Tabachenko¹

¹Underground Mining Department, National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine

*Corresponding author: e-mail dichre@yahoo.com, tel. +380562472348, fax: +380562473209

ABSTRACT

Purpose. Underground coal gasification, as a complex and technically difficult process, should be supported in many aspects by computer simulations or analytical calculations of rock mass behavior. However, little is known about the formation of stratification cavities in the roof rocks during coal seam gasification. To research the formation of stratification cavities and rocks deformations by mine pressure with the methods of calculation based on hypotheses or statistical information, a number of hypotheses are used. The main purpose is to examine the rock mass behavior and formation of stratification cavities during gasification of a thick coal seam.

Methods. Analytical calculations were used as the research method for the work presented. The mathematical model of the stress-strain state of rock mass based on the theory of elasticity, resiliency, and maximum equilibrium, was developed and used in this paper.

Findings. Critical analysis of geomechanical models of coal gasification together with their mathematical formulation was the result of considerations presented in this paper. Equations were derived for substantiating parameters of stratification cavities above the goaf of the underground gasifier. Subsequently, the volumes of stratification cavities depending on the length of gasification channel were calculated. The results have significant influence on gasifiers development and the final efficiency of gasification process.

Originality. The research results were obtained from analytical calculations of rock mass behavior during thick coal seams gasification. The authors implemented a mathematical model based on the method suggested by professor A. Savostianov which was used in carrying out the calculations.

Practical implications. The present study provides a starting point for further research and analytical calculations of rock mass behavior. The data and conclusions outlined in this paper may be useful in preliminary optimization and analysis of coal seams gasification. They can also be a point of reference for more advanced geomechanical simulations.

Keywords: *underground coal gasification, gasifier, rock mass, stratification cavities, goaf*

1. ВВЕДЕНИЕ

Обрушения пород в подземном газогенераторе происходят под действием двух факторов. Первичным фактором является горное давление, имеющее место в период строительства и эксплуатации подземного газогенератора. Второй фактор – высокая температура процесса газификации угольного пласта в период эксплуатации газогенератора. Эти два фактора приводят к разрушению пород кровли и почвы выгазовываемого пласта (Vorobiev, Morris, Antoun & Friedmann, 2013). Сопротивление обожженной непосредственной

кровли изгибу после первого обрушения равно нулю (Koponenko & Khomenko, 2010). Этот факт говорит о том, что под воздействием горного давления породы кровли еще до обжига теряют сплошность.

Механизм поведения породного массива при подземной газификации во многом схож с процессами, сопровождающими очистную выемку угля при подземной разработке (Morris, Buscheck & Hao, 2009). Поэтому целесообразно провести исследование напряженно деформированного состояния пород вокруг подземного газогенератора на основе закономерностей сдвига породугольного массива.

Вопросы образования полостей расслоения в породугольном массиве на контактах породных слоев при их подработке нашли освещение в работах ученых И.М. Печука, Л.В. Савенко, С.Г. Авершина, А.В. Савостьянова, М.П. Зборщика и других, а также А. Лабасса, Я. Штюффена (Голландия), Н. Вебера, Д. Форстмана, К. Паттейского (Германия) и др.

Образование полостей расслоения большинством авторов рассматривается как следствие сдвига горных пород при разработке пластов (Dychkovskiy, Falshtynskiy, Lozynskiy & Saik, 2015). Выполненные исследования носят в основном описательный характер, количественная и качественная зависимость характера воображения сдвига породных слоев с учетом горнотехнического фактора и времени мало изучена и требует уточнения (Wachowicz, Łączny, Iwaszenko, Janoszek & Cempa-Balewicz, 2015).

Деформированное состояние массива горных пород основывается на теории пластичности, упругости и предельного равновесия (Savostianov & Klochkov, 1992). Породоугольный массив представляется в виде сплошной среды, сдвиг пород в нем происходит без нарушения целостности массива (Lozynskiy, Dychkovskiy, Falshtynskiy & Saik, 2015). Очистные выработки представляются в виде щелей (Astafiev & Sharovalov 2013). Как предельные условия в определенных случаях используются шахтные исследования сдвига породугольного массива или поверхности, а также предельные углы сдвига (Bhutto, Bazmi & Zahedi, 2013; Den'gina, Kazak & Pristash, 1993).

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОЛОСТЕЙ РАССЛОЕНИЯ

Для определения параметров полостей расслоения породной толщи над подземным газогенератором приняты горно-геологические условия бурогоугольного пласта марки БЗ месторождения Legnica Polnoc (Польша): глубина залегания – 102 м, мощность пласта – 4 м, влажность – 25 – 27%, фильтрационная способность – 0.26 – 0.31 Д, ожидаемый суммарный приток воды в выработанное пространство подземного газогенератора – 4.3 – 8.5 м³/ч.

Кровля пласта представлена на участках брекчий, лессами, глинами, пропластками бурого угля и песками, из которых 8.5 – 10.7% прилегают к угольному пласту; газопроницаемость надугольной толщи составляет 0.11 – 0.24 Д. Почва пласта представлена песками, которые составляют 11.2 – 16.4% всей подстилающей породной толщи, состоящей из глин, лессов и пропластков бурого угля с общей фильтрационной способностью 0.18 – 0.27 Д.

При скважинной подземной газификации бурогоугольного пласта марки БЗ породы непосредственной кровли у огневого забоя подземного газогенератора испытывают влияния высоких температур (Yang, Sarhosis & Sheng, 2014; Otto & Kempka, 2015). Величина температуры газификации бурогоугольного пласта изменяется по длине реакционного канала (Perkins & Sahajwalla, 2007). Максимум температур (1050 – 1200°С) наблюдается на границе перехода окислительной зоны в восстановительную (Falshtynskiy, Dychkovskiy, Lozynskiy & Saik, 2013) (Рис. 1).

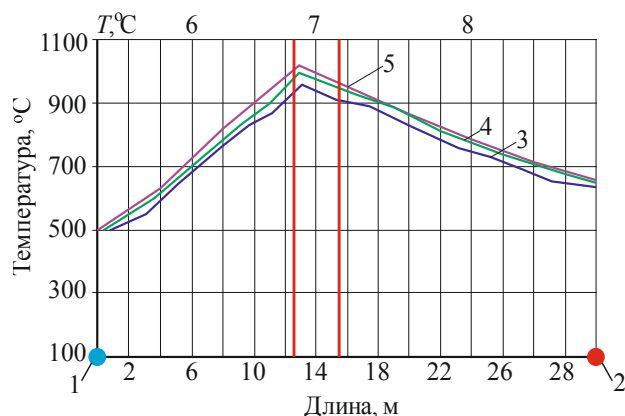


Рисунок 1. Параметры распределения температур по длине реакционного канала газогенератора в зависимости от состава дутья при газификации угольного пласта: 1 – дутьевая скважина; 2 – газоотводящая скважина; 3 – паровоздушное дутье; 4 – воздушное дутье; 5 – воздушно-кислородное дутье; 6 – зона окисления; 7 – зона перехода; 8 – зона восстановления

Поэтому породы нижнего слоя кровли, по длине огневой канала, подвержены разным термоупругим напряжениям. Такая же ситуация наблюдается и в выгазованном пространстве (Kapusta, Stańczyk, Wiątownski & Chećko, 2013).

При определении напряженно-деформированного состояния пород кровли подземного газогенератора следует учитывать мощность слоя золы m_z , оставшегося в выгазованном пространстве после газификации. Таким образом, высота зоны обрушения при газификации угольного пласта может быть определена из выражения:

$$h_{об} = \frac{m - h_c - m_z}{(K_p + K_e) - 1}, \text{ м}, \quad (1)$$

где:

- m – вынимаемая мощность пласта, м;
- m_z – мощность слоя золы, м;
- h_c – предел свободного опускания кровли, м;
- K_e – средний коэффициент вспучивания пород;
- K_p – коэффициент разрыхления пород.

Коэффициент разрыхления пород кровли при газификации пласта зависит от его пласта и структуры пород, а также от мощности слоя золы, наличия в кровле и почве пласта пород, склонных к вспучиванию при высоких температурах. Коэффициент вспучивания угольного пласта зависит от химического состава вмещающих пород: SiO₂ – 75.8%; Al₂O₃/SiO₂ – 0.29%; С – 0.88%. Учитывая полученные данные по коэффициентам вспучивания K_e и разрыхления K_p пород почвы и кровли угольного пласта $K_e = 1.32 – 1.544 > K_p = 1.12 – 1.15$ можно сделать вывод о существенном влиянии на самозаполнение выработанного пространства газогенератора вспученными породами.

При подземной газификации бурогоугольного пласта происходит его выгазирование по мощности с опережением верхней части пласта по отношению к нижней, что создает условия более упорядоченного обрушения пород ввиду постепенного развития де-

формаций, которые увеличиваются по мере газификации угольного пласта (Falshtynskiy, Dychkovskiy, Lozynskiy & Saik, 2013). Деформации пород, вмещающих подземный газогенератор, несущественно отличаются от шахтных условий и характеризуются отсутствием нижней зоны беспорядочных обрушений пород кровли.

Горизонтальные подвижки слоистого массива зависят от мощностей породных слоев и слоя золы, что подтверждается инструментальными наблюдениями в шахтных условиях, а также при эксплуатации и вскрытии подземных газогенераторов и колеблются в пределах 0.05 – 0.3 м. Такие смещения породных слоев могут вызвать трудности при эксплуатации скважин подземного газогенератора, поскольку скважины при горизонтальных смещениях породных слоев могут быть срезаны и выведены из строя.

В ряде работ, посвященных упругим свойствам горных пород при воздействии на них высоких температур, в ходе лабораторных и стендовых исследований установлено изменение плотности пород под воздействием высокотемпературного прогрева (Wolf & Bruining, 2007). В результате исследований замечено увеличение объема пород на 1 – 5% от первоначального, при этом модуль упругости изменяется на 5 – 18%. Вследствие термодинамических нагрузок, с повышением температур, будет изменяться по линейному закону модуль деформации E слоя пород (глина) кровли, непосредственно прилегающего к огневому забою (Рис. 2).

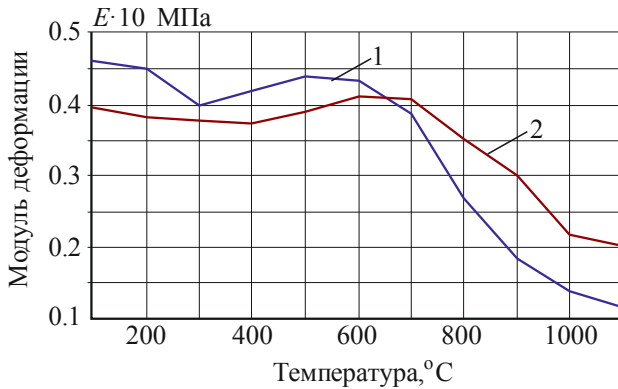


Рисунок 2. Изменение модуля деформации E слоя пород (0.3 – 0.45 м от огневого забоя) в зависимости от степени прогрева нижнего слоя непосредственной кровли и почвы бурогоугольного пласта: 1 – глины; 2 – лессы

В дальнейших расчетах напряженно-деформированного состояния нижней породной пачки непосредственной кровли следует учитывать изменения модуля упругости. Коэффициент упругости будет изменяться с учетом поправки коэффициента температурного воздействия $K_T = 1.05 – 1.4$.

Причинами разрушения породного слоя являются нормальные нагрузки, силы трения, изгибающий момент и касательные напряжения от поперечных сил (Savostianov & Klochkov, 1992).

Напряжения от изгибающего момента G , сил трения t_{mp} и касательные от поперечных сил $\tau_{изз}$ находятся из выражений:

$$G_{сж} = \frac{12 \cdot E_0 \cdot M_x}{En \cdot K_T h^3} \cdot m_H \cdot y; (0 < y < m_H \cdot h), \quad (2)$$

$$G_p = \frac{12 \cdot E_0 \cdot M_x}{En \cdot K_T h^3} \cdot (1 - m_H) \cdot y; (0 < y < (1 - m_H) \cdot h), \quad (3)$$

$$S = \frac{(S_2 - S_n) \cdot (a + d_0 - x)}{a + d_0} + S_n; a \leq x \leq (a + d_0), \quad (4)$$

$$S = \frac{S_2 \cdot x}{a}; 0 \leq x \leq a, \quad (5)$$

$$t_{mp} = \frac{\Delta x \cdot S}{a + d_0}, \quad (6)$$

$$\tau_{изз} = \frac{a \cdot x}{K_T \cdot h}. \quad (7)$$

Суммарные напряжения G определяются с учетом напряжений, вызванных распором. Напряжения со знаком (-) сжимающие, а со знаком (+) растягивающие:

$$G_y = S + (\Delta G_{сж} \cdot G_p), \quad (8)$$

$$G_x = \Delta S + (G_{сж} \cdot G), \quad (9)$$

$$\tau_{xy} = t_{mp}. \quad (10)$$

Состояние пород слоя определяется по главным напряжениям $G_1 G_2$ и по критерию сопротивления пород одноосному сжатию SPR :

$$G_1 G_2 = \frac{G_x + G_y}{2} \pm \sqrt{(G_x + G_y)^2 - 4\tau_{xy}^2}, \quad (11)$$

$$\tau_{max} = \frac{G_1 - G_2}{2}, \quad (12)$$

$$SPR = \frac{\sqrt{[1 - \psi] \cdot (G_1 - G_2)^2 + \psi \cdot (G_1 - G_2)^2 - (1 - \psi) \cdot (G_1 - G_2)}}{2x}. \quad (13)$$

Условия разрушения пород кровли проверяются следующим образом: $SPR > R_{сж}$ и $\tau_{max} > R_{сж}$.

Поперечные силы над серединой подземного газогенератора отсутствуют, нормальные нагрузки незначительны, а состояние пород массива зависит от изгибающего момента, вызывающего напряжение по напластованию $\lambda G_{сж}$, λG_p и перпендикулярно ему $G_{сж}$, G_p . За счет собственного веса и от изгибающего момента в породном слое возникают напряжения на отрыв перпендикулярно напластованию (Falshtynskiy, Dychkovskiy, Lozynskiy & Saik, 2012).

Согласно принятой физической модели и расчетной схеме, определяются напряжения в различных сечениях породного слоя, поперечные силы Q_x и изгибающий момент M_x из уравнений:

$$Q_x = B_{1k} \cdot \sin \frac{\pi}{L} x + B_{1k} \cdot \sin \frac{2\pi}{L} x, \quad (14)$$

$$M_x = 0.16 \cdot L \cdot [B_{1k} \cdot (\cos \frac{\pi}{L} x + \sin \frac{\pi}{L} x - 1) +$$

$$+ \frac{B_{2k}}{2} \cdot \left(\cos \frac{2\pi}{L} x + \sin \frac{2\pi}{L} x - 1 \right). \quad (15)$$

Образование вертикальных трещин определяется по деформациям пород через горизонтальные перемещения N_x , рассчитанные для двух смежных сечений по формулам:

$$N_x = 1.2 \cdot \frac{L^2}{K_T h_{cl}^3 \cdot f(k)} \left[B_{1k} \cdot \sin \frac{\pi}{L} x + \frac{B_{2k}}{4} \cdot \sin \frac{2\pi}{L} x \right], \quad (16)$$

$$\xi = \frac{(N_2 - N_1)}{(x_2 - x_1)} \cdot 1000. \quad (17)$$

Опускания породного слоя Y_x определяются из выражения:

$$Y_x = 0.4 \cdot \frac{L^3}{K_T h_{cl}^3 \cdot F(k)} \times \left[B_{1k} \cdot \left(\cos \frac{\pi}{L} x - 1 \right) + \frac{B_{2k}}{8} \cdot \left(\cos \frac{2\pi}{L} x - 1 \right) \right]. \quad (18)$$

Натурными измерениями смещений установлено, что при деформации $\varepsilon > 5$ мм/м наблюдается образование вертикальных трещин в породных слоях массива. Основными видами нарушения сплошности пород, обуславливающими поведение массива, является расслоение по ослабленным контактам за счет отрыва под действием собственного веса или изгибающего момента над серединой газогенератора.

Прочность пород на отрыв по нормали к напластованию пород кровли зависит от глубины разработки, наличия в породах на полостях напластования ослабленных контактов и прослоев. Определяется коэффициентом DR :

$$DR = (B - \Gamma \cdot H \cdot 10^{-6}), \quad (19)$$

где B и Γ – коэффициенты, зависящие от литологической разности пород, МПа.

По мере удаления от огневого забоя полость выгазовывания будет смыкаться. В результате образуются две полости, примыкающие к выработанному пространству и массиву. Образование двух полостей представлено на Рисунке 3.

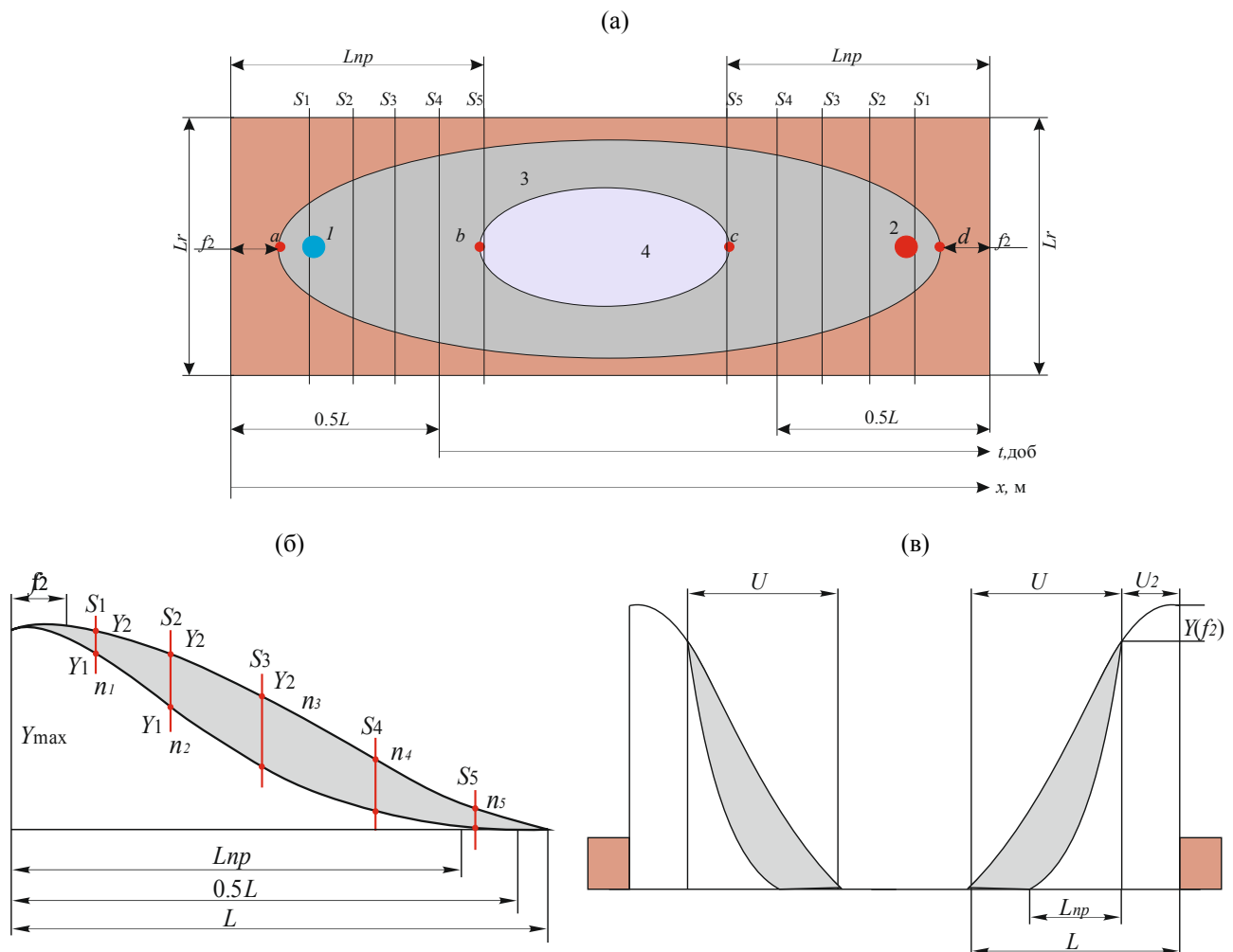


Рисунок 3. Образование двух полостей выгазовывания при смыкании полости над серединой выгазованного пространства: (а) условия формирования полости выгазовывания над газогенератором в динамике (сечения $S_1 - S_5$); (б) закрытая полость с параметрами зоны защемления и размеров полости (сечения $S_1 - S_5$); (в) формирование двух полостей при закрытии полости в сечении S_5 ; 1 – дутьевая скважина; 2 – газоотводящая скважина; 3 – полость выгазованного пространства; 4 – закрывающаяся полость выгазованного пространства газогенератора

Зная характер распределения нагрузок на слои, определяем пространственные смещения породной толщи по мере газификации бурогоугольного пласта.

Ширина полостей u' определяется из выражения

$$u' = L - f_2, \quad (20)$$

где:

L – предельный полупролет пород непосредственной кровли, м;

f_2 – ширина опорной зоны на уровне непосредственной кровли, м.

Определяем площадь полости выгазовывания исходя из рассматриваемых сечений $S_1 - S_5$, при $l \leq y_{\max}$:

$$S_n = n_b \cdot u_n \cdot \frac{1}{2}. \quad (21)$$

На Рисунке 4 показаны параметры формирования открытой (а) и закрытой (б) полостей выгазовывания.

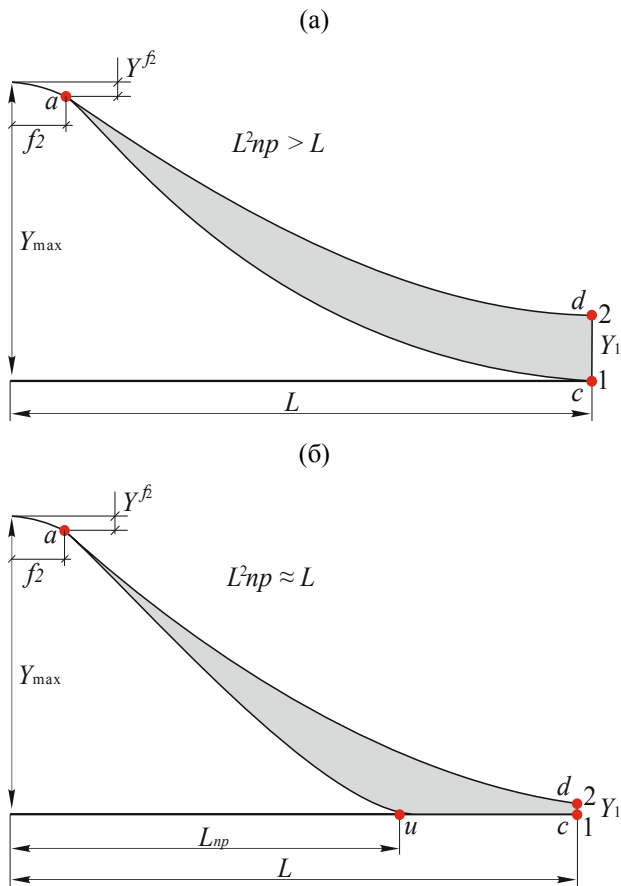


Рисунок 4. Формирование полостей расслоения при газификации угольного пласта: (а) открытая полость; (б) закрытая полость

Площади полостей определяются из выражений:

– вариант (а):

$$S_r = (L - d_2) \cdot (\gamma_1 - \gamma_2) \cdot \frac{1}{2}, \quad (22)$$

– вариант (б):

$$S_{ADC} = (L - f_2) \cdot (\gamma_1 - \gamma_2) \cdot \frac{1}{2}, \quad (23)$$

$$S_{ABC} = \frac{1}{2} (\gamma_{\max} - \gamma^{f_2}) \cdot (L - l_{np}), \quad (24)$$

где:

S_{ADC} – площадь закрывающейся полости по треугольнику ADC , m^2 ;

S_{ABC} – площадь закрытой полости по треугольнику ABC , m^2 ;

L – полная длина полупролета рассматриваемого слоя (2-го верхнего слоя), м;

f_2 – ширина опорной зоны на уровне почвы, м;

d_2 – расстояние от конца опорной зоны до точки формирования полости, м;

y_2^f – опускание слоев до точки расслоения, м;

S_r – площадь открытой полости, m^2 ;

l_{np} – предельный полупролет основной кровли, м;

y_1 и y_2 – опускания породных слоев от начала координат, мм.

Объем полости после выгазовывания пласта определяется из параметров, представленных на Рисунке 5.

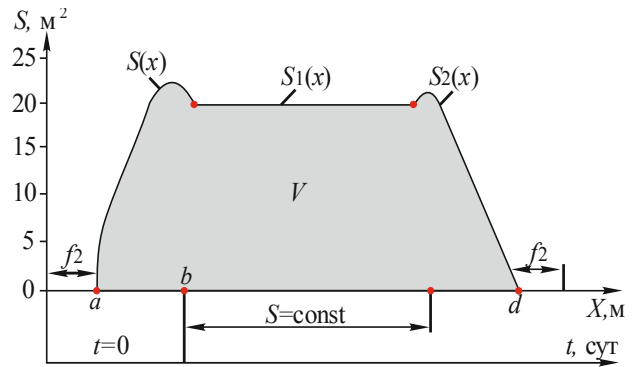


Рисунок 5. Графическая схема к определению объема полости после выгазовывания пласта в подземном газогенераторе

Исходя из построенной графической схемы, находим объем полости выгазовывания, сформированной из трех геометрических фигур:

$$V = \int_a^b S(x) dx + 2S_1(x)bc + \int_c^d S_2(x) dx. \quad (25)$$

Разность между максимальными опусканиями слоев породы определяет максимальную высоту полости выгазовывания пласта:

$$W' = y_1(x) - y_2(x). \quad (26)$$

Для установления закономерностей формирования полостей расслоения и поведения основной и непосредственной кровли при выгазовывании бурогоугольного пласта в условиях месторождения Legnica Polnoc (Польша) был выбран стратиграфический разрез по скважинам (Nowak & Kudelko, 2012) который являлся наиболее характерный для породной толщи, вмещающей газифицируемый угольный пласт марки БЗ.

Способ подготовки подземного газогенератора наклонными скважинами с учетом формирования выгазованного пространства и полостей расслоения пород кровли представлены на Рисунке 6, 7.

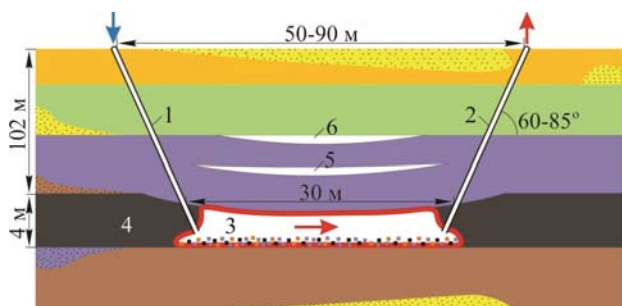


Рисунок 6. Способ подготовки подземного газогенератора: 1 – дутьевая наклонная скважина; 2 – газоотводящая наклонная скважина; 3 – канал подземного газогенератора; 4 – буроголистый пласт, 5 – брекчия; 6 – битуминовые глины; 7 – глина; 8 – пески

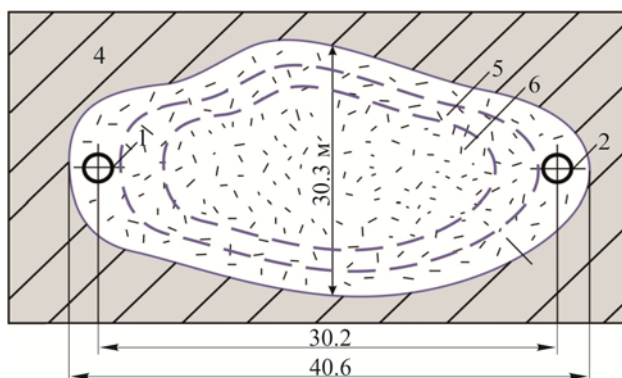


Рисунок 7. Формирования выгазованного пространства и полостей расслоения в породах непосредственной и основной кровли при газификации буроголистого пласта: 1, 2 – дутьевая и газоотводящая скважины; 3 – выгазованное пространство; 5, 6 – полости расслоения

Согласно результатам расчета, в 5 и 11 м над угольной толщиной по нормали от пласта формируются полости расслоения (Табл. 1) с отставанием от огневого забоя на 1.4 – 1.95 м.

Таблица 1. Физические параметры эиор нагрузки, опускания и напряжения при изгибе нижней пачки породного слоя непосредственной кровли

Физические параметры, МПа			Опускания нижней пачки пород кровли, мм			Напряжения, МПа			Длина забоя, м	Подвижные забоя, м/сут
S_1	S_2	Z_1	над забоем	2.0 м	22.6 м	$G_{сж}$	G_p	Φ_{max}	L	V
5.8	2.6	0.35	497.8	1091	3475.4	17.4	3.51	0.72	30	1.1
6.4	3.1	0.62	453.5	1044	3342.6	19.5	5.42	1.03	30	1.6
7.3	4.6	0.98	412.1	998	3230.7	21.8	6.83	1.16	30	2

Породы слоя кровли и почвы, непосредственно прилегающие к огневому забую газогенератора, склонны к вспучиванию под воздействием высоких температур. Это обуславливается наличием химических компонентов в породах кровли: SiO_2 – 70%, Al_2O_3/SiO_2 – 0.29%, C – 1.52%, что характеризуется коэффициентом вспучивания $K_B = 1.52$. Уменьшение опускания породного слоя также обусловлено наличием зольного остатка мощностью 0.31 – 0.38 м.

При данных условиях будет наблюдаться обрушение породного слоя кровли с расслоением и растрес-

Форма полостей подковообразная, подвигание полостей – вслед за огневом забоем, при этом их ширина изменяется в пределах 13.5 – 8.4 м. В выгазованном пространстве в 18 – 23 м от огневого забоя нормальные нагрузки близки к силам гравитации. Основная кровля буроголистого пласта представлена лессами и глинами мощностью 5.8 – 7.4 м, крепостью $f = 1 - 1.2$. Модуль деформации пород, составляющих основную кровлю в массиве – $E_0 = 1.16 \cdot 10^4$ МПа, над выгазованным пространством – $E_n = 0.49 \cdot 10^4$ МПа, а полный полупролет подземного газогенератора – $L = 24.1 - 22.6$ м.

Анализируя результаты математического моделирования напряженно-деформированного состояния пород основной кровли, можно констатировать, что опускания над огневом забоем при заданных технологических параметрах составляют 412.1, 453.5 и 497.8 мм, максимальные опускания в сечении 22.6 м 3475.4 мм. Горизонтальные перемещения в рассматриваемом породном слое над огневом забоем – 182.6 мм, максимальные в 5.2 м от огневого забоя – 318.9 мм. Горизонтальные деформации в породах основной кровли составляют 6.5 – 8.2 мм/м, что приводит к образованию вертикальной трещиноватости с интенсивностью 6 – 13 трещин на 1 п.м. При сопротивлении пород на сжатие 10 МПа, на скальвание 3.4 МПа и на отрыв 0.1 МПа будет наблюдаться обрушение породного слоя. Породный слой, залегающий непосредственно над пластом бурого угля, представлен глинами и сланцем крепостью $f = 1 - 1.3$, мощностью 2.7 – 3.2 м, который при опускании расслаивается на две породные пачки 2.0 – 1.3 м.

Математическая модель напряженно-деформированного состояния пород непосредственной кровли учитывает механические свойства пород и технологические параметры газификации угольного пласта. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния нижней пачки породного слоя непосредственной кровли при выгазовывании буроголистого пласта приведены в Таблице 1.

квиванием его под действием горного давления и высоких температур. При отсутствии крепления в подземном газогенераторе опускания пород кровли в 2.0 м от забоя достигнут 1072 мм, а в 22.6 м – 3475.4 мм. В этой точке кровля сомкнется с зольным остатком на почве, что приведет в дальнейшем к формированию зоны реакций в выгазованном пространстве.

Ширина выгазованного пространства подземного газогенератора с учетом максимального значения коэффициента реагирования бурого угля $K_{p,y} = 0.753$ составит:

$$h = l \cdot K_{p,y} \cdot 40.2 \cdot 0.753 = 30.3, \text{ м}, \quad (27)$$

где:

l_e – длина реакционного канала подземного газогенератора с учетом выгазованного пространства у скважин, $l_e = 40.2$ м.

Результаты расчетов параметров выгазованного пространства подземного газогенератора с учетом остаточной золы $m_3 = 0.29 - 0.38$ м и коэффициента вспучивания пород непосредственной кровли $K_B = 1.32 - 1.54$ представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Параметры выгазованного пространства и полостей расслоения в породах кровли при газификации буроугольного пласта

Длина огневого канала подземного газогенератора, м	Скорость подвигания огневого забоя, м/сут								
	1.1			1.6			2.0		
	h_{\max} , мм	Vp_{\max} , м ³	Vp_{\min} , м ³	h_{\max} , мм	Vp_{\max} , м ³	Vp_{\min} , м ³	h_{\max} , мм	Vp_{\max} , м ³	Vp_{\min} , м ³
30	выгазованное пространство – 3								
	1565	1759	753	1784	1804	817	1813	1868	1005
	полость расслоения – 5								
	812	1064	479	985	1214	538	1105	1250	582
	полость расслоения – 6								
	397	655	283	461	729	372	596	846	407
25	выгазованное пространство – 3								
	1420	1602	712	1456	1658	747	1494	1740	853
	полость расслоения – 5								
	561	724	270	596	915	383	680	1012	418
	полость расслоения – 6								
	288	441	218	357	634	246	439	707	281

В ходе аналитических исследований установлены параметры полости выгазовывания и полостей расслоения в породах кровли над подземным газогенератором, подготовленным наклонными эксплуатационными скважинами с учетом горно-геологических условий и технологических параметров выгазовывания угольного пласта (Рис. 8).

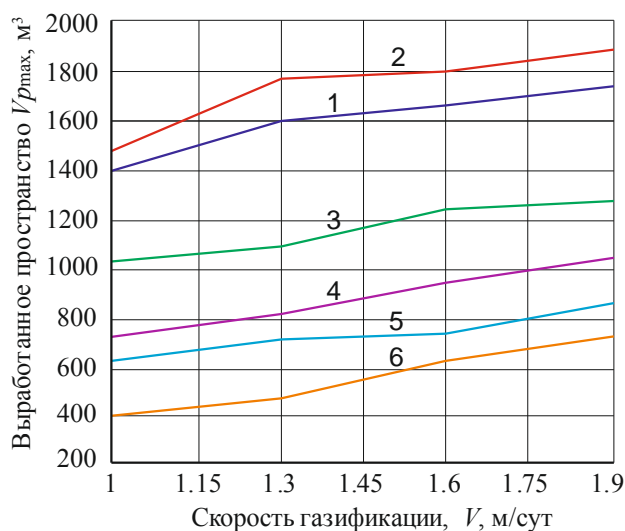


Рисунок 8. Максимальные параметры выработанного пространства и полостей расслоения в породной толще над газогенератором в зависимости от длины реакционного канала и скорости газификации буроугольного пласта: 1, 4, 6 – длина реакционного канала 25 м; 2, 3, 5 – длина реакционного канала 30 м

Опускания земной поверхности в условиях применения инъекционной закладки при газификации слоя буроугольного пласта определяются из выражения:

$$\Delta h = m - (K_{cp,y} + m_3) \cdot K_e \cdot K_p, \quad (28)$$

где:

Δh – опускание земной поверхности при газификации угольного пласта, м;

m – мощность слоя бурого угля, $m = 4$ м;

$K_{cp,y}$ – усредненный коэффициент усадки массива, $K_{cp,y} = 1.15$;

m_3 – мощность золоостатка, $m_3 = 0.38$ м;

K_e – коэффициент вспучивания пород, $K_e = 1.52$;

K_p – коэффициент разрыхления, $K_p = 1.14$.

Подставим в уравнение значения, характерные при газификации буроугольного пласта БЗ:

$$\Delta h = 4 - (1.05 + 0.38) \cdot 1.52 \cdot 1.14 = 1.52, \text{ м}. \quad (29)$$

Опускание земной поверхности при газификации слоя буроугольного пласта составит 1.52 м без закладки деформированных пород и выгазованного пространства газогенератора.

Неоднородность слоистого массива, сложный математический аппарат теории пластичности и упругости дают приближенное описание поведения горного массива при ведении очистных работ. Моделирование сплошного слоистого горного массива не дает возможности учитывать горно-геологические факторы, например, прочность пород, мощность породных слоев, расположение в толще породного массива, трещиноватость и т.д.

3. ВЫВОДЫ

Под воздействием температур, возникающими в процессе газификации, породы кровли и почвы пласта вспучиваются, увеличиваясь в объеме, кроме того в зависимости от зольности пласта на почве газогенератора остается зольный остаток. Все эти факторы оказывают влияние на параметры области деформации пород вокруг подземного газогенератора.

Установленные параметры напряжено-деформированного состояния породугольной толщи, выгасованного пространства и полостей расслоения при выгасовывании буроугольного пласта позволяют определить параметры деформации дневной поверхности над газогенератором.

Определив параметры выгасованного пространства и зон расслоения породной толщи над ним, разрабатываются параметры закладочных работ с целью обеспечения герметичности газогенератора, надежности и адаптивности процесса газификации, предотвращения деформаций на дневной поверхности газогенератора.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках реализации проекта: "Development the technical parameters and technologies of borehole underground coal seams gasification at shallow depths" No 0109U004382, по обоснованию целесообразности технологии СПГУ для условий буроугольного месторождения Западной Польши.

REFERENCES

- Astafiev, D., & Shapovalov, Y. (2013). On the question of implementation prospects of selective mining for exploitation unconditional coal seams. *Mining Of Mineral Deposits*, 313-317. <http://dx.doi.org/10.1201/b16354-58>
- Bhutto, A., Bazmi, A., & Zahedi, G. (2013). Underground coal gasification: From fundamentals to applications. *Progress In Energy And Combustion Science*, 39(1), 189-214. <http://dx.doi.org/10.1016/j.peccs.2012.09.004>
- Den'gina, N., Kazak, V., & Pristash, V. (1993). Changes in rocks at high temperatures. *Journal of Mining Science*, 29(5), 472-477. <http://dx.doi.org/10.1007/bf00733026>
- Dychkovskiy, R., Falshtynskiy, V., Lozynskiy, V., & Saik, P. (2015). Development the concept of borehole underground coal gasification technology in Ukraine. *New Developments in Mining Engineering 2015*, 91-95. <http://dx.doi.org/10.1201/b16354-23>
- Falshtynskiy, V., Dychkovskiy, R., Lozynskiy, V., & Saik, P. (2013). Justification of the gasification channel length in underground gas generator. *Mining of Mineral Deposits*, 125-132. <http://dx.doi.org/10.1201/b19901-18>
- Falshtynskiy, V., Dychkovskiy, R., Lozynskiy, V., & Saik, P. (2013). Determination of the Technological Parameters of Borehole Underground Coal Gasification for Thin Coal

- Seams. *Journal of Sustainable Mining*, 12(3), 8-16. <http://dx.doi.org/10.7424/jsm130302>
- Falshtynskiy, V., Dychkovskiy, R., Lozynskiy, V., & Saik, P. (2012). New method for justification the technological parameters of coal gasification in the test setting. *Geomechanical Processes during Underground Mining: School of Underground Mining 2012*, 201-208. <http://dx.doi.org/10.1201/b13157-35>
- Kapusta, K., Stańczyk, K., Wiatowski, M., & Čečko, J. (2013). Environmental aspects of a field-scale underground coal gasification trial in a shallow coal seam at the Experimental Mine Barbara in Poland. *Fuel*, 113, 196-208. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.015>
- Kononenko, M., & Khomenko, O. (2010). Technology of support of workings near to extraction chambers. *New Techniques and Technologies in Mining*, 193-197. <http://dx.doi.org/10.1201/b11329-32>
- Lozynskiy, V.H., Dychkovskiy, R.O., Falshtynskiy, V.S., & Saik, P.B. (2015). Revisiting possibility to cross disjunctive geological faults by underground gasifier.. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (4), 22-27.
- Morris, J.P., Buscheck, T.A., & Hao, Y. (2009). Coupled geomechanical simulations of UCG cavity evolution. In *Proceedings of the 2009 International Pittsburgh Coal Conference, Pittsburgh PA*.
- Nowak, J., & Kudelko, J. (2012). LGOM region as a perspective power energy basin and implementation of innovative lignite development methods. *Mineral Economics*, 25(2-3), 65-70. <http://dx.doi.org/10.1007/s13563-012-0024-y>
- Otto, C., & Kempka, T. (2015). Thermo-Mechanical Simulations of Rock Behavior in Underground Coal Gasification Show Negligible Impact of Temperature-Dependent Parameters on Permeability Changes. *Energies*, 8(6), 5800-5827. <http://dx.doi.org/10.3390/en8065800>
- Perkins, G., & Sahajwalla, V. (2007). Modelling of Heat and Mass Transport Phenomena and Chemical Reaction in Underground Coal Gasification. *Chemical Engineering Research And Design*, 85(3), 329-343. <http://dx.doi.org/10.1205/cherd06022>
- Savostianov, A.V., & Klochkov, V.H. (1992). *Upravlenie sostoyaniem massiva hornyh porod* (p. 276). Dnipropetrovsk: National Mining University.
- Vorobiev, O.Y., Morris, J.P., Antoun, T.H., & Friedmann, S.J. (2008). Geomechanical simulations related to UCG activities. *International Pittsburgh Coal Conference, Pittsburgh, PA*.
- Wachowicz, J., Łączny, J., Iwaszenko, S., Janoszek, T., & Cempa-Balewicz, M. (2015). Modelling of Underground Coal Gasification Process Using CFD Methods / Modelowanie Procesu Podziemnego Zgazowania Węgla Kamiennego Z Zastosowaniem Metod CFD. *Archives Of Mining Sciences*, 60(3). <http://dx.doi.org/10.1515/amsc-2015-0043>
- Wolf, K., & Bruining, H. (2007). Modelling the interaction between underground coal fires and their roof rocks. *Fuel*, 86(17-18), 2761-2777. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2007.03.009>
- Yang, D., Sarhosis, V., & Sheng, Y. (2014). Thermal-mechanical modelling around the cavities of underground coal gasification. *Journal Of The Energy Institute*, 87(4), 321-329. <http://dx.doi.org/10.1016/j.joei.2014.03.029>

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Подземная газификация угля, как комплексный и технически сложный процесс, во многих аспектах требует поддержки, оказываемой с помощью компьютерного моделирования или аналитических расчетов поведения горного массива. Однако, чрезвычайно мало известно о формировании полостей расслоения в породах кровли при подземной газификации угля. В исследовании формирования полостей расслоения и деформаций горных пород горным давлением, где методы расчета базируются на гипотезах или статистической информации, используется ряд гипотез. Основная цель заключается в изучении поведения горного массива и формировании полостей расслоения при подземной газификации угля мощного угольного пласта.

Методика. В качестве методики исследования в настоящей работе были использованы аналитические расчеты. В статье на основе теории упругости, устойчивости и максимального равновесия разработана и использована математическая модель напряженно-деформированного состояния горного массива.

Результаты. Анализ геомеханических моделей газификации угля вместе с их математическим формулированием является основным результатом, описанным в данной статье. Приведены уравнения для обоснования параметров полостей расслоения над выработанным пространством подземного газогенератора. Соответственно, рассчитаны объемы полостей расслоения в зависимости от длины реакционного канала. Результаты оказывают значительное влияние на подготовку газогенераторов и конечную эффективность процесса газификации.

Научная новизна. В работе представлены результаты, полученные путем аналитических расчетов поведения горного массива в процессе газификации мощных угольных пластов. Авторами реализована математическая модель на основе метода, предложенного проф. А. Савостяновым, который был использован при проведении расчетов.

Практическая значимость. Полученные данные служат отправной точкой для дальнейших исследований и аналитических расчетов поведения горного массива. Результаты, приведенные в статье, могут быть полезны при проведении предварительной оптимизации и анализе газификации угольных пластов, а также являться базисом для обоснования более продвинутых геомеханических моделей.

Ключевые слова: газификация, газогенератор, горный массив, полости расслоения, выгазованное пространство

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Підземна газифікація вугілля, як комплексний і технічно складний процес, у багатьох аспектах вимагає підтримки, яка надається за допомогою комп'ютерного моделювання або аналітичних розрахунків поведінки гірського масиву. Проте, дуже мало відомо про формування порожнин розшарування в породах покрівлі при підземній газифікації вугілля. У дослідженні формування порожнин розшарування і деформацій гірських порід гірським тиском, де методи розрахунку базуються на гіпотезах або статистичній інформації, використовується ряд гіпотез. Основна мета полягає у вивченні поведінки гірського масиву і формування порожнин розшарування при підземній газифікації вугілля потужного вугільного пласта.

Методика. В якості методики дослідження для представленої роботи були використані аналітичні розрахунки. В статті на основі теорії пружності, стійкості і максимальної рівноваги розроблена і використана математична модель напружено-деформованого стану гірського масиву.

Результати. Аналіз геомеханічних моделей газифікації вугілля разом з їх математичним формулюванням є основним результатом, що представлений в даній статті. Представлені рівняння для обґрунтування параметрів порожнин розшарування над виробленим простором підземного газогенератора. Відповідно, розраховані об'єми порожнин розшарування в залежності від довжини реакційного каналу. Результати мають значний вплив на підготовку газогенераторів і кінцеву ефективність процесу газифікації.

Наукова новизна. У роботі представлені результати, що були отримані з аналітичних розрахунків поведінки гірського масиву в процесі газифікації потужних вугільних пластів. Авторами реалізована математична модель, на основі методу, запропонованого проф. О. Савостяновим, що був представлений для проведення розрахунків.

Практична значимість. Отримані дані служать відправною точкою для подальших досліджень і аналітичних розрахунків поведінки гірського масиву. Результати, наведені в статті, можуть бути корисні при проведенні попередньої оптимізації та аналізі газифікації вугільних пластів, а також бути базисом для обґрунтування більш просунутих геомеханічних моделей.

Ключові слова: газифікація, газогенератор, гірський масив, порожнини розшарування, вигазований простір

ARTICLE INFO

Received: 24 September 2015

Accepted: 29 October 2015

Available online: 30 March 2016

ABOUT AUTHORS

Volodymyr Falshtynskyi, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Underground Mining Department, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 4/62, 49006, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: fvs@yahoo.com

Vasyl Lozynskyi, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Underground Mining Department, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 4/61, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: lvg.nmu@gmail.com

Pavlo Saik, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Underground Mining Department, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 4/63, 49006, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: saik_pb@i.ua

Roman Dychkovskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Underground Mining Department, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 4/61, 49006, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: dichre@yahoo.com

Mykola Tabachenko, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Underground Mining Department, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 4/61, 49006, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: tabachenko@i.ua