

TOMASZ JANOSZEK

Symulacja numeryczna możliwości prowadzenia procesu podziemnego zgazowania pokładów węgla w Kopalni Doświadczalnej „Barbara”

W artykule zaprezentowano wyniki symulacji numerycznej dotyczącej możliwości prowadzenia procesu podziemnego zgazowania rzeczywistej parceli węgla znajdującej się na obszarze Kopalni Doświadczalnej „Barbara”. Celem prowadzonych analiz była predykcja czynników procesowych, które warunkują uzyskanie gazu procesowego bogatego w wodór w zależności od zastosowanego czynnika zgazowującego. Przedstawiono geometrię georeaktora, założenia budowy modelu numerycznego oraz ilościowe i jakościowe rezultaty prowadzonych badań modelowych.

Słowa kluczowe: model numeryczny, podziemne zgazowanie węgla

1. WSTĘP

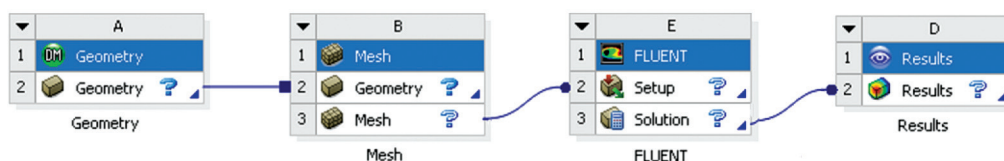
Technologia podziemnego zgazowania (PZW) jest procesem termochemicznym polegającym na przeobrażeniu masy węglowej w warunkach *in situ*, czyli bezpośrednio w miejscu jego zalegania pod ziemią, do postaci gazu o określonym składzie chemicznym i kaloryczności. Najczęściej realizowaną w praktyce metodą udostępniania pokładu węgla do procesu PZW jest wykonanie przelotowych kierunkowych otworów wierconych, które często w literaturze [2] określane są jako otwory generatorowe, otwory przelotowe lub kanał ogniowy (zgazowujący). Metoda otworów wierconych sprowadza się do wykonania otwartego kanału w bloku węgla o określonej długości w kształcie walca. Wykonany w ten sposób kanał ogniowy spełnia dwie podstawowe funkcje, a mianowicie umożliwia doprowadzenie substratów w postaci mieszaniny gazów jako czynnik zgazowujący, do przestrzeni reakcyjnej georeaktora oraz na jego przeciwległym końcu, pozwala na odbiór wytworzonego w procesie gazu syntezowego. Skład chemiczny otrzymanego gazu uzależniony jest od rodzaju zastosowanego czynnika zgazowującego, ciśnienia i temperatury prowadzonego procesu [2, 7, 8].

Modelowanie numeryczne procesu zgazowania węgla, obok badań eksperymentalnych, zajmuje ważne miejsce na etapie projektowania całego przedsięwzię-

cia. Badania modelowe realizowane są z zamiarem opracowania modeli matematycznych poszczególnych zjawisk zachodzących podczas tego procesu w skończonej objętości geometrii stanowiącej odwzorowanie rzeczywistego obiektu badań. Oprócz elementu poznawczego ważne są także możliwości sterowania parametrami, które bezpośrednio determinują jego przebieg, co ma duże znaczenie praktyczne [2, 3, 6, 9].

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań modelowych procesu PZW na przykładzie rzeczywistego pokładu węgla na terenie KD „Barbara”. Badania wspomagano metodami numerycznej mechaniki płynów CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics*) w programie Ansys Fluent. Struktura programu oparta jest na modułach dostępnych z poziomu pojedynczego okna dialogowego Ansys-Workbench, w kolejności zgodnej z wymaganym przepływem informacji, aby właściwie zdefiniować modelowane zagadnienie CFD. Schemat struktury został przedstawiony na rysunku 1.

Struktura programu przypomina system bazodanowy, który umożliwia tworzenie i zarządzanie relacyjnymi bazami danych, począwszy od opracowania geometrii analizowanego obiektu badań (moduł *Geometry*), w wyniku wygenerowania siatki numerycznej (moduł *Mesh*), wykonania obliczeń numerycznych (moduł *Fluent*), a skończywszy na opracowaniu rezultatów uzyskanego rozwiązania numerycznego (moduł *Results*) [1].



Rys. 1. Struktura przepływu danych w programie Ansys-Workbench [1]

2. MODEL NUMERYCZNY

Pierwszym etapem modelowania jest zdefiniowanie jego celu, czyli rozpatrzenie zjawisk fizycznych, warunków jednoznaczności rozwiązania modelu numerycznego, czasu potrzebnego na wykonanie obliczeń oraz wielkości obszaru obliczeniowego. Drugim etapem jest opracowanie geometrii konstrukcji georeaktora, który stanowi odzwierciedlenie rzeczywistego obiektu badań. Po utworzeniu modelu geometrycznego kolejnym etapem jest dokonanie jego dyskretyzacji, czyli zdefiniowanie obszaru rozwiązania numerycznego analizowanego zagadnienia. Ostatnim etapem procesu modelowania jest właściwe zdefiniowanie ustawień dla badanego problemu (solvera) i wykonanie obliczeń numerycznych przy bieżącym monitorowaniu zbieżności uzyskiwanego rozwiązania numerycznego [6, 11].

2.1. Geometria

Badania modelowe procesu PZW ustalono w granicach występowania rzeczywistej parceli nr 3 KD „Barbara” o wymiarach jak pokazane na rysunku 2. Otoczenie parceli stanowią wyrobiska korytarzowe o szerokości 3 m i wysokości 2,8 m w obudowie stalowo-

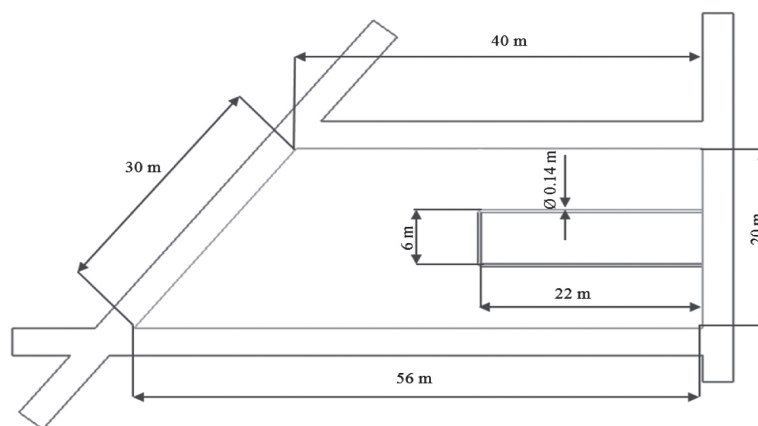
-betonowej. Głębokość zalegania pokładu węgla pod ziemią wynosi ok. 20 m [5].

Georeaktor stanowi blok węgla o powierzchni podstawy 960 m^2 , miąższości 1,5–1,7 m, nachyleniu ok. $3,5^\circ$ i masie 2,23 Mg. Przestrzeń reakcyjną georeaktora stanowi kanał w kształcie cylindra o średnicy 0,14 m w kształcie litery „U” o łącznej długości 50 m [5].

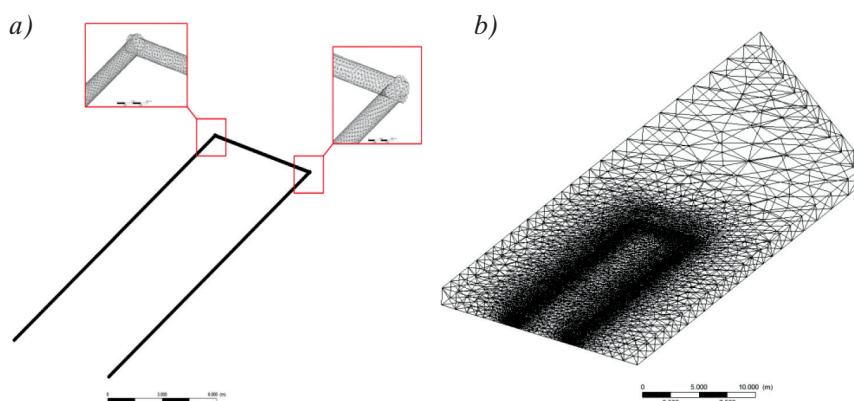
2.2. Obszar dyskretyzacji

Obszar dyskretyzacji modelowanego układu georeaktora stanowi złożenie dwóch siatek numerycznych: geometrii odwzorowującej kanał doprowadzający czynnik zgazowujący oraz geometrii zgazowywanej calizny węglowej. Siatka numeryczna kanału zgazowującego (rys. 3a) została utworzona z 208 809 elementów prostych połączonych wzajemnie ze sobą 49 682 punktami węzłowymi, natomiast siatka numeryczna zgazowywanego pokładu węgla (rys. 3b) została utworzona z 1 575 773 elementów prostych połączonych 280 563 punktami węzłowymi.

Opracowaną siatkę numeryczną eksportowano do programu Ansys-Fluent jako złożenie i poddano łącznie symulacji numerycznej dla przyjętych warunków jednoznaczności rozwiązania numerycznego [6].



Rys. 2. Rzut poziomy podstawowych wymiarów badanej parceli KD „Barbara” [5]



Rys. 3. Widok siatki numerycznej kanału ogniowego (a) i calizny węglowej (b)

2.3. Założenia do modelu numerycznego

Ważnym aspektem efektywnego prowadzenia procesu podziemnego zgazowania węgla kamiennego jest możliwość uzyskania informacji na temat ilościowego i jakościowego rozkładu zmian wybranych parametrów w przestrzeni reakcyjnej o zadanej geometrii, w funkcji czasu trwania zjawiska. Symulacja procesu przenoszenia wspomaganego metodami *CFD* sprowadza się do uzyskania rozwiązywania układu równań różniczkowych interpretujących zasadę zachowania masy, pędu i energii oraz równań transportu składników płynu wraz z towarzyszącymi reakcjami chemicznymi. Takimi fundamentalnymi równaniami wyrażającymi zachowanie przepływającego płynu wzdłuż zadanej geometrii badanego kanału ogniowego są zależności zdefiniowane w programie Ansys-Fluent w następującej postaci:

– równanie zachowania masy [1]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

– równanie zachowania pędu [1]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

– równanie zachowania energii [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \\ = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v})) + S_h \end{aligned} \quad (3)$$

– równanie zachowania reakcji chemicznej [1]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho v \vec{Y}_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_j + S_i + R_i \quad (4)$$

gdzie:

- E – suma energii kinetycznej, energii potencjalnej i pracy płynu [$m^2 \cdot s^{-2}$],
- \vec{F} – wektor sił wewnętrznych działających na ciało w przekroju [N],
- \vec{g} – przyspieszenie ziemskie [$m \cdot s^{-2}$],
- h – entalpia [$J \cdot kg^{-1}$],
- \vec{J}_j – strumień dyfuzyjny zależny od gradientów stężenia i temperatury płynu [$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$],
- k_{eff} – efektywny współczynnik przewodzenia [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$],
- p – ciśnienie płynu [Pa],
- R_i – szybkość reakcji chemicznych [$kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$],
- S_m – człon źródłowy związany z wymianą masy [$kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$],
- S_h – człon źródłowy związany z ciepłem reakcji chemicznych [$J \cdot m^{-3}$],
- S_i – człon źródłowy związany z tworzeniem części lotnych [$kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$],
- t – czas [s],

- T – gradient temperatury płynu [K],
- \vec{v} – wektor prędkości elementu płynu [$m \cdot s^{-1}$],
- Y_i – udział masowy i -tego składnika płynu [-],
- ρ – gęstość płynu [$kg \cdot m^{-3}$],
- μ – lepkość dynamiczna płynu [Pa·s],
- $\vec{\tau}$ – tensor naprężeń [$kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$].

Wpływ zaistniałych zakłóceń w procesie przenoszenia płynu, w przestrzeni o zadanej geometrii, zinterpretowano modelem turbulencji $k - \epsilon$. Rozwiązanie tego modelu sprowadza się do określenia wartości lepkości turbulencji μ_t z wykorzystaniem energii kinetycznej wirów k i szybkości dyssypacji ϵ związanej z rozpraszaniem energii spowodowanej występowaniem wewnętrznych oporów ruchu przepływającego płynu wzdłuż kanału zgazowującego. Model lepkości turbulencji μ_t przepływającego płynu wyrażany jest równaniem zdefiniowanym w programie Ansys-Fluent w następującej postaci [1]:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

Równania transportu płynu dla energii kinetycznej burzliwości k oraz dyssypacji ϵ w programie Ansys-Fluent wyrażono zależnościami w postaci [1]:

– dla energii kinetycznej burzliwości [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \end{aligned} \quad (6)$$

– dla energii dyssypacji [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \\ + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie:

- $C_{1\epsilon}$ – stała empiryczna, $C_{1\epsilon} = 1,44$,
- $C_{2\epsilon}$ – stała empiryczna, $C_{2\epsilon} = 1,92$,
- C_μ – stała empiryczna, $C_\mu = 0,09$,
- k – energia kinetyczna fluktuacji prędkości (burzliwości) [$m^2 \cdot s^{-2}$],
- P – lokalna produkcja fluktuacji wirowych,
- t – czas [s],
- S_k – człon źródłowy [$kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$],
- v – wektor prędkości elementu płynu [$m \cdot s^{-1}$],
- ϵ – szybkość dyssypacji energii kinetycznej burzliwości [$m^2 \cdot s^{-3}$],
- μ_t – lepkość turbulentna [Pa·s],
- σ_k – burzliwa liczba Prandtla $\sigma_k = 1,0$,
- σ_ϵ – burzliwa liczba Prandtla $\sigma_\epsilon = 1,3$,
- ρ – gęstość płynu [$kg \cdot m^{-3}$].

Przyjęto następujący schemat reakcji zgazowania dla analizowanego zagadnienia [1, 9]:



gdzie: $v(C_{1,10} H_{1,45} O_{0,93} N_{0,0246})$ – części lotne.

Równanie (8) interpretuje proces suszenia węgla, natomiast zależności (9) i (10) opisują zjawisko pirolizy węgla.

Zestaw reakcji powierzchniowych zgazowania [9, 11]:



Zestaw reakcji objętościowych zgazowania [9, 11]:



Kinetykę procesu zgazowania zdefiniowano w programie Ansys-Fluent równaniem w postaci [1]:

$$k = AT^\beta e^{-E/RT} \quad (17)$$

Wartości parametrów przyjęte w obliczeniach kinetyki reakcji zgazowania zestawiono odpowiednio w tabeli 1.

Tabela 1

Parametry przyjęte do obliczeń reakcji chemicznych zgazowania węgla [1, 9, 11]

Lp.	Szybkość reakcji	Parametry		
		β	$A [1 \cdot s^{-1}]$	$E [J \cdot mol^{-1}]$
1.	R_8	0	$5,1 \cdot 10^4$	$78,24 \cdot 10^3$
2.	R_9	0		
3.	$R_{10} = k_{10} \cdot C_V \cdot C_{O_2}$	0	$2,12 \cdot 10^{11}$	$2,03 \cdot 10^8$
4.	$R_{11} = k_{11} \cdot C_{O_2}$	0	20,9	$22,7 \cdot 10^3$
5.	$R_{12} = k_{12} \cdot C_{O_2}$	0	5,0	$13,1 \cdot 10^3$
6.	$R_{13} = k_{13} \cdot C_{H_2O}$	0	12,9	$36,4 \cdot 10^3$
7.	$R_{14} = k_{14} \cdot C_{H_2}$	0	5,0	$6,1 \cdot 10^3$
8.	$R_{15} = k_{15} \cdot C_{O_2} \cdot C_{CH_4}$	0	$4,4 \cdot 10^{11}$	$1,28 \cdot 10^8$
9.	$R_{16} = k_{16} \cdot C_{CO} \cdot C_{O_2}$	0	$3,16 \cdot 10^{12}$	$1,67 \cdot 10^8$

Porowatość węgla stanowi parametr, którego wartość, w warunkach prowadzenia procesu PZW, ulega zmianie w wyniku zmian pola temperatur w objętości zgazowywanego węgla. Bazując na pracy [10] oraz cytując za [2] równanie definiujące wartość zmian po-

rowatości węgla, zapisano w programie Ansys-Fluent w następującej postaci:

$$\varphi = 0,2286 + 0,01041 \cdot T + 0,00001786 \cdot T^2 \quad (18)$$

gdzie T – temperatura [K].

Przyjęto następujące warunki brzeżno-początkowe dla każdego rozpatrywanego obszaru dyskretyzacji w postaci:

a) dla obszaru rozwiązania, który stanowi model kanału zgazowującego:

- temperatura czynnika zgazowującego (tlen, powietrze) – 298,15 K,
- strumień objętości czynnika zgazowującego (tlen, powietrze, powietrze z zawartością 30% O_2 oraz mieszanina tlen (50%) – para wodna (50%) – $150 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$;

b) dla obszaru rozwiązania, który stanowi model warstwy węgla:

- gęstość (wartość średnia) – $1450 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ [4],
- porowatość (wartość średnia) – 5% [2],
- zależność na ciepło właściwe ($J \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) C_{p_s} zaimplementowano do programu Ansys-Fluent w postaci [9],

$$C_{p_s} = (0,31 + 3,38e^{-4} \cdot (T - 546)) \cdot 4184 \quad T < 598 \text{ [K]}$$

$$C_{p_s} = (0,42 - 1,548e^{-4} \cdot (T - 871)) \cdot 4184 \quad T > 598 \text{ [K]}$$

- temperatura początkowa T – 298,15 K,
- skład chemiczny węgla (tab. 2),
- współczynnik przewodzenia ciepła (wartość średnia) – $0,535 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [4].

Tabela 2

Analiza techniczno-elementarna węgla [12]

Stan techniczny	
Opis	[%]
Zawartość wilgoci	11,81
Zawartość popiołu	15,56
Zawartość siarki całkowitej	0,51
Ciepło spalania	21,708 [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]
Stan analityczny	
Zawartość wilgoci	6,39
Zawartość popiołu	16,52
Zawartość części lotnych	29,84
Ciepło spalania	23,192 [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]
Zawartość pierwiastka C	57,95
Zawartość pierwiastka H	3,70
Zawartość pierwiastka N	0,87
Zawartość pierwiastka S	0,54
Zawartość pierwiastka O	14,03

Rozpatrzono następujące ustawienia globalne (systemowe) w programie Ansys-Fluent:

- ciśnienie zgazowania: 101,325 Pa,
- zbieżność obliczeń dla składowych prędkości płynu, parametrów modelu turbulencji, parametrów równania energii, parametrów równania ciągłości: $1 \cdot 10^{-4}$,
- czasowa skala zjawiska: 100 godzin.

3. WYNIKI

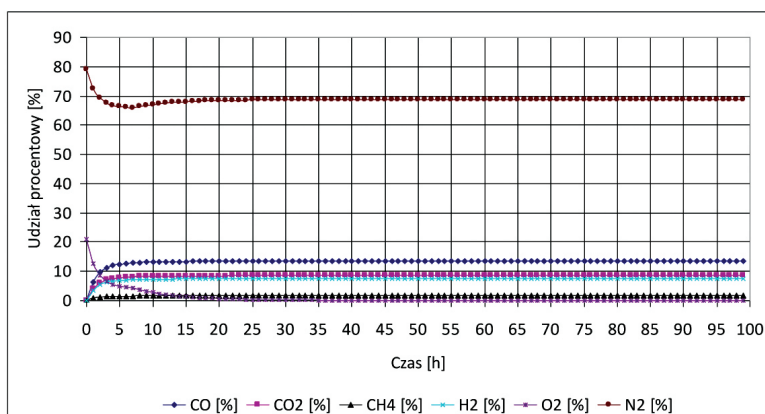
Na podstawie uzyskanego rozwiązania numerycznego dla analizowanego zagadnienia procesu podziemnego zgazowania węgla opracowano prognozowane charakterystyki zmian składu chemicznego gazu procesowego mierzonych na wylocie z georeaktora w zależności od zastosowanego czynnika zgazowującego w czasie 100 godzin.

Podstawą do oszacowania szybkości ubytku masy zgazowywanego węgla (parametr m_c – rys. 6, 9, 12, 15) była zawartość węgla C mierzona w produktach trans-

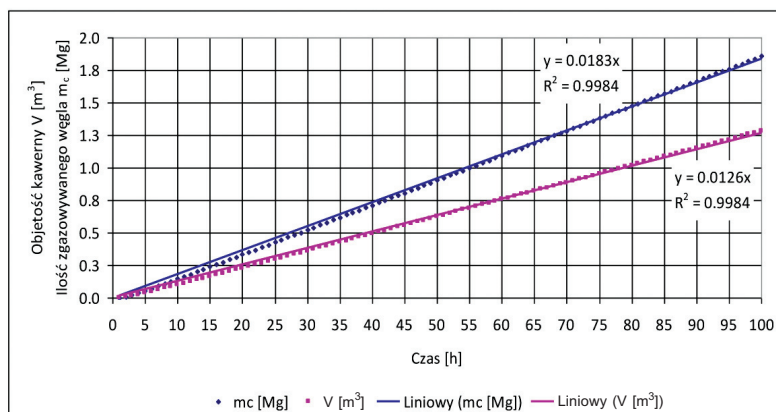
portowanych w strumieniu gazu procesowego na wylocie z georeaktora [8].

Dla warunków, w których proces zgazowania węgla prowadzony jest z udziałem powietrza, przewiduje się uzyskanie gazu procesowego o składzie (rys. 5): 68,8% N₂, 7,5% H₂, 1,7% CH₄, 8,5% CO₂, 13,5% CO. Szybkość ubytku masy węgla prognozuje się na poziomie 0,0183 [Mg·h⁻¹], przy czym szybkość wzrostu kawerny na poziomie 0,0126 [m³·h⁻¹] (rys. 6). Prognozowany rozkład zmian pola temperatur waha się w przedziale od 169,6°C (442,7 K) do 526,4°C (799,5 K) (rys. 7a).

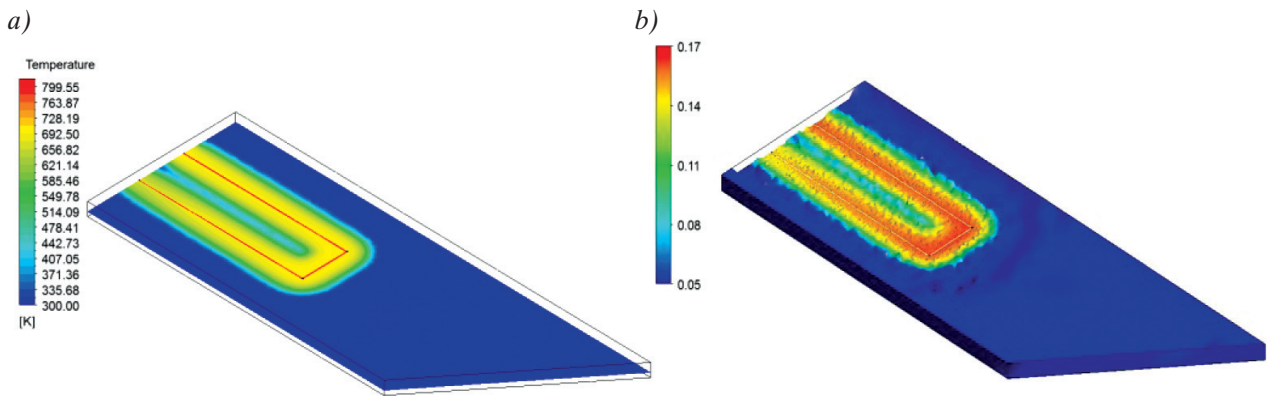
W przypadku prowadzenia procesu zgazowania węgla z wykorzystaniem powietrza o zawartości tlenu do 30% prognozuje się uzyskanie gazu procesowego o składzie (rys. 8): 40,9% N₂, 16,3% H₂, 3,3% CH₄, 12,5% CO₂, 27% CO. Szybkość ubytku masy zgazowywanego węgla szacuje się na poziomie 0,0334 [Mg·h⁻¹], a szybkość wzrostu kawerny na poziomie 0,023 [m³·h⁻¹] (rys. 9). Prognozowany rozkład zmian pola temperatur zmienia się w przedziale od 233,7°C (506,85 K) do 750,6°C (1023,75 K) (rys. 10a).



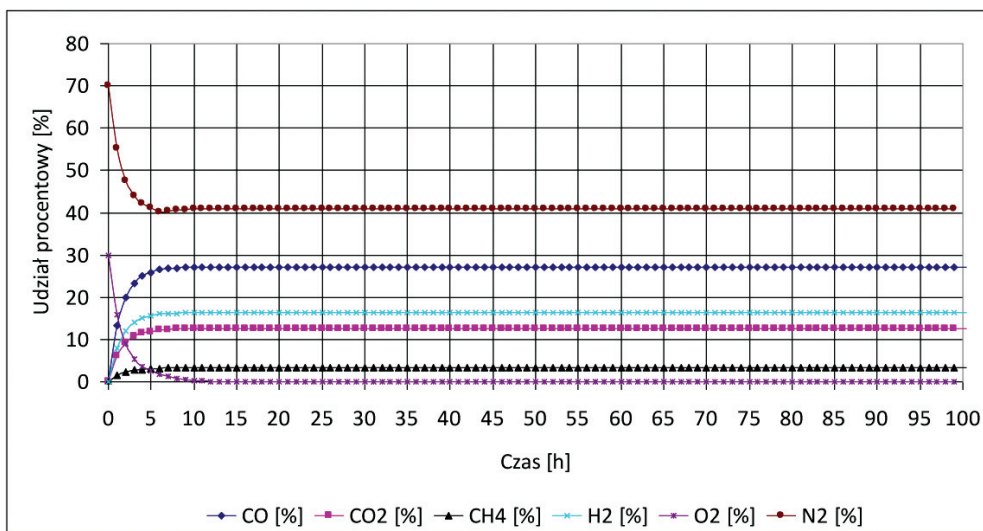
Rys. 5. Rozkład zmian stężenia głównych składników gazu procesowego w warunkach prowadzenia procesu zgazowania powietrzem podawanym georeaktora



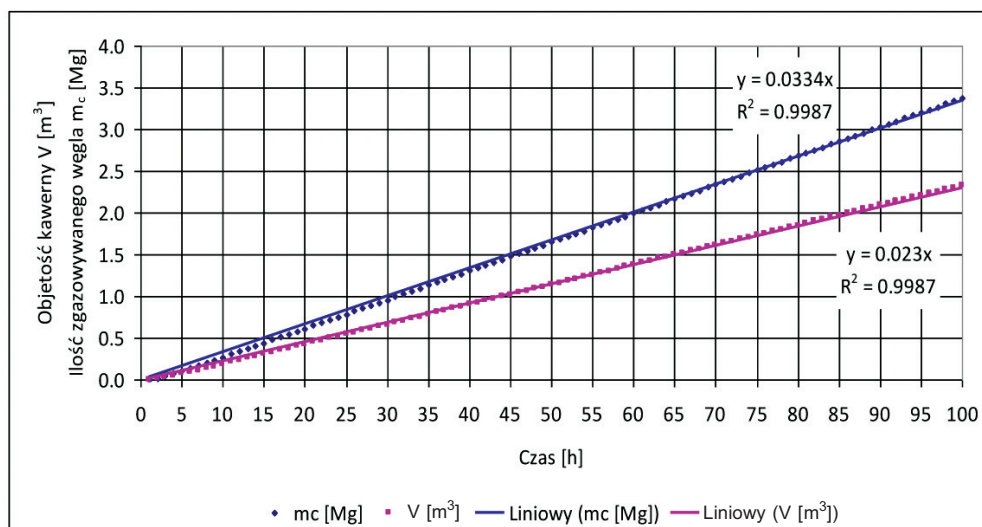
Rys. 6. Rozkład zmian objętości kawerny oraz ubytku węgla w warunkach prowadzenia procesu zgazowania węgla powietrzem



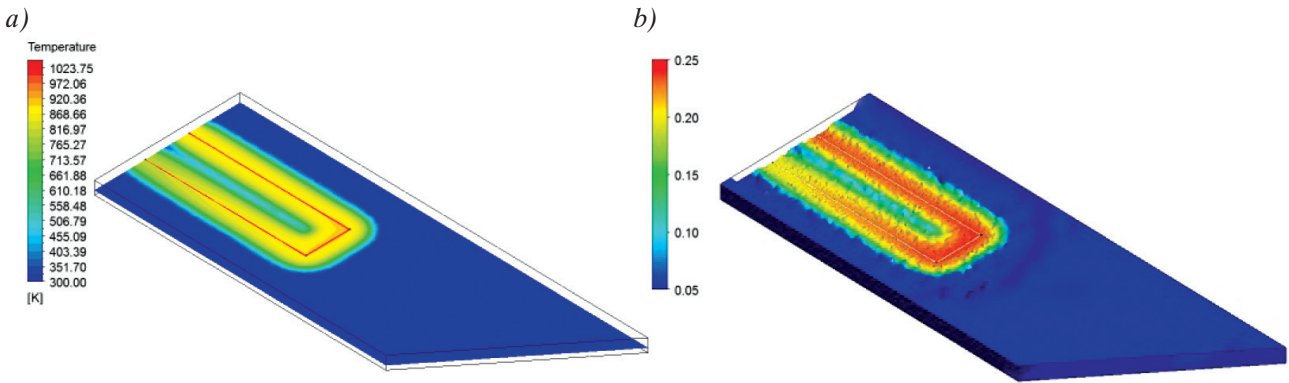
Rys. 7. Rozkład zmian pola temperatur (a) i porowatości calizny węglowej (b) w warunkach prowadzenia procesu zgazowania powietrzem w czasie 100 godzin



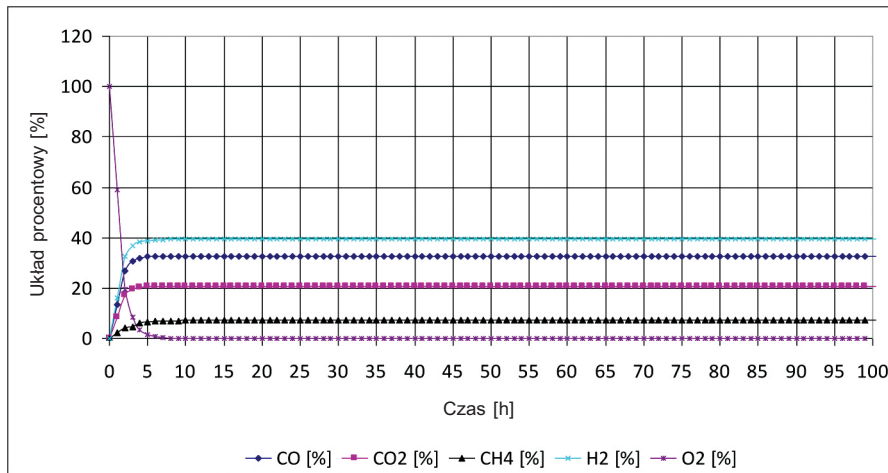
Rys. 8. Rozkład zmian stężenia głównych składników gazu procesowego w warunkach prowadzenia procesu zgazowania powietrzem zawierającym 30% tlenu



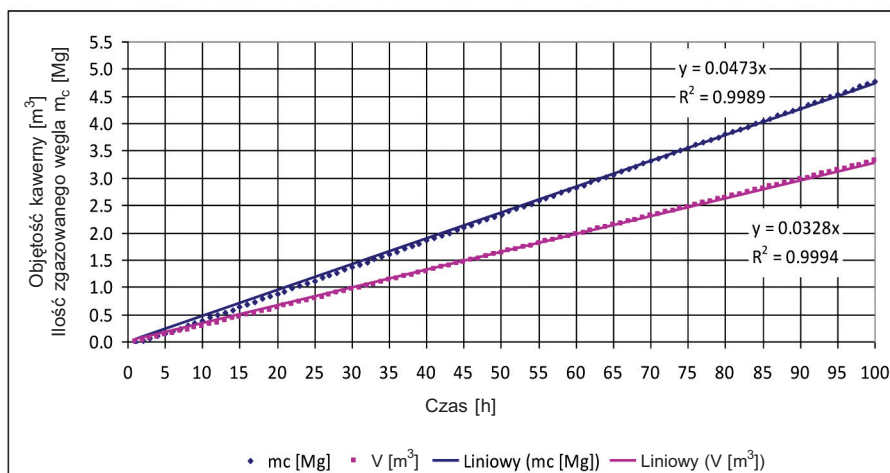
Rys. 9. Rozkład zmian objętości kawerny oraz ubytku węgla w warunkach prowadzenia procesu zgazowania węgla powietrzem zawierającym 30% tlenu



Rys. 10. Rozkład zmian pola temperatur (a) i porowatości calizny węglowej (b) w warunkach prowadzenia procesu zgazowania powietrzem zawierającym 30% tlenu w czasie 100 godzin



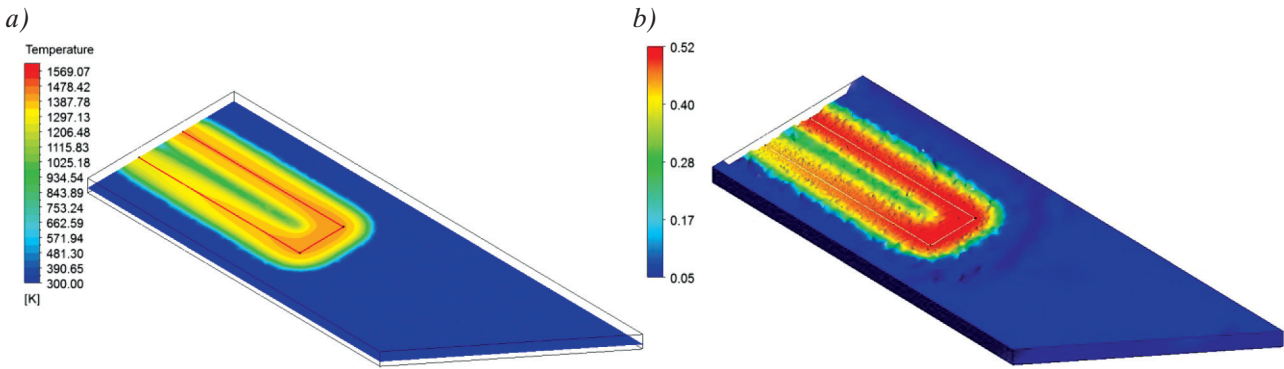
Rys. 11. Rozkład zmian stężenia głównych składników gazu procesowego w warunkach prowadzenia procesu zgazowania tlenem podawanym do georeaktora



Rys. 12. Rozkład zmian objętości kawerny oraz ubytku węgla w warunkach prowadzenia procesu zgazowania węgla tlenem

Symulacja numeryczna warunków, w których proces zgazowania węgla realizowany jest z wykorzystaniem tlenu, szacuje możliwość otrzymania gazu procesowego o składzie (rys. 11): 39,3% H₂, 7,1% CH₄, 20,8% CO₂, 32,8% CO. Szybkość ubytku masy węgla oraz

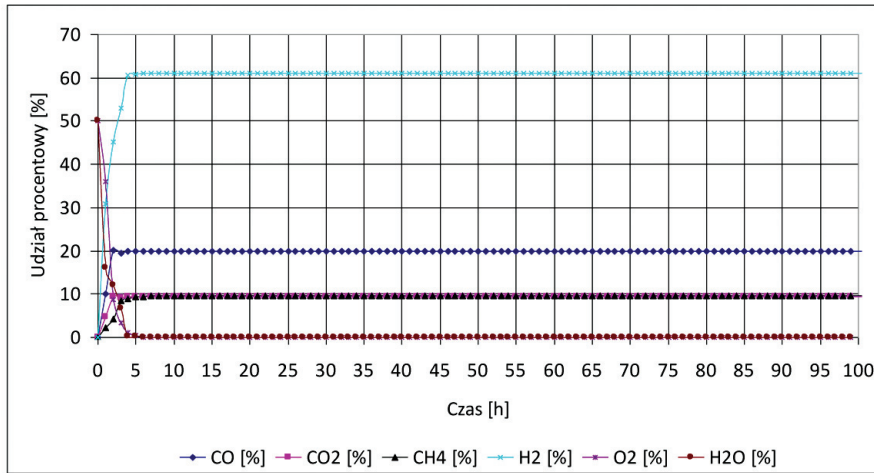
szybkość wzrostu kawerny ocenia się na poziomie 0,0473 [Mg·h⁻¹] i 0,0328 [m³·h⁻¹] (rys. 12). Prognozowany rozkład zmian pola temperatur zawiera się w przedziale od 298,8°C (571,95 K) do 1295,9°C (1569,07 K) (rys. 13a).



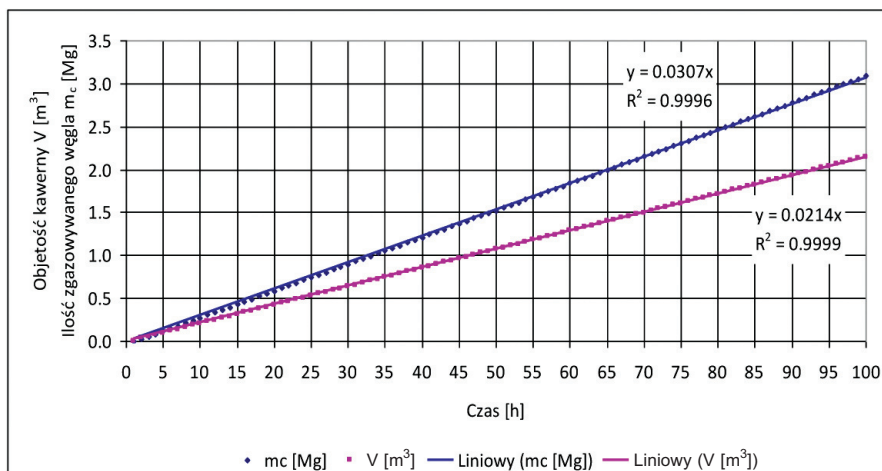
Rys. 13. Rozkład zmian pola temperatur (a) i porowatości calizny węglowej (b) w warunkach prowadzenia procesu zgazowania tlenem w czasie 100 godzin

Symulacja numeryczna warunków prowadzenia procesu zgazowania węgla z udziałem mieszaniny tlen i pary wodnej prognozuje możliwość uzyskania gazu procesowego o składzie (rys. 14): 61,1% H₂, 9,6% CH₄, 9,4% CO₂, 19,9% CO. Szybkość ubytku

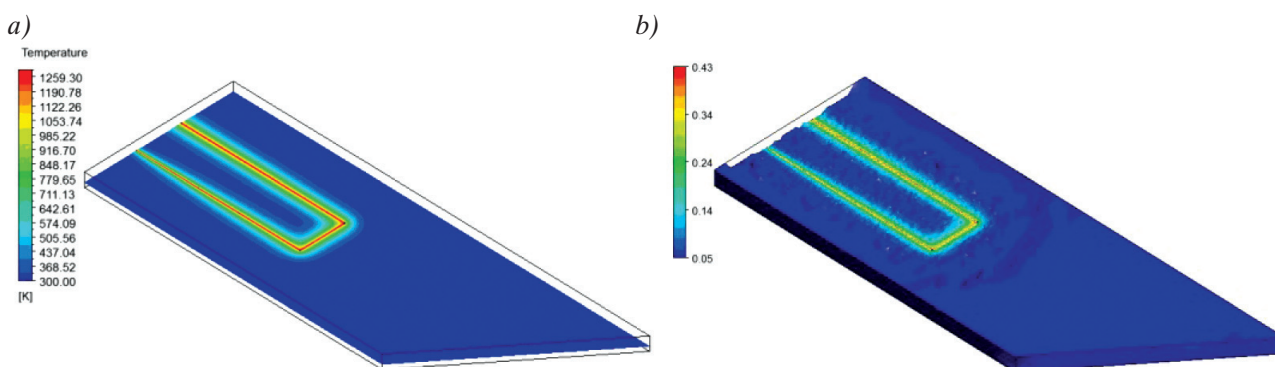
masy węgla oraz szybkość wzrostu kawerny ocenia się na poziomie 0,0307 Mg·h⁻¹ i 0,0214 m³·h⁻¹ (rys. 15). Prognozowany rozkład zmian pola temperatur mieści się w przedziale od 232,4°C (505,55 K) do 986,1°C (1259,25 K) (rys. 16a).



Rys. 14. Rozkład zmian stężenia głównych składników gazu procesowego w warunkach zgazowania tlenem i parą wodną podawanymi do georeaktora



Rys. 15. Rozkład zmian objętości kawerny oraz ubytku węgla w warunkach prowadzenia procesu zgazowania węgla tlenem i parą wodną



Rys. 16. Rozkład zmian pola temperatur (a) i porowatości calizny węglowej (b) w warunkach prowadzenia procesu zgazowania tlenem i parą wodną w czasie 100 godzin

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Efektom prowadzonych badań modelowych jest model numeryczny procesu podziemnego zgazowania węgla (PZW) na przykładzie wybranej parceli KD „Barbara” opracowany z zamiarem symulowania

zjawisk fizykochemicznych w przestrzeni reakcyjnej kanału zgazowującego oraz w jego otoczeniu, którą stanowi warstwa zgazowywanego węgla. W tabelach 3–6 zestawiono prognozowane wartości średnie szukanych składników gazu procesowego, które stanowią efekt prowadzonych symulacji numerycznych procesu PZW.

Tabela 3

Wartości średnie składników gazu procesowego w warunkach prowadzenia procesu zgazowania węgla powietrzem

CO [%]	CO ₂ [%]	CH ₄ [%]	H ₂ [%]	O ₂ [%]	N ₂ [%]	m_c [Mg]	V [m ³]
13,2	8,3	1,6	7,3	1,0	68,7	0,91	0,63

Tabela 4

Wartości średnie składników gazu procesowego w warunkach prowadzenia procesu zgazowania węgla wzbogaconym powietrzem

CO [%]	CO ₂ [%]	CH ₄ [%]	H ₂ [%]	O ₂ [%]	N ₂ [%]	m_c [Mg]	V [m ³]
20,9	9,6	4,2	18,0	0,8	46,5	1,67	1,15

Tabela 5

Wartości średnie składników gazu procesowego w warunkach prowadzenia procesu zgazowania węgla tlenem

CO [%]	CO ₂ [%]	CH ₄ [%]	H ₂ [%]	O ₂ [%]	N ₂ [%]	m_c [Mg]	V [m ³]
32,1	20,4	6,9	38,6	1,9	0,0	2,37	1,65

Tabela 6

Wartości średnie składników gazu procesowego w warunkach prowadzenia procesu zgazowania węgla mieszaniną tlenu i pary wodnej

CO [%]	CO ₂ [%]	CH ₄ [%]	H ₂ [%]	O ₂ [%]	H ₂ O [%]	m_c [Mg]	V [m ³]
19,6	9,3	9,4	59,9	1,0	0,9	1,56	1,09

Na podstawie wyników symulacji numerycznych szacuje się możliwość uzyskania gazu procesowego o zawartości szukanych składników takich jak wodor H_2 w granicach od 7,3% (dla powietrza) do 59,9% (dla mieszaniny tlen – para wodna), dwutlenek węgla CO_2 w granicach od 8,3% (dla powietrza) do 20,4% (dla tlenu), tlenek węgla CO w granicach od 13,2% (dla powietrza) do 32,1% (dla tlenu) oraz metan CH_4 w granicach od 1,6% (dla powietrza) do 9,4% (dla mieszaniny tlen – para wodna).

Natomiast prognozowana wartość zmian temperatury procesu PZW wzdłuż kanału zgazowującego wynosi odpowiednio: dla powietrza 799,5 K (526,4°C), dla powietrza wzbogaconego 1023,75 K (750,6°C), dla tlenu 1569,07 K (1295,92°C) oraz dla mieszaniny tlen – para wodna 1259,30 K (986,15°C).

Analizując szybkość ubytku masy węglowej w zadanym czasie 100 godzin, w zależności od zastosowanego czynnika zgazowującego dla zadanej wartości strumienia objętości, szacuje się ubytek złoża w ilości odpowiednio:

- dla powietrza ubytek w ilości 41,4%,
- dla mieszaniny tlen – para wodna ubytek w ilości 70,9%,
- dla powietrza wzbogaconego ubytek w ilości 75,9%.

W przypadku prowadzenia procesu PZW z udziałem tlenu prognozuje się wyczerpanie całkowitej dostępnej masy węglowej po upływie 93 godzin. Wyniki przeprowadzonych symulacji numerycznych pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- zastosowana metoda numeryczna CFD pozwoliła zidentyfikować czynniki procesowe, takie jak: temperatura procesu, szybkość ubytku masy węglowej, objętości kawerny, skład chemiczny gazu syntezowego oraz czas procesu, warunkujące prawidłowość prowadzenia procesu podziemnego zgazowania dla zadanej geometrii pokładu węgla;
- najbardziej kaloryczny gaz syntezowy prognozowany jest dla warunków, w których do przestrzeni reakcyjnej georeaktora doprowadzana jest mieszanina tlenu i pary wodnej, natomiast najmniej kaloryczny przy zastosowaniu powietrza wzbogaconego tlenem.

Podziękowania

Praca została wykonana w ramach badań statutowych prowadzonych w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach nr 11102026-144 finansowanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- [1] ANSYS FLUENT 12.0: *Theory Guide*. ANSYS, Inc. 2009.
- [2] Białecka B.: *Podziemne zgazowanie węgla. Podstawy procesu decyzyjnego*, Wydawnictwo GIG, Katowice 2008.
- [3] Bockelie Michael J., Denison Martin K., Chen Zumao, Senior Constance L., Sarofim Adel F.: *Using Models to Select Operating Conditions for Gasifiers*, Pittsburgh Coal Conference, September 15–19, 2003.
- [4] Chmura K.: *Przewodność cieplna skał i węgla górnośląskiego karbonu*, Politechnika Śląska, Zeszyty Naukowe nr 190, Gliwice 1968.
- [5] Hildebrandt R.: *Opracowanie dokumentacji techniczno-ruchowej procesu PZW, parcela nr 3, KD Barbara*, Praca GIG nr 11103096, Główny Instytut Górnictwa, Katowice 2016 [niepublikowana].
- [6] Jaworski Z.: *Numeryczna mechanika płynów w inżynierii chemicznej i procesowej*, EXIT, Warszawa 2005.
- [7] Rauk J.: *Kształtowanie się kanału ogniowego w podziemnym zgazowaniu węgla kamiennego*, „Prace Głównego Instytutu Górnictwa, Seria A, Komunikat nr 241”, Wydawnictwo Górnictwo-Hutnicze, Katowice 1959.
- [8] Rauk J.: *Podstawy interpretacji procesów fizykochemicznych w podziemnym zgazowaniu węgla powietrzem i ich obraz w przeprowadzonych doświadczeniach*, „Prace Głównego Instytutu Górnictwa, Seria A, Komunikat nr 246”, Wydawnictwo Górnictwo-Hutnicze, Katowice 1960.
- [9] Shirazi A.S.: *CFD simulation of Underground Coal Gasification*, University of Alberta 2012.
- [10] Seewald H., Klein J., Jungten H.: *Pore structure of coal derived from permeation and sorption measurements*, Proc. Int. Conf. on Coal Sci., Pergamon Press, Sydney 1985: 861.
- [11] Wachowicz J., Łączny, J., Iwaszenko, S., Janoszek T.: *Modeling of Underground Coal Gasification Process Using CFD Methods*, „Archives of Mining Sciences” 2015, 60, 3: 663–676.
- [12] Wiatowski M., Stańczyk K., Świądrowski J., Kapusta K., Cybulski K., Krause E., Grabowski J., Rogut J., Howaniec N., Smoliński A.: *Semi-technical underground coal gasification (UCG) using the shaft method in Experimental Mine „Barbara”*, „Fuel” 2012, 99: 170–179.

dr inż. TOMASZ JANOSZEK
Zakład Technologii Eksploatacji
i Obudów Górniczych
Główny Instytut Górnictwa
pl. Gwarków 1, 40-166 Katowice
tjanoszek@gig.eu