



Prognozowanie skutków wystąpienia stanu awaryjnego w procesie przewietrzania wyrobiska górniczego w warunkach rozszczelnienia georeaktora PZW

Forecasting the effects of an emergency state in the mine ventilation network due to the leaky of the underground coal gasification georeactor

Dr inż. Tomasz Janoszek*)

Treść: Zaprezentowano wyniki badań modelowych dotyczące prognozowanych skutków wystąpienia stanu awaryjnego w sieci wentylacyjnej kopalni głębinowej, wywołanego rozszczelnieniem georeaktora podziemnego zgazowania węgla. Symulacje numeryczne prowadzono z wykorzystaniem narzędzi informatycznych, takich jak VentGraph, w którym wykonano analizę numeryczną procesu przewietrzania sieci wentylacyjnej kopalni, Ansys-Fluent, który posłużył do wykonania numerycznej symulacji procesu podziemnego zgazowania węgla oraz w programie VEX, który umożliwił wykonanie prognozowanych skutków wybuchu składników gazu procesowego, w analizowanej geometrii wyrobiska kopalni. Badania modelowe zakładały prowadzenie procesu zgazowania masy węglowej, przy udziale tlenu i powietrza, jako czynnika zgazowującego pokład węgla, w stanie ustalonym w przedziale czasu 24 godzin. W obliczeniach numerycznych uwzględniono scenariusz wystąpienia stanu awaryjnego w sieci wentylacyjnej kopalni głębinowej, spowodowanego rozszczelnieniem georeaktora. Symulacje numeryczne prowadzono z zamiarem identyfikacji rozkładu zmian, szukanych składników gazu procesowego w strumieniu powietrza niezależnego.

Abstract: The results of model tests about the effects of an emergency state in the underground mine ventilation network, caused by unsealing of the underground coal gasification georeactor, were presented. Numerical simulations were done with the use of software such as VentGraph, which was used to calculate the ventilation of mine network, Ansys-Fluent that was used to perform the numerical simulation of underground coal gasification process and software VEX which allowed to calculate the effects of the emission of the gas components in the analyzed mine workings geometry. The coal gasification process was performed with the participation of oxygen and air as a gasification agent, in a steady state condition in the time interval of 24 hours. The numerical calculations were simulated for the scenario of a state of emergency in underground mine ventilation network. Numerical simulations were performed with the intention to identify changes of the syngas components in an air stream.

Słowa kluczowe:

zgazowanie węgla, numeryczna mechanika płynów, modelowanie, proces przewietrzania

Key words:

coal gasification, computational fluid dynamics, modelling, ventilation process

1. Wprowadzenie

Możliwość wdrożenia w przyszłości technologii podziemnego zgazowania węgla (PZW), jako potencjalnie alternatywnego źródła energii, w głównej mierze uzależnione jest od wyników prowadzonych badań eksperymentalnych oraz modelowych (Dziurzyński 1998, Janoszek i in. 2013a, 2013b).

W ostatnich kilku latach proces zgazowania węgla stał się ponownie tematem intensywnych badań naukowych, które zmierzały do opracowania technologii zgazowania węgla w warunkach *ex situ*, z zamiarem implementacji uzyskanych wyników do warunków *in situ*, jakie panują w kopalni głębinowej. Pierwszym etapem badań objęto opracowanie wytycznych technologicznych procesu zgazowania węgla, prowadzonego na powierzchni w szczelnym reaktorze, dla różnych konfiguracji kanału zgazowującego, z zamiarem identyfikacji parametrów determinujących kaloryczność uzyskiwanego gazu syntezowego. W szczególności badaniami w warunkach *ex situ*, objęto wpływ zastosowanego

czynnika zgazowującego (tlen, powietrze lub mieszanina tlenu i para wodna) oraz parametry objętościowe przepływu płynu w przestrzeni reakcyjnej georeaktora na zawartość szukanych składników gazu procesowego, takich jak: wodór H_2 , tlenek węgla CO, dwutlenek węgla CO_2 oraz metan CH_4 . Oprócz badań eksperymentalnych podjęto także badania modelowe, które zmierzały do opracowania założeń do modelu numerycznego analizowanego zagadnienia zgazowania węgla (Stańczyk i in. 2010; Wachowicz i in. 2010; 2013; Żogała, Janoszek 2015).

Wyniki badań *ex situ* upoważniły do podjęcia próby przeprowadzenia tego typu eksperymentu pod ziemią. W tym celu na terenie Kopalni Doświadczalnej „Barbara”, w pokładzie 310, oraz w warunkach czynnej kopalni KWK „Wieczorek”, w pokładzie 501, uruchomiono pilotażowe instalacje zgazowania węgla bezpośrednio w złożu. Głównym założeniem było potwierdzenie możliwości zastosowania tej technologii do warunków panujących w czynnej kopalni węgla kamiennego. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych porównano z wynikami symulacji numerycznych procesu PZW (Wiatowski i in. 2012).

*) Główny Instytut Górnictwa, Katowice

Tabela 1. Wyniki obliczeń rozplywu powietrza w analizowanej sieci wentylacyjnej
Table 1. The results of the calculations of air flow in analyzed mine network

Wlot	Wylot	Opór R [kg m ⁻⁷]	Wydatek [m ³ s ⁻¹]	Długość bocznic [m]	Przekrój bocznic [m ²]	Nachylenie [°]
1	13	0.0525	61.0	780	28.3	90
13	2	0.0290	58.8	2000	21.8	0
2	3	0.0145	50.0	1000	21.8	0
3	7	0.3789	25.3	1450	12.8	0
7	8	0.7352	24.5	230	7.0	1
8	4	0.0881	24.4	1620	12.8	3
3	9	0.0087	25.8	600	21.8	0
9	10	0.0680	26.1	1250	12.8	1
10	11	0.9382	26.2	304	6.9	13
11	12	0.0535	26.1	980	12.8	0
12	4	0.0232	25.7	1600	21.8	0
4	5	0.0048	50.2	330	21.8	0
5	15	0.0407	59.8	2800	21.8	0
16	1	0.0265	61.7	20	12.0	49
2	14	10.0440	8.8	820	12.8	0
14	5	0.1065	8.8	87.3	11.5	90
15	16	0.0456	60.3	677.8	28.3	90
1	16	759.900	1.4	15	28.3	90

gdzie:

- \vec{v} – wektor prędkości elementu płynu, m s⁻¹,
- p – ciśnienie płynu, Pa,
- μ – lepkość dynamiczna płynu, Pa s,
- \vec{g} – przyspieszenie ziemskie, m s⁻²,
- $\vec{\tau}$ – tensor naprężeń, kg m⁻³ s⁻¹,
- \vec{F} – wektor siły wewnętrznych działających na ciało, N

– równanie zachowania energii (Ansys 2009):

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

gdzie:

- h – entalpia, J kg⁻¹,
- T – gradient temperatury płynu, K,
- S_h – człon źródłowy związany z wymianą energii, J m⁻³,
- $\vec{\tau}$ – tensor naprężeń, kg m⁻³ s⁻¹,
- k_{eff} – efektywny współczynnik przewodzenia, W m⁻¹ K⁻¹.

Dodatkowo w obliczeniach uwzględniono model opisujący zmienność porowatości masy węglowej w funkcji zmian temperatury w postaci (Bialecka 2008; Wachowicz i in. 2014):

$$\varphi = 0,2286 + 0,01041 \cdot T + 0,00001786 \cdot T^2 \quad (4)$$

gdzie:

- T – temperatura, [°C],
 - φ – porowatość calizny węglowej [%]
- oraz zmienność ciepła właściwego calizny węglowej w funkcji temperatury wg zależności (Shirazi 2012):

$$C_{p_s} = (0.31 + 3.38e^{-4} \cdot (T - 546)) \cdot 4184 \quad T < 598[K] \quad (5)$$

$$C_{p_s} = (0.42 - 1.548e^{-4} \cdot (T - 871)) \cdot 4184 \quad T > 598[K]$$

gdzie:

- T – temperatura, [°C],
- C_{p_s} – ciepło właściwe węgla, [J kg⁻¹ K⁻¹].

Obliczenia numeryczne CFD uwzględniają burzliwy charakter przepływu strumienia czynnika zgazowującego wzdłuż

kanalu zgazowującego, który zinterpretowano standardowym modelem turbulencji k-ε (Ansys 2009; Wachowicz i in. 2013; Wachowicz i in. 2014).

3.1. Model geometryczny

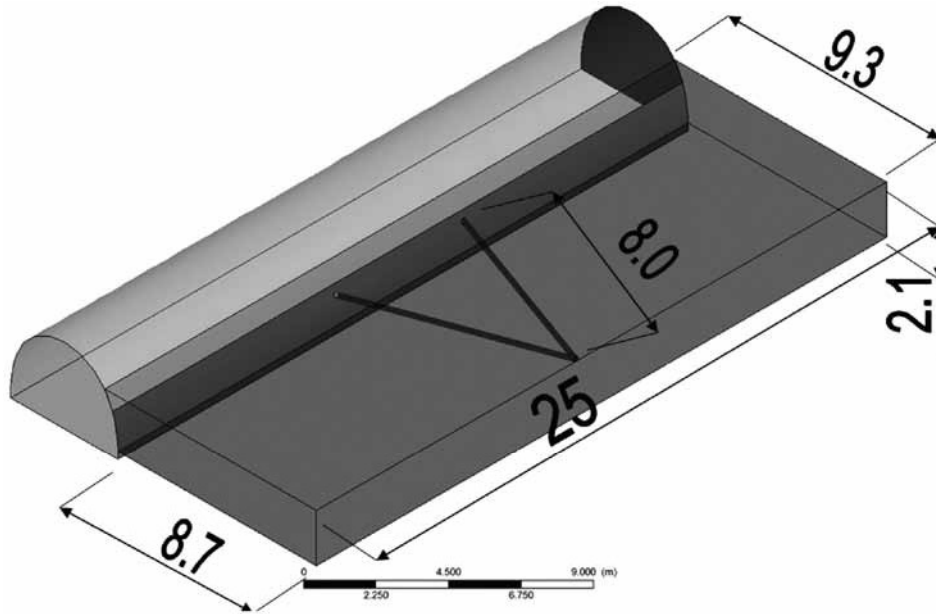
W oparciu o dane zawarte w tab. 1 zdefiniowano model przestrzenny wyrobiska oraz warstwę zgazowywanego węgla. Efekty podjętych działań przedstawiono na rys. 2. Model geometryczny stanowi wyrobisko o przekroju 12.8 m² i długości 25 m, który udostępnia pokład węgla do procesu PZW o miąższości 2.1 m. W caliznie węglowej wykonano symetryczny kanał zgazowujący w kształcie litery „V” o łącznej długości 16 m i średnicy 0.2 m na wysokości 1m nad spągiem wyrobiska. Całość stanowi złożony model bryłowy, który stanowi podstawę do opracowania modelu numerycznego.

3.2. Model dyskretny

Opracowany model numeryczny wyrobiska stanowi zbiór informacji, zapisanych w formie sparametryzowanych brył geometrycznych będących cyfrową interpretacją rzeczywistego obiektu badań. Bazując na tych informacjach, zdefiniowano obszar dyskretyzacji. Rys. 3 prezentuje model dyskretny wyrobiska (rys.3-1) oraz warstwy węgla (rys.3-2), w którym wykonano kanał zgazowujący w kształcie litery „V” (rys.3-3).

W celu przeprowadzenia obliczeń, rozpatrzono następujące lokalne warunki jednoznaczności rozwiązania modelu numerycznego:

- dla rozpatrywanego modelu numerycznego wyrobiska górniczego (model płynu):
 - a) temperaturę powietrza niezależnego wpływającego do wyrobiska – 298.15 K (25°C),
 - b) prędkość strumienia powietrza – 2.1 m s⁻¹,
 - c) współczynnik przewodzenia ciepła - 0.0242 W m⁻¹ K⁻¹,
 - d) gęstość - 1.225 kg m⁻³,
 - e) ciepło właściwe materiału stanowiące otoczenie wyrobiska - 1.75 W m⁻¹ K⁻¹,
- dla rozpatrywanego modelu numerycznego kanału zgazowującego (model płynu):
 - a) temperatura powietrza i tlenu – 298.15 K (25°C),

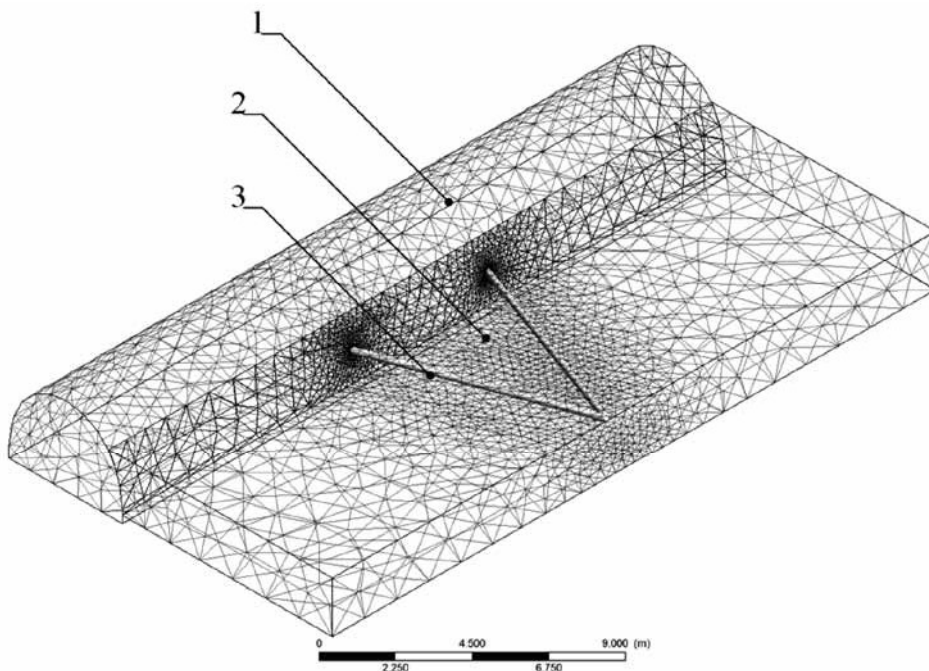
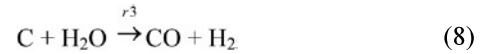


Rys. 2. Model geometryczny badanego odcinka wyrobiska
Fig. 2. Geometrical model of the mine excavation

- b) strumienia masy czynnika zgazowującego – 0.018 kg s^{-1} ,
 - c) współczynnik przewodzenia tlenu $0.0246 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$,
 - d) współczynnik przewodzenia powietrza- $0.0242 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$,
 - e) gęstość - 1.225 kg m^{-3} ,
 - f) ciepło właściwe materiału stanowiące otoczenie kanału zgazowującego - zależność (5),
- dla rozpatrywanego modelu calizny węglowej (model bryłowy):
- a) gęstość – 1450 kg m^{-3} ,
 - b) ciepło właściwe– zależność (5),
 - c) współczynnik przewodzenia – $0.535 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Chmura 1968).

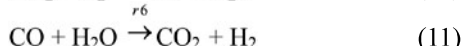
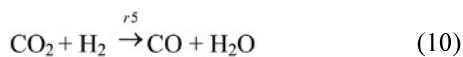
Reakcje chemiczne, które determinują proces zgazowania węgla w modelowej caliznie węglowej, wyrażono zestawem równań w następującej postaci (Wachowicz i in. 2015):

– reakcji powierzchniowych pomiędzy czynnikiem zgazowującym a masą węglową:



Rys. 3. Obszar dyskretyzacji modelu georeaktora PZW: 1 – odcinek wyrobiska, 2 – pokład węgla, 3 – kanał zgazowujący
Fig. 3. The numerical grid of the underground coal gasification reactor: 1 - mine excavation, 2 - coal seam, 3 - gasification channel

– reakcji objętościowych pomiędzy czynnikiem zgazowującym a produktami reakcji powierzchniowych:



Parametry kinetyki reakcji zgazowania zestawiono odpowiednio w tab. 2 (Wachowicz i in. 2015).

Tabela 2. Parametry przyjęte do obliczeń reakcji chemicznych zgazowania węgla

Table 2. Parameters used in calculations of chemical reactions of coal gasification

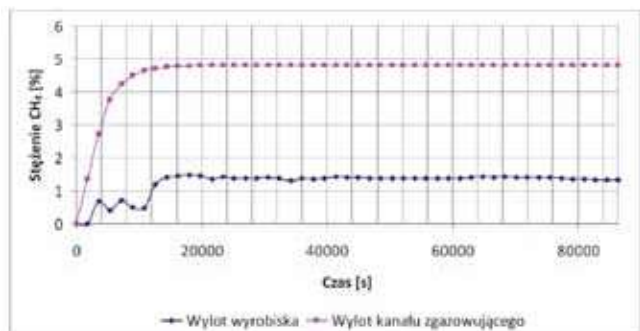
Lp.	Szybkość reakcji	β	A [1/s]	E [J mol ⁻¹]
a)	$r_1 = k_1 \cdot C_{\text{O}_2}$	0	0.89	$61.13 \cdot 10^{-3}$
b)	$r_2 = k_2 \cdot C_{\text{O}_2}$	0	0.84	$90.10 \cdot 10^{-3}$
c)	$r_3 = k_3 \cdot C_{\text{H}_2\text{O}}$	0	$5.96 \cdot 10^{-0.95}$	$208.3 \cdot 10^{-3}$
d)	$r_4 = k_4 \cdot C_{\text{H}_2}$	0	$6 \cdot 10^{-1.85}$	$7.53 \cdot 10^{-3}$
e)	$r_5 = k_5 \cdot C_{\text{CO}_2} \cdot C_{\text{H}_2}$	0	0.0265	3960
f)	$r_6 = k_6 \cdot C_{\text{CO}} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}}$	0	$2.75 \cdot 10^{+10}$	$8.36 \cdot 10^{-7}$

W obliczeniach numerycznych uwzględniono następujące ustawienia globalne w programie Ansys-Fluent, takie jak:

- stan nieustalony,
- ciśnienie zgazowania – 101 325 Pa,
- model turbulencji – k-ε,
- model wymiany energii,
- przyspieszenie ziemskie – 9,81 m s⁻²,
- zjawiska w skali czasowej – 86 400 s (24 godz.),
- chropowatość względna kanału zgazowującego – 0,1 m,
- zbieżność obliczeń – 1 · 10⁻⁴.

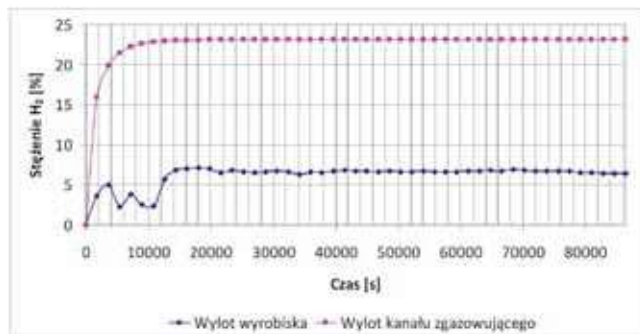
3.3. Wyniki badań modelowych

Poniżej w tab. 3 i tab. 4 dokonano zestawienia wyników rozwiązania modelu numerycznego CFD. Przedstawiono rozkład zmian głównych składników gazu procesowego w miejscu wystąpienia rozszczelnienia, na wylocie z kanału zgazowującego oraz w strumieniu powietrza przewietrzającego badany odcinek wyrobiska. Symulacje prowadzono przy udziale tlenu i powietrza w przedziale czasu 86 400 sekund (24 godzin). Natomiast na rys. 4 - 13 zaprezentowano wyniki ilościowego i jakościowego rozwiązania numerycznego analizowanego zagadnienia.



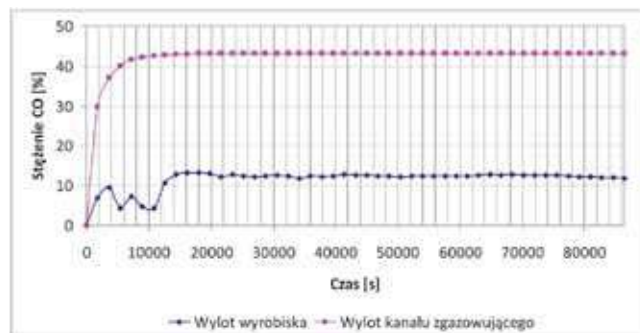
Rys. 4. Rozkład zmian stężenia metanu CH₄ na wylocie z wyrobiska oraz z kanału zgazowującego w czasie 86 400 sekund

Fig. 4. Changes of methane CH₄ concentration at the outlet of the mine excavation and at the outlet of the gasification channel in time interval of 86 400 seconds



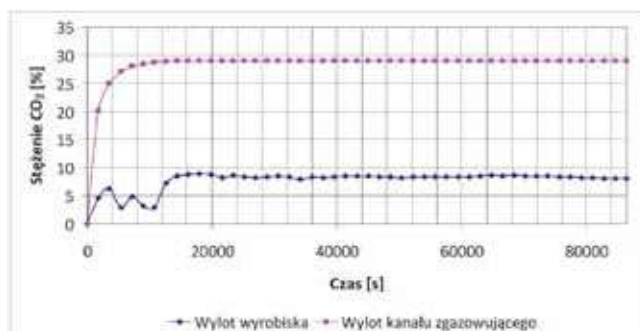
Rys. 5. Rozkład zmian stężenia wodoru H₂ na wylocie z wyrobiska oraz z kanału zgazowującego w czasie 86 400 sekund

Fig. 5. Changes of hydrogen H₂ concentration at the outlet of the mine excavation and at the outlet of the gasification channel in time interval of 86 400 seconds



Rys. 6. Rozkład zmian stężenia tlenku węgla CO na wylocie z wyrobiska oraz z kanału zgazowującego w czasie 86 400 sekund

Fig. 6. Changes of carbon monoxide CO concentration at the outlet of the mine excavation and at the outlet of the gasification channel in time interval of 86 400 seconds



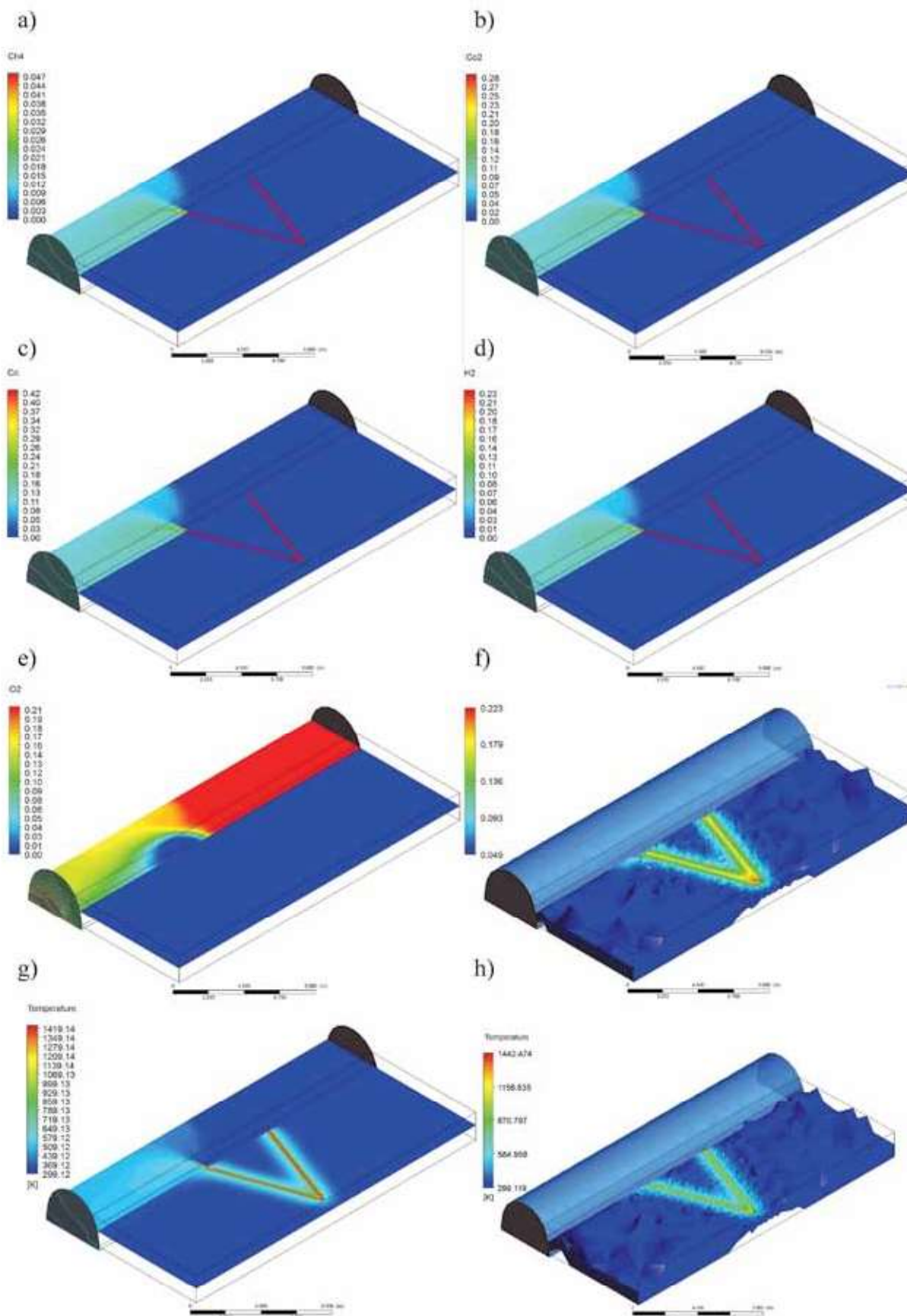
Rys. 7. Rozkład zmian stężenia dwutlenku węgla CO₂ na wylocie z wyrobiska oraz z kanału zgazowującego w czasie 86 400 sekund

Fig. 7. Changes of carbon dioxide CO₂ concentration at the outlet of the mine excavation and at the outlet of the gasification channel in time interval of 86 400 seconds

Tabela 3. Wyniki obliczeń CFD szukanych składników gazu procesowego na wylocie z kanału zgazowującego oraz na wylocie z wyrobiska w warunkach prowadzenia procesu podziemnego zgazowania węgla przy udziale tlenu

Table 3. Results of CFD calculations of components of the process gas at the outlet of the gasification channel and at the outlet of the mine excavation with the use of oxygen

Lp.	Czas [s]	Wylot kanału zgazowującego						Wylot wyrobiska					
		CH ₄ [%]	CO ₂ [%]	CO [%]	H ₂ [%]	O ₂ [%]	N ₂ [%]	CH ₄ [%]	CO ₂ [%]	CO [%]	H ₂ [%]	O ₂ [%]	N ₂ [%]
0	0	0	0	0	0	21	79	0	0	0	0	21	79
1	1800	1.355	20.03	29.71	15.93	7.28	25.69	0.345	4.64	6.88	3.69	17.97	66.83
2	3600	2.71	24.95	37	19.84	3.28	12.2	0.69	6.33	9.39	5.03	16.54	62.02
3	5400	3.76	26.99	40.03	21.47	1.64	6.12	0.4	2.89	4.28	2.3	16.65	73.48
4	7200	4.25	27.96	41.47	22.24	0.86	3.21	0.72	4.89	7.25	3.89	16.17	67.08
5	9000	4.51	28.46	42.21	22.64	0.46	1.72	0.5	3.18	4.72	2.53	16.21	72.86
6	10800	4.64	28.73	42.6	22.84	0.25	0.94	0.48	2.95	4.38	2.35	16.2	73.64
7	12600	4.72	28.87	42.81	22.96	0.14	0.51	1.18	7.2	10.67	5.72	15.19	60.04
8	14400	4.76	28.94	42.92	23.02	0.08	0.28	1.41	8.57	12.71	6.82	14.61	55.88
9	16200	4.78	28.99	42.99	23.05	0.04	0.15	1.46	8.85	13.12	7.04	14.28	55.25
10	18000	4.79	29.01	43.02	23.07	0.02	0.08	1.47	8.89	13.18	7.07	14.17	55.22
11	19800	4.8	29.02	43.04	23.08	0.01	0.05	1.45	8.77	13	6.97	13.95	55.86
12	21600	4.8	29.03	43.05	23.09	0.01	0.03	1.35	8.17	12.11	6.49	13.95	57.93
13	23400	4.8	29.03	43.06	23.09	0	0.01	1.42	8.6	12.76	6.84	13.92	56.46
14	25200	4.8	29.04	43.06	23.09	0	0.01	1.38	8.33	12.35	6.62	13.93	57.39
15	27000	4.8	29.04	43.06	23.09	0	0	1.37	8.27	12.26	6.57	13.93	57.6
16	28800	4.8	29.04	43.06	23.09	0	0	1.39	8.38	12.42	6.66	13.79	57.36
17	30600	4.8	29.04	43.06	23.09	0	0	1.41	8.5	12.61	6.76	13.65	57.07
18	32400	4.8	29.04	43.06	23.09	0	0	1.37	8.31	12.32	6.61	13.66	57.73
19	34200	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.32	7.95	11.79	6.32	13.67	58.95
20	36000	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.38	8.36	12.39	6.64	13.65	57.58
21	37800	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.36	8.19	12.15	6.52	13.66	58.12
22	39600	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.39	8.39	12.44	6.67	13.62	57.49
23	41400	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.42	8.57	12.72	6.82	13.55	56.92
24	43200	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.4	8.46	12.55	6.73	13.55	57.31
25	45000	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.4	8.45	12.53	6.72	13.55	57.35
26	46800	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.38	8.35	12.38	6.64	13.55	57.7
27	48600	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.39	8.39	12.45	6.67	13.55	57.55
28	50400	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.37	8.29	12.29	6.59	13.54	57.92
29	52200	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.38	8.35	12.38	6.64	13.52	57.73
30	54000	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.39	8.39	12.45	6.67	13.5	57.6
31	55800	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.38	8.34	12.37	6.63	13.5	57.78
32	57600	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.38	8.36	12.4	6.65	13.5	57.71
33	59400	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.39	8.37	12.42	6.66	13.5	57.66
34	61200	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.39	8.39	12.44	6.67	13.5	57.61
35	63000	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.4	8.45	12.53	6.72	13.5	57.4
36	64800	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.42	8.59	12.73	6.83	13.48	56.95
37	66600	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.41	8.5	12.61	6.76	13.48	57.24
38	68400	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.43	8.64	12.82	6.87	13.48	56.76
39	70200	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.41	8.52	12.64	6.78	13.48	57.17
40	72000	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.4	8.45	12.54	6.72	13.48	57.41
41	73800	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.4	8.44	12.51	6.71	13.46	57.48
42	75600	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.4	8.43	12.51	6.71	13.44	57.51
43	77400	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.39	8.4	12.46	6.68	13.4	57.67
44	79200	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.36	8.19	12.15	6.52	13.39	58.39
45	81000	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.35	8.17	12.12	6.5	13.35	58.51
46	82800	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.34	8.08	11.98	6.42	13.31	58.87
47	84600	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.33	8.03	11.91	6.39	13.28	59.06
48	86400	4.81	29.04	43.06	23.09	0	0	1.33	8.02	11.9	6.38	13.26	59.11



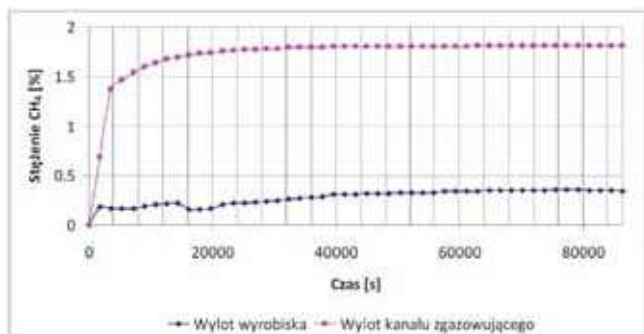
Rys. 8. Rozkładu zmian stężeniu CH₄ (a), CO₂ (b), CO (c), H₂ (d), O₂ (e) oraz temperatury (g i h) i porowatości pokładu węgla (f) w modelowym otoczeniu wyrobiska kopalni głębinowej w warunkach prowadzenia procesu zgazowania węgla tlenem po czasie 86 400 sekund

Fig. 8. Changes of the concentration of CH₄ (a), CO₂ (b), CO (c), H₂ (d), O₂ (e) and temperature (g & h) and porosity of coal seam (f) with the use of oxygen as gasification agent in the time interval of 86 400 seconds

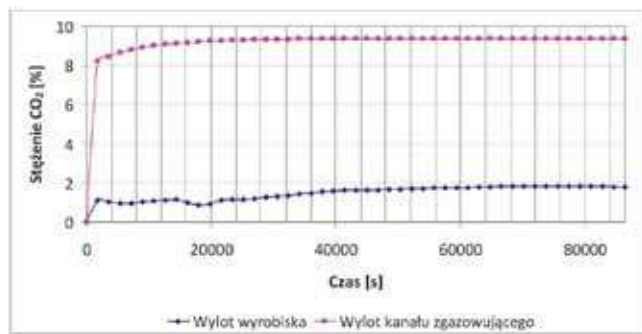
Tabela 4. Wyniki obliczeń CFD szukanych składników gazu procesowego na wylocie z kanału zgazowującego oraz na wylocie z wyrobiska w warunkach prowadzenia procesu podziemnego zgazowania węgla przy udziale powietrza

Table 4. Results of CFD calculations of components of the process gas at the outlet of the gasification channel and at the outlet of the mine excavation with the use of air

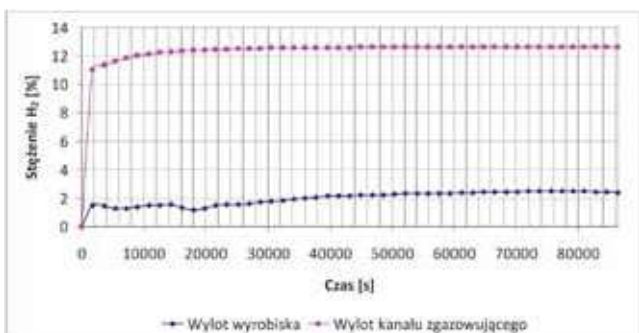
Lp.	Czas [s]	Wylot kanału zgazowującego						Wylot wyrobiska					
		CH ₄ [%]	CO ₂ [%]	CO [%]	H ₂ [%]	O ₂ [%]	N ₂ [%]	CH ₄ [%]	CO ₂ [%]	CO [%]	H ₂ [%]	O ₂ [%]	N ₂ [%]
0	0	0	0	0	0	21	79	0	0	0	0	21	79
1	1800	0.685	8.21	12.17	11.03	14.07	54.52	0.18	1.12	1.66	1.51	19.80	75.73
2	3600	1.37	8.43	12.51	11.33	10.34	56.01	0.17	1.06	1.57	1.42	18.26	77.53
3	5400	1.46	8.66	12.84	11.63	7.91	57.49	0.17	0.97	1.44	1.30	17.43	78.70
4	7200	1.54	8.81	13.07	11.84	6.2	58.54	0.17	0.95	1.41	1.28	16.98	79.23
5	9000	1.59	8.93	13.24	12	4.94	59.3	0.19	1.04	1.54	1.40	16.73	79.10
6	10800	1.63	9.02	13.37	12.12	3.98	59.88	0.20	1.09	1.63	1.47	16.59	79.01
7	12600	1.67	9.08	13.47	12.21	3.25	60.33	0.21	1.12	1.67	1.51	16.51	78.97
8	14400	1.69	9.14	13.55	12.28	2.66	60.68	0.22	1.17	1.73	1.57	16.46	78.85
9	16200	1.71	9.18	13.61	12.34	2.2	60.96	0.16	0.99	1.47	1.33	16.72	79.33
10	18000	1.73	9.21	13.66	12.38	1.83	61.19	0.16	0.88	1.31	1.18	16.6	79.87
11	19800	1.74	9.24	13.71	12.42	1.52	61.37	0.17	0.93	1.38	1.25	16.52	79.75
12	21600	1.75	9.26	13.74	12.45	1.27	61.52	0.21	1.13	1.68	1.52	16.48	78.98
13	23400	1.76	9.28	13.77	12.47	1.06	61.65	0.22	1.15	1.71	1.55	16.46	78.91
14	25200	1.77	9.3	13.79	12.5	0.89	61.75	0.22	1.15	1.71	1.55	16.43	78.94
15	27000	1.77	9.31	13.81	12.51	0.75	61.84	0.23	1.21	1.8	1.63	16.41	78.72
16	28800	1.78	9.32	13.83	12.53	0.63	61.91	0.24	1.26	1.87	1.69	16.39	78.55
17	30600	1.78	9.33	13.84	12.54	0.53	61.97	0.25	1.31	1.94	1.76	16.38	78.36
18	32400	1.79	9.34	13.85	12.55	0.45	62.02	0.26	1.34	1.99	1.81	16.38	78.22
19	34200	1.79	9.35	13.86	12.56	0.38	62.06	0.27	1.44	2.13	1.93	16.37	77.86
20	36000	1.79	9.35	13.87	12.57	0.32	62.1	0.28	1.48	2.2	1.99	16.36	77.69
21	37800	1.79	9.36	13.87	12.57	0.27	62.13	0.29	1.54	2.28	2.07	16.3	77.52
22	39600	1.8	9.36	13.88	12.58	0.23	62.16	0.31	1.59	2.36	2.14	16.23	77.37
23	41400	1.8	9.36	13.88	12.58	0.2	62.18	0.31	1.62	2.4	2.18	16.16	77.33
24	43200	1.8	9.37	13.89	12.58	0.17	62.2	0.31	1.62	2.4	2.18	16.07	77.42
25	45000	1.8	9.37	13.89	12.59	0.14	62.21	0.32	1.64	2.43	2.21	15.94	77.46
26	46800	1.8	9.37	13.9	12.59	0.12	62.22	0.32	1.65	2.45	2.22	15.79	77.57
27	48600	1.8	9.37	13.9	12.59	0.1	62.23	0.32	1.67	2.47	2.24	15.67	77.63
28	50400	1.8	9.37	13.9	12.59	0.09	62.24	0.33	1.69	2.51	2.28	15.55	77.64
29	52200	1.8	9.37	13.9	12.6	0.07	62.25	0.33	1.71	2.54	2.3	15.43	77.69
30	54000	1.8	9.38	13.9	12.6	0.06	62.26	0.33	1.72	2.55	2.31	15.33	77.76
31	55800	1.8	9.38	13.9	12.6	0.05	62.26	0.33	1.74	2.58	2.34	15.22	77.79
32	57600	1.8	9.38	13.91	12.6	0.04	62.27	0.34	1.74	2.58	2.34	15.14	77.86
33	59400	1.8	9.38	13.91	12.6	0.04	62.27	0.34	1.75	2.59	2.35	15.06	77.91
34	61200	1.8	9.38	13.91	12.6	0.03	62.28	0.34	1.76	2.61	2.37	15	77.92
35	63000	1.81	9.38	13.91	12.6	0.03	62.28	0.34	1.78	2.64	2.4	14.96	77.88
36	64800	1.81	9.38	13.91	12.6	0.02	62.28	0.35	1.8	2.67	2.42	14.92	77.84
37	66600	1.81	9.38	13.91	12.6	0.02	62.28	0.35	1.82	2.7	2.45	14.88	77.8
38	68400	1.81	9.38	13.91	12.6	0.02	62.29	0.35	1.82	2.7	2.45	14.85	77.83
39	70200	1.81	9.38	13.91	12.6	0.01	62.29	0.35	1.83	2.71	2.45	14.83	77.83
40	72000	1.81	9.38	13.91	12.6	0.01	62.29	0.35	1.84	2.73	2.47	14.8	77.81
41	73800	1.81	9.38	13.91	12.6	0.01	62.29	0.35	1.84	2.73	2.47	14.78	77.83
42	75600	1.81	9.38	13.91	12.6	0.01	62.29	0.36	1.85	2.74	2.48	14.76	77.81
43	77400	1.81	9.38	13.91	12.6	0.01	62.29	0.36	1.85	2.74	2.48	14.75	77.82
44	79200	1.81	9.38	13.91	12.6	0.01	62.29	0.36	1.85	2.74	2.48	14.74	77.83
45	81000	1.81	9.38	13.91	12.6	0.01	62.29	0.35	1.84	2.73	2.47	14.74	77.87
46	82800	1.81	9.38	13.91	12.6	0	62.29	0.35	1.82	2.7	2.45	14.74	77.94
47	84600	1.81	9.38	13.91	12.6	0	62.29	0.35	1.81	2.68	2.43	14.75	77.98
48	86400	1.81	9.38	13.91	12.6	0	62.29	0.34	1.79	2.65	2.4	14.75	78.07



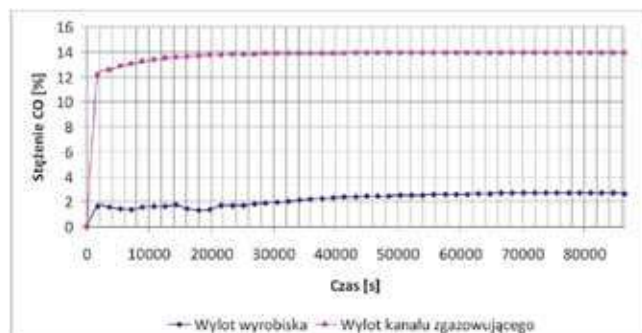
Rys. 9. Rozkład zmian stężenia metanu CH₄ na wylocie z wyrobiska oraz z kanału zgazowującego w czasie 86 400 sekund
 Fig. 9. Changes of methane CH₄ concentration at the outlet of the mine excavation and at the outlet of the gasification channel in time interval of 86 400 seconds



Rys. 11. Rozkład zmian stężenia tlenku węgla CO na wylocie z wyrobiska oraz z kanału zgazowującego w czasie 86 400 sekund
 Fig. 11. Changes of carbon monoxide CO concentration at the outlet of the mine excavation and at the outlet of the gasification channel in time interval of 86 400 seconds



Rys. 10. Rozkład zmian stężenia wodoru H₂ na wylocie z wyrobiska oraz z kanału zgazowującego w czasie 86 400 sekund
 Fig. 10. Changes of hydrogen H₂ concentration at the outlet of the mine excavation and at the outlet of the gasification channel in time interval of 86 400 seconds



Rys. 12. Rozkład zmian stężenia dwutlenku węgla CO₂ na wylocie z wyrobiska oraz z kanału zgazowującego w czasie 86 400 sekund
 Fig. 12. Changes of carbon dioxide CO₂ concentration at the outlet of the mine excavation and at the outlet of the gasification channel in time interval of 86 400 seconds

Przeprowadzone symulacje CFD potwierdzają dużą wrażliwość procesu zgazowania węgla na rodzaj zastosowanego czynnika zgazowującego, co przekłada się bezpośrednio na skład chemiczny uzyskiwanego gazu procesowego, a tym samym na jego kaloryczność. W przypadku prowadzenia procesu zgazowania węgla tlenem, w przeciwieństwie do powietrza jako czynnik zgazowujący, znacząco wzrasta zawartość wodoru H₂ - z wartości 12.6% do poziomu 23.1%, metanu CH₄ z wartości 1.8% do poziomu 4.8%, dwutlenku węgla CO₂ z wartości 9.4% do poziomu 29% i tlenku węgla CO z wartości 13.9% do poziomu 43%, a także temperatury wzdłuż kanału zgazowującego. Natomiast wartości stężeń substancji palnej w strumieniu powietrza niezależnego, w granicach którego może wystąpić wybuch przestrzenny, są znacząco przekroczone (Sawicki 2005).

4. Symulacja wybuchu przestrzennego w wyrobisku

W celu ustalenia prognozowanych skutków wydostania się produktów zgazowania węgla do strumienia powietrza niezależnego, przeprowadzono symulację numeryczną w programie komputerowym VEX (Rychter, Teodorczyk 2002). Za jego pośrednictwem wykonano obliczenia przebiegu wybuchu mieszaniny gazowo-powietrznej w objętości wyrobiska, która sprowadza się do uzyskania rozwiązania następujących zależności:
 – równanie zachowania masy (Rychter, Teodorczyk 2002):

$$\frac{dw_u}{dt} + \frac{dw_b}{dt} + \left(\frac{dw_{vu}}{dt} + \frac{dw_{vb}}{dt} \right) = 0 \quad (12)$$

gdzie:

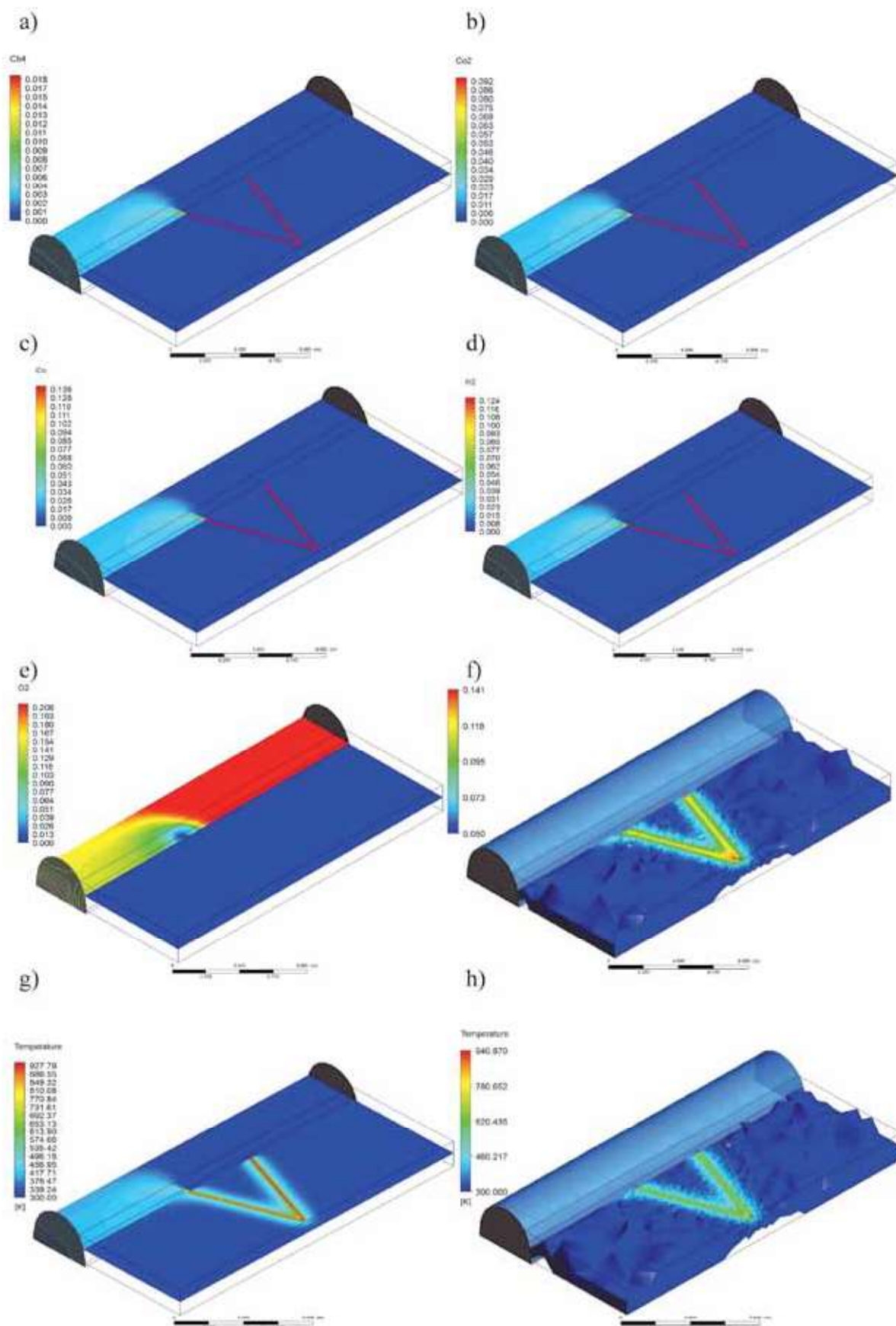
- t – czas, s
- w_u – udział masy gazów niespalonych w wyrobisku, [kg]
- w_b – udział masy gazów spalonych w wyrobisku, [kg]
- w_{vu} – udział masy gazów wentylowanych w wyrobisku, [kg]
- w_{vb} – udział masy spalin wentylowanych w wyrobisku, [kg]

– równanie zachowania energii (Rychter, Teodorczyk 2002):

$$\frac{d}{dt}(w_u E_u) + \frac{d}{dt}(w_b E_b) + \left(\frac{dw_{vu}}{dt} E_{vu} + \frac{dw_{vb}}{dt} E_{vb} \right) + \frac{dq}{dt} = 0 \quad (13)$$

gdzie:

- t – czas, s
- E_u – energia wewnętrzna gazów niespalonych w wyrobisku, [J kg⁻¹]
- E_b – energia wewnętrzna gazów spalonych w wyrobisku, [J kg⁻¹]
- E_{vu} – energia wewnętrzna gazów wentylowanych w wyrobisku, [J kg⁻¹]
- E_{vb} – energia wewnętrzna spalin wentylowanych w wyrobisku, [J kg⁻¹]
- w_u – udział masy gazów niespalonych w wyrobisku, [kg]
- w_b – udział masy gazów spalonych w wyrobisku, [kg]
- w_{vu} – udział masy gazów wentylowanych w wyrobisku, [kg]



Rys. 13. Rozkładu zmian stężenia: CH_4 (a), CO_2 (b), CO (c), H_2 (d), O_2 (e) i temperatury (g i h) oraz porowatości pokładu węgla (f) w modelowym otoczeniu wyrobiska kopalni głębinowej w warunkach prowadzenia procesu zgazowania węgla powietrzem po czasie 86 400 sekund

Fig. 13. Changes of the concentration of CH_4 (a), CO_2 (b), CO (c), H_2 (d), O_2 (e) and temperature (g & h) and porosity of coal seam (f) with the use of air as gasification agent in the time interval of 86 400 seconds

- w_{vb} – udział masy spalin wentylowanych w wyrobisku, [kg]
 q – jednostkowe ciepło wymieniane ze ścianą wyrobiska, [J s⁻¹]

Analizę numeryczną prowadzono w bloku przeznaczonym do wykonywania obliczeń przebiegu spalania składników gazowych dla geometrii zamkniętych i wentylowanych. Symulacją objęto mechanizm zapłonu mieszaniny wodoru i metanu z powietrzem w skończonej geometrii wyrobiska górnictwa, w warunkach ustalonych prowadzenia procesu zgazowania węgla, w przedziale czasu pomiędzy 60 000 a 86 400 sekundą. W obliczeniach uwzględniono następujące założenia (Rychter, Teodorczyk 2002):

- mieszanina gazu procesowego powietrza tworzy roztwór doskonały,
- zapłon mieszaniny następuje punktowo,
- w chwili zapłonu produktów zgazowania pojawia się płomień, który przemieszcza się promieniowo oraz wzdłuż wyrobiska,
- proces spalania odbywa się w warunkach adiabatycznych,
- mieszanina gazów i produktów spełnia termiczne równanie stanu dla gazów doskonałych.

Uwzględniono następujące warunki początkowe rozwiązania modelu numerycznego w programie VEX:

- ciśnienie początkowe w wyrobisku – $p=0.101$ [MPa],
- średnia temperatura w badanym odcinku wyrobiska – $T=300$ [K],
- promień wyrobiska – $R = 2.01$ [m],
- długość wyrobiska – $L = 25$ [m],
- wartość współczynnika stechiometrycznego mieszaniny gaz procesowy-powietrze – $\phi < 1.0$,

- wartość współczynnika konwekcyjnej wymiany ciepła – $C=0$ (przemiana adiabatyczna).

4.1. Wyniki badań modelowych

W tab. 4, 5 i 6 dokonano zestawienia wartości zmian parametrów bezpośrednio determinujących zjawisko wybuchu składników gazu procesowego w strumieniu powietrza niezależnego w zadanej geometrii wyrobiska. Natomiast na rys. 14÷17 przedstawiono przebieg zmian tych parametrów w funkcji czasu.

5. Podsumowanie i wnioski

Opracowano model numeryczny, odwzorowujący sieć wentylacyjną kopalni głębinowej, z zamiarem określenia wartości strumienia powietrza niezależnego w poszczególnych odcinkach wyrobisk górnictwa o zadanej geometrii. Uzyskane dane umożliwiły zdefiniowanie modelu numerycznego georeaktora symulującego proces zgazowania węgla tlenem i powietrzem w modelowym otoczeniu górotworu, z zastosowaniem metod numerycznej mechaniki płynów. Za jego pośrednictwem prognozowano wystąpienie stanu awaryjnego w sieci wentylacyjnej kopalni, polegającego na wydestynowaniu się gazu procesowego do wyrobiska w wyniku rozszczelnienia rurociągu odprowadzającego gaz syntezowy z wylotu georeaktora. Otrzymane informacje dotyczące składu chemicznego gazu procesowego wzdłuż badanej geometrii wyrobiska pozwoliły na wykonanie obliczeń prognozowanych skutków wydostania się składników gazu procesowego z georeaktora do wyrobiska przewietrzanego strumieniem powietrza niezależnego.

Tabela 5. Wyniki obliczeń numerycznych spalania CH₄ w strumieniu powietrza niezależnego w warunkach rozszczelnienia georeaktora w zależności od położenia punktu zapłonu

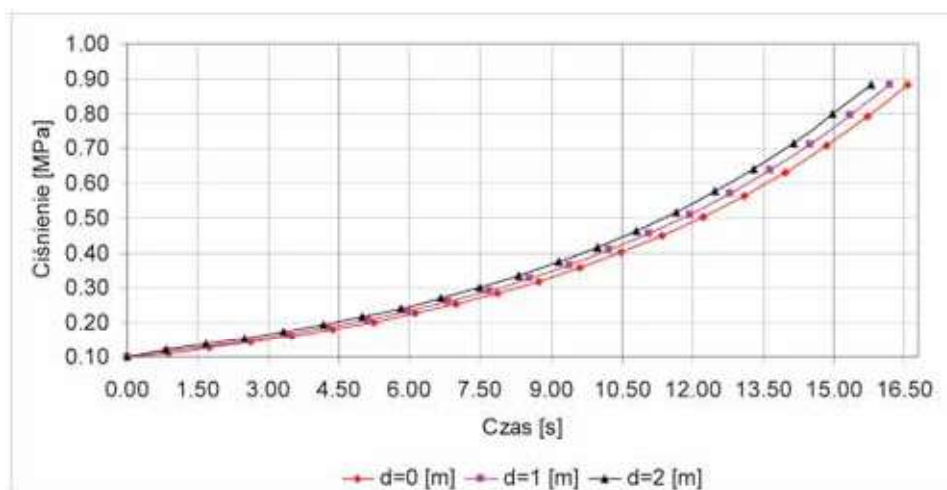
Table 5. Results of numerical calculations of combustion process of CH₄ in the stream of air flow along the mine excavation in relation to the ignition point position

Czas [s]			Ciśnienie [MPa]			Temperatura [K]			Płomień [m]		
d=0 [m]	d=1 [m]	d=2 [m]	d=0 [m]	d=1 [m]	d=2 [m]	d=0 [m]	d=1 [m]	d=2 [m]	d=0 [m]	d=1 [m]	d=2 [m]
0	0	0	0.101	0.101	0.101	300	300	300	0	0	0
0.87	0.853	0.832	0.1113	0.1166	0.1204	2339.7	2346.9	2352	2.42	2.33	2.26
1.75	1.707	1.664	0.1269	0.1327	0.1391	2360.1	2366.9	2374	4.60	4.39	4.20
2.62	2.56	2.496	0.1432	0.1493	0.1561	2378.3	2384.5	2391.1	6.58	6.27	5.99
3.49	3.413	3.328	0.1611	0.1675	0.1747	2395.7	2401.3	2407.3	8.42	8.01	7.63
4.37	4.266	4.16	0.1810	0.1877	0.1951	2412.4	2417.5	2423	10.11	9.63	9.17
5.24	5.12	4.993	0.2031	0.2101	0.2178	2428.6	2433.2	2438.2	11.68	11.12	10.59
6.11	5.973	5.825	0.2278	0.2349	0.2429	2444.3	2448.4	2452.9	13.14	12.52	11.92
6.99	6.826	6.657	0.2553	0.2627	0.2708	2459.5	2463.3	2467.3	14.49	13.82	13.17
7.86	7.679	7.489	0.2861	0.2936	0.3019	2474.4	2477.7	2481.3	15.76	15.04	14.34
8.73	8.533	8.321	0.3205	0.328	0.3364	2488.9	2491.9	2495	16.95	16.19	15.44
9.61	9.387	9.153	0.3590	0.3665	0.3747	2503.1	2505.7	2508.4	18.06	17.26	16.47
10.48	10.241	9.986	0.4021	0.4094	0.4175	2517	2519.2	2521.6	19.11	18.28	17.45
11.35	11.094	10.819	0.4502	0.4573	0.4651	2530.6	2532.4	2534.4	20.10	19.23	18.38
12.23	11.948	11.651	0.5041	0.5108	0.5181	2543.9	2545.4	2547.1	21.03	20.14	19.26
13.10	12.802	12.484	0.5645	0.5706	0.5772	2557	2558.2	2559.5	21.92	21.00	20.09
13.97	13.656	13.316	0.6323	0.6375	0.643	2569.9	2570.8	2571.8	22.76	21.82	20.89
14.85	14.51	14.149	0.7081	0.7121	0.7164	2582.6	2583.2	2583.9	23.57	22.61	21.65
15.72	15.363	14.981	0.7930	0.7955	0.7981	2595.1	2595.4	2595.8	24.33	23.36	22.38
16.58	16.2	15.795	0.8837	0.8836	0.8837	2606.9	2606.9	2606.9	25.08	24.08	23.09
Koniec spalania											

Tabela 6. Wyniki obliczeń numerycznych spalania H_2 w strumieniu powietrza niezależnego w warunkach rozszczelnienia georeaktora w zależności od położenia punktu zapłonu

Table 6. Results of numerical calculation of combustion process of H_2 in the stream of air flow along the mine excavation in function of the ignition point position

Czas [s]			Ciśnienie [MPa]			Temperatura [K]			Płomień [m]		
d=0 [m]	d=1 [m]	d=2 [m]	d=0 [m]	d=1 [m]	d=2 [m]	d=0 [m]	d=1 [m]	d=2 [m]	d=0 [m]	d=1 [m]	d=2 [m]
0	0	0	0.101	0.101	0.101	300	300	300	0	0	0
0.12	0.118	0.1144	0.1068	0.1103	0.1108	2510.4	2515.5	2516.2	1.91	1.84	1.78
0.24	0.236	0.2287	0.1202	0.1258	0.1319	2528.8	2535.8	2543.1	3.70	3.54	3.40
0.36	0.354	0.3431	0.1328	0.1387	0.1453	2544.2	2550.8	2557.6	5.40	5.16	4.93
0.49	0.472	0.4575	0.1466	0.1528	0.1597	2559	2565.2	2571.6	7.02	6.70	6.40
0.61	0.59	0.5718	0.1619	0.1684	0.1756	2573.6	2579.3	2585.3	8.57	8.18	7.80
0.73	0.708	0.6861	0.1789	0.1857	0.1932	2588	2593.3	2598.9	10.05	9.59	9.15
0.85	0.826	0.8005	0.1981	0.2052	0.2129	2602.4	2607.3	2612.4	11.47	10.95	10.45
0.97	0.944	0.9148	0.2197	0.227	0.235	2616.7	2621.1	2625.8	12.83	12.25	11.69
1.09	1.062	1.0292	0.2440	0.2515	0.2598	2630.9	2634.9	2639.2	14.14	13.51	12.90
1.22	1.18	1.1435	0.2717	0.2793	0.2878	2645.1	2648.8	2652.6	15.40	14.72	14.05
1.34	1.298	1.2578	0.3031	0.3109	0.3194	2659.3	2662.6	2666	16.61	15.89	15.17
1.46	1.416	1.3721	0.3390	0.3468	0.3553	2673.6	2676.4	2679.4	17.78	17.01	16.26
1.58	1.534	1.4864	0.3802	0.3878	0.3961	2687.9	2690.3	2692.9	18.91	18.10	17.31
1.70	1.652	1.6008	0.4276	0.4349	0.4429	2702.2	2704.2	2706.4	20.01	19.16	18.33
1.82	1.77	1.7152	0.4823	0.489	0.4965	2716.7	2718.3	2720.1	21.07	20.19	19.32
1.94	1.888	1.8295	0.5458	0.5516	0.5581	2731.2	2732.4	2733.8	22.10	21.19	20.29
2.07	2.006	1.9438	0.6199	0.6242	0.6293	2745.9	2746.7	2747.7	23.11	22.17	21.23
2.19	2.124	2.0582	0.7064	0.7088	0.712	2760.8	2761.2	2761.7	24.10	23.13	22.16
2.31	2.2413	2.1716	0.8045	0.8045	0.8045	2775.4	2775.4	2775.4	25.08	24.08	23.09
Koniec spalania											



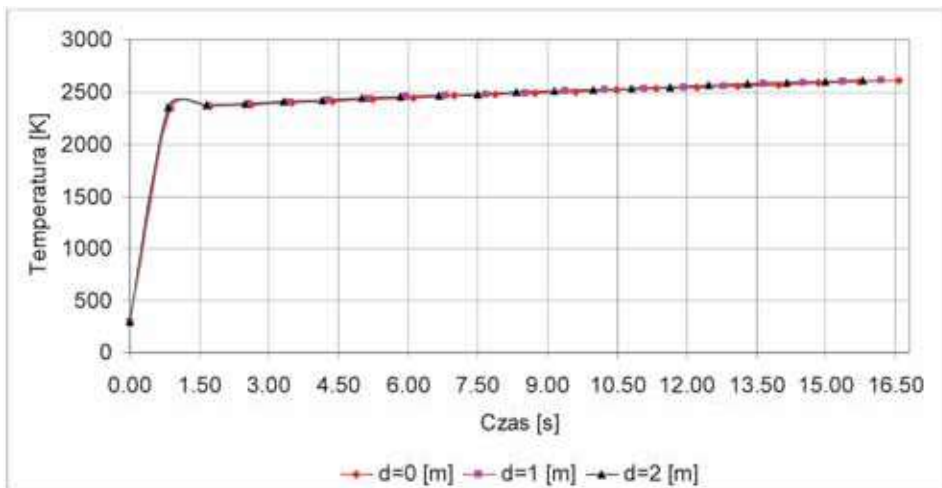
Rys. 14. Rozkładu zmian ciśnienia mieszaniny powietrzno-metanowej w analizowanej geometrii wyrobiska w zależności od położenia punktu zapłonu

Fig. 14. The pressure changes of air-methane mixture in the analyzed geometry of mine excavation in relation to the ignition point position

W oparciu o wyniki przeprowadzonych badań modelowych sformułowano następujące wnioski:

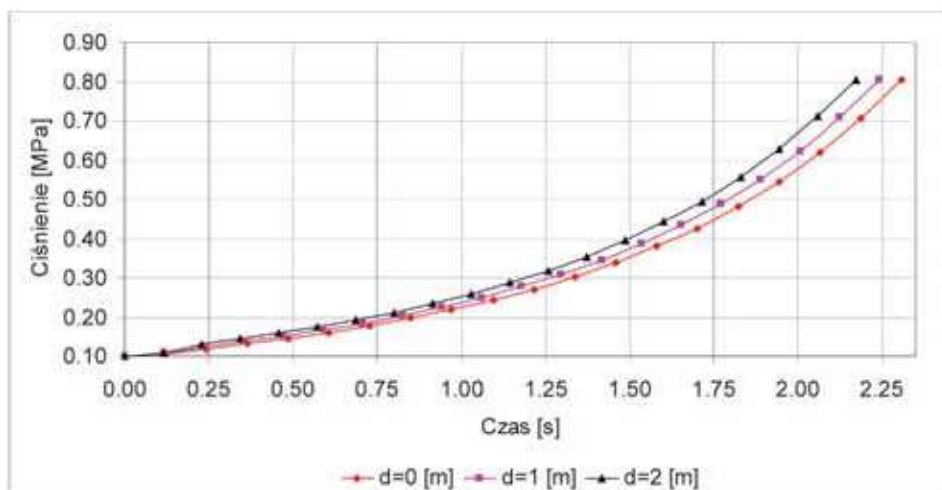
1. Wytypowano programy komputerowe, które stanowią potencjalne narzędzia informacyjne wspomagające projektowanie instalacji do podziemnego zgazowania węgla.
2. opracowane modele numeryczne prognozowania skutków wystąpienia zdarzeń niebezpiecznych wynikających z pracy georeaktora w sąsiedztwie czynnego wyrobiska
3. Zastosowane modele matematyczne przyczyniają się do lepszego zrozumienia zjawisk fizykochemicznych związanych z realizacją procesu zgazowania węgla w warunkach czynnej kopalni głębinowej.

sieci wentylacyjnej kopalni, stanowią wynik podjętych prac, a tym samym upoważniają do prowadzenia badań modelowych za pośrednictwem symulacji komputerowych.



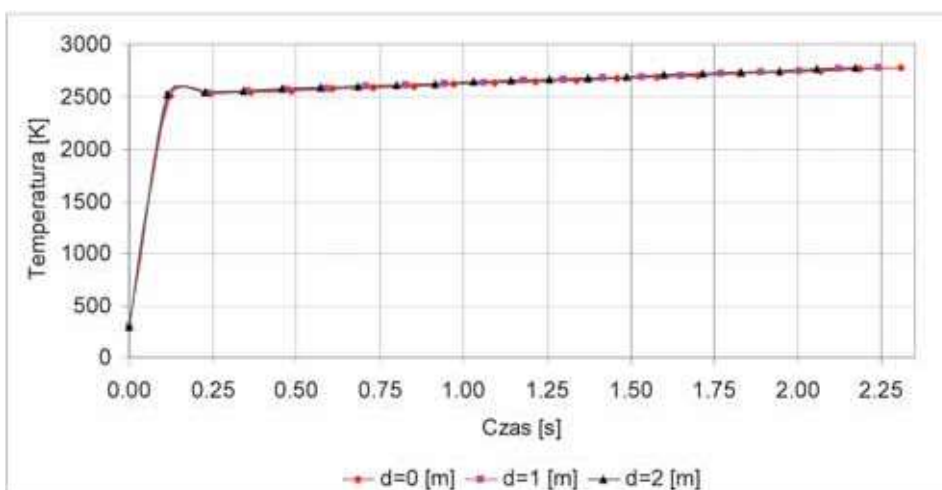
Rys. 15. Rozkład zmian temperatury spalanej mieszaniny powietrzno-metanowej w analizowanej geometrii wyrobiska w zależności od położenia punktu zapłonu

Fig. 15. The temperature changes of air-methane mixture in the analyzed geometry of mine excavation in relation to the ignition point position



Rys. 16. Rozkład zmian ciśnienia spalanej mieszaniny powietrzno-wodorowej w analizowanej geometrii wyrobiska w zależności od położenia punktu zapłonu

Fig. 16. The pressure changes of air-hydrogen mixture in the analyzed geometry of mine excavation in relation to the ignition point position



Rys. 17. Rozkład zmian temperatury spalanej mieszaniny powietrzno-wodorowej w analizowanej geometrii wyrobiska w zależności od położenia punktu zapłonu

Fig. 17. The temperature changes of air-hydrogen mixture in the analyzed geometry of mine excavation in relation to the ignition point position

Praca została przygotowana w oparciu o wyniki prowadzonych badań w pracy o symbolu 11340255-350 finansowanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- ANSYS FLUENT 2009 – Documentation. User Guide.
- BIAŁECKA B. 2008 - Podziemne zgazowanie węgla. Podstawy procesu decyzyjnego. Wydawnictwo GIG, Katowice.
- BIELEWICZ T., PRUS B., HONYSZ J. 1994 - Górnictwo, cz. 2. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice.
- CHMURA K. 1968 - Przewodność cieplna skał i węgla górnośląskiego karbonu. Praca habilitacyjna. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, nr 190.
- DZIURZYŃSKI W. 1998 - Prognozowanie procesu przewietrzania kopalni głębinowej w warunkach pożaru podziemnego. Studia, Rozprawy, Monografie 56. Wydawnictwo IGSMiE PAN.
- JANOSZEK T. 2013 - Exergy analysis of the coal gasification process in ex-situ conditions. *Journal of Sustainable Mining*, 12 (3), 32–37.
- JANOSZEK T., SYGAŁA A., BUKOWSKA M. 2013a - CFD simulation of temperature variation in carboniferous rock strata during UCG. *Journal of Sustainable Mining*, 12(4), str. 34–44.
- JANOSZEK T., ŁĄCZNY J.M., STAŃCZYK K., SMOLIŃSKI A., WIATOWSKI M. 2013b - Modelling of gas flow in the underground coal gasification process and its interactions with the rock environment. *Journal of Sustainable Mining*, vol. 12, nr 02, pp. 8-20.
- KRAUSE E., KRZEMIENIA A. 2015 - Analiza warunków wentylacyjno-gazowych w trakcie prowadzenia próby podziemnego zgazowania metodą szybową. „Przeгляд Górnicy”, 71(1), s. 31-36.
- RYCHTER T., TEODORCZYK A. 2002 - Obliczenia wybuchów gazowych w przestrzeniach zamkniętych i wentylowanych. PWN, Warszawa.
- SAWICKI T. 2005 - Wybuchy przestrzenne. „Bezpieczeństwo Pracy” nr 11, s. 22-25.
- STAŃCZYK K., SMOLIŃSKI A., KAPUSTA K., WIATOWSKI M., ŚWIĄDROWSKI J., KOTYRBA A., ROGUT J. 2010 - Dynamic Experimental Simulation of Hydrogen Oriented Underground Coal Gasification. *Fuel* 89, s. 3307-3314.
- SHIRAZI A.S. 2012 - CFD simulation of Underground Coal Gasification. Master of Science thesis. University of Alberta.
- WACHOWICZ J., JANOSZEK T., IWASZENKO S. 2010 - Model tests of the coal gasification process. *Archives of Mining Sciences* 55 (2), s. 249-262
- WACHOWICZ J., ŁĄCZNY J.M., IWASZENKO S., JANOSZEK T. 2015 - Modelling underground coal gasification process using CFD methods. *Archives of Mining Sciences* 60 (3), s. 663-676.
- WACHOWICZ J., ŁĄCZNY J.M., IWASZENKO S., JANOSZEK T., CEMPA-BALEWICZ M. 2013 - Zastosowanie pakietu FLUENT do symulacji procesu podziemnego zgazowania węgla – koncepcja metody. „Przeгляд Górnicy” 69 (2), s. 64-71.
- WACHOWICZ J., ŁĄCZNY J.M., IWASZENKO S., JANOSZEK T., CEMPA-BALEWICZ M. 2014 - Symulacyjne badanie procesu ex-situ zgazowania węgla kamiennego wspomaganie metodami CFD. „Przeгляд Górnicy” 70, nr 11. s. 70-75.
- WIATOWSKI M., STAŃCZYK K., ŚWIĄDROWSKI J., KAPUSTA K., CYBULSKI K., KRAUSE E., GRABOWSKI J., ROGUT J., HOWANIEC N., SMOLIŃSKI A. 2012 - Semi-technical underground coal gasification (UCG) using the shaft method in Experimental Mine “Barbara”, *Fuel* (99), s. 170-179 .
- ŻOGAŁA A., JANOSZEK T. 2015 - CFD simulations of influence of steam in gasification agent on parameters of UCG process. *Journal of Sustainable Mining*, 14(1), s. 2-11.

Artykuł wpłynął do redakcji – czerwiec 2016
Artykuł akceptowano do druku 5.03.2017