UKD 622.333:622.1:550.8:661.5

Zastosowanie schłodzonego azotu do likwidacji termicznych skutków działania georeaktora podziemnego zgazowania węgla

The use of cooled nitrogen to eliminate thermal effects of the operation of the georeactor for underground coal gasification

Dr inż. Janusz Cygankiewicz)*

Treść: Wyznaczono pole temperatury skał wokół czynnego georeaktora podziemnego zgazowania węgla. Dla ograniczenia skutków działania tego georeaktora zaproponowano podanie w miejsce jego działania azotu schłodzonego do temperatury -100°C. Korzystając z metody modelowania numerycznego badano jaki jest wpływ czasu podawania schłodzonego azotu na zmiany pola temperatury skał. Zmiany tego pola badano również dla przypadku, gdy zimny azot nie jest podawany.

Abstract: The temperature field of rocks surrounding the active georeactor for underground coal gasification was determined. A proposal for the reduction of adverse effects of the georeactor operation was submitted, consisting in feeding nitrogen gas cooled down to 100°C into the place of operation. By the use of the numerical modeling method, it was examined how the duration of feeding cooled nitrogen affects the variations in the temperature field of rocks. Variations of this field were also examined for the case in which the cooled nitrogen was not used.

Słowa kluczowe:

georeaktor podziemnego zgazowania węgla, pole temperatury skał, przenoszenie ciepła, schłodzony azot

Key words:

georeactor for underground coal gasification, temperature field of rocks, heat transfer, cooled nitrogen

1. Wprowadzenie

Badania pilotowej instalacji georeaktora podziemnego zgazowania węgla [5] wykazały, że jego praca powoduje znaczne nagrzanie otaczającego masywu skalnego. Jeśli przewodem płyną produkty zgazowania o temperaturze około 1000°C, wówczas temperatura ścian przewodu jest zbliżona do temperatury gorących gazów (t_s = 975°C), zaś temperatura otaczającego masywu skalnego w najbliższym otoczeniu przewodu wynosi setki stopni Celsjusza (tablica 1). Podwyższona temperatura otaczającego masywu skalnego sięga kilkunastu metrów. Wysoka temperatura górotworu stanowi poważne zagrożenie pożarowe. Z uwagi na zmiany temperatury gazów wzdłuż przewodu zagrożenie to jest największe na początku przewodu, którym płyną wymienione gazy. Aby zagrożenie pożarowe ograniczyć do minimum, należy zastosować środki do obniżenia temperatury otaczającego masywu skalnego. Firma „AZIS" – Mining Service Sp. z o.o. zaproponowała zastosowanie schłodzonego azotu. Wyniki przeprowadzonych prób w Kopalni „Wieczorek" okazały się zachęcające. W artykule postanowiono zbadać skuteczność tego środka prewencji na przykładzie pilotowej instalacji, która pracowała na Kopalni „Wieczorek".

Tablica 1. Modelowanie temperatury masywu skalnego wokół czynnego georeaktora (prognozowana temperatura skał otaczających przewód z gorącymi spalinami)

Table 1. Modeling of the temperature of the rock mass around the active georeactor (projected temperature of rocks surrounding a pipe with hot exhaust fumes)

x, m	t_{spalin}	0	1	2	3	4	6	8	10	12	13
0	1000	974,6	456,5	263,2	158,0	96,9	42,5	27,7	24,6	24,1	24,0
5	927	903,0	424,1	245,3	148,0	91,4	41,2	27,4	24,5	24,1	24,0
10	860	837,8	394,4	228,9	138,8	86,4	39,9	27,2	24,5	24,1	24,0
15	798	777,5	367,0	213,7	130,3	81,8	38,7	26,9	24,4	24,1	24,0
20	740	721,0	341,3	199,5	122,3	77,5	37,6	26,7	24,4	24,0	24,0
25	687	669,4	317,8	186,5	115,0	73,5	36,6	26,5	24,4	24,0	24,0
30	637	620,7	295,6	174,3	108,2	69,8	35,7	26,3	24,4	24,0	24,0
35	591	575,9	275,2	163,0	101,9	66,4	34,8	26,1	24,3	24,0	24,0
40	549	535,1	256,6	152,7	96,1	63,2	34,0	26,0	24,3	24,0	24,0
46	502	489,3	235,8	141,2	89,6	59,7	33,1	25,8	24,3	24,0	24,0

x – odległość od ścianki przewodu w głąb górotworu oraz wzdłuż przewodu, m

*) Główny Instytut Górnictwa, Katowice

2. Metoda badań i przyjęte założenia

W badaniach przyjęto metodę modelowania numerycznego. W tym celu wyznaczono pole temperatury otaczającego masywu skalnego, przyjmując różne czasy podawania schłodzonego azotu, przy czym zastosowano tutaj metodę różnic skończonych [6]. Pole temperatury wyznaczano wokół przewodu, którym płynęły gorące produkty spalania. Długość przewodu wynosiła L = 46 m, a jego średnica D = 0,3 m. Zgodnie z deklaracjami Kierownictwa „AZIS" – Mining Service Sp. z o.o. przyjęto, że do przewodu, którym płynęły gorące produkty spalania podawany jest azot w ilości V = 1200 m^3/h ≈ 0,333 m^3/s schłodzony do temperatury -10^{0}C. Dla tak przyjętych założeń współczynnik przenoszenia ciepła od ścian przewodu do chłodnego azotu α obliczony według wzoru zaproponowanego przez E. Kempfa [3]:

$$\alpha = \frac{3{,}842552V/D^2}{1-0{,}056832\left(\frac{D}{V}\right)^{0{,}125}} \qquad (1)$$

równy jest α = 15,077 W/(m^2·K).

Ponadto, na podstawie literatury [1] przyjęto współczynnik przewodnictwa cieplnego skał w badanym rejonie równy λ_q = 2,4 W/(m·K), współczynnik wyrównywania temperatury skał równy $a_q = 1{,}1 \cdot 10^{-6}$ m^2/s oraz temperaturę pierwotną skał [4] równą t_{pg} = 24^{0}C. Gęstość azotu przyjęto ρ_{N2} = 1,25 kg/m^3, a właściwą pojemność cieplną c_{pN2} = 1043 J/(kg·K) [7]. Zgodnie z założeniami metody różnic skończonych przedziały przestrzenne i czasowe dobrano tak, aby spełniona była nierówność $h^2/l > 2a_q$ [2], gdzie h – oznacza długość przedziału przestrzennego w metrach, zaś l – długość przedziału czasowego w sekundach. Obliczenia wykonano dla ośmiu czasów podawania schłodzonego azotu: τ_1 = 1 dzień, τ_2 = 5 dni, τ_3 = 10 dni, τ_4 = 20 dni, τ_5 = 50 dni, τ_6 = 100 dni, τ_7 = 150 dni oraz τ_8 = 200 dni. Dla porównania, czego należałoby oczekiwać, gdyby nie zastosowano chłodzenia azotem, wykonano również obliczenia dla przypadku naturalnego stygnięcia górotworu.

3. Uzyskane wyniki

Wyniki modelowania numerycznego przedstawiono w tablicach 1 - 7 oraz na rysunkach 1 - 4. Tablica 1 dotyczy pola temperatury masywu skalnego tuż po ukończeniu pracy georeaktora, a tablice 2 - 7 dotyczą stanów wychłodzenia tego masywu dla wariantów z podawaniem schłodzonego azotu oraz naturalnego stygnięcia (bez podawania azotu).

Gorące produkty spalania w georeaktorze, o temperaturze około 1000°C na początku przewodu, przekazują ciepło do masywu skalnego, dzięki czemu ich temperatura na końcu przewodu spada do około 500°C (tablica 1). Temperatura ścian przewodu jest niewiele niższa od temperatury spalin. W odległości około 2 m od ścian przewodu temperatura skał jest dużo wyższa od 100°C. Temperatura ta spada nie tylko ze wzrostem odległości od przewodu, ale również (chociaż w mniejszym stopniu) wzdłuż przewodu.

W przypadku podania do przewodu, azotu schłodzonego do temperatury -10°C, temperatura skał szybko obniża się. Już po upływie 1 doby podawania azotu temperatura ścian przewodu spada do około 200°C (tablica 2). Jednak temperatura skał aż do około 2 m jest wyższa od temperatury ścian. W odległości 1m od przewodu jest ona wyższa od 400°C. Po pięciu dniach w odległości 1 m od przewodu temperatura skał wynosi już tylko 300°C. Sytuację tę przedstawiono na rysunku 1. Dotyczy on okolic początku przewodu. Linia koloru czerwonego dotyczy temperatury skał tuż po zakończeniu pracy georeaktora. Ciągła linia koloru zielonego dotyczy temperatury masywu po upływie 1 doby od rozpoczęcia podawania schłodzonego azotu, a koloru niebieskiego po upływie 5 dni. Linie przerywane dotyczą temperatury skał w przypadku naturalnego stygnięcia (bez podawania schłodzonego azotu). Temperatura ścian przewodu silnie zależy od tego czy podaje się schłodzony azot, czy też nie. W odległości 1 m od przewodu wyraźnej różnicy nie widać, jeśli czas podawania zimnego azotu wynosi 1 dzień. Ale już po pięciu dniach wspomniana różnica wynosi powyżej 100°C. W miarę oddalania się od przewodu różnice temperatury skał (dla wariantu z użyciem chłodnego azotu i bez użycia) maleją.

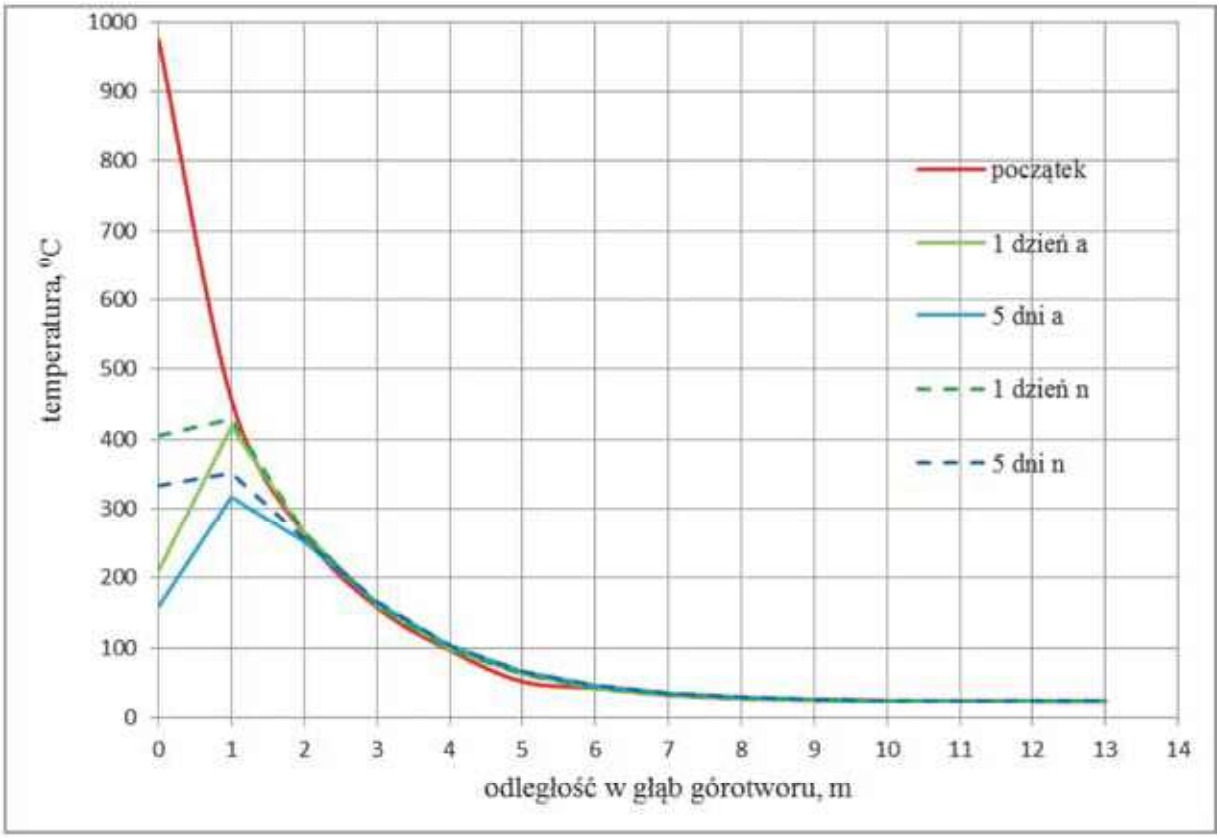
Po upływie 10 dni obserwuje się dalsze obniżenie temperatury masywu skalnego, przy czym obszar wyższej temperatury przesuwa się w głąb górotworu (tablica 3). Po upływie jednego dnia temperatura skał w odległości 5 m od przewodu (na jego początku) była równa 62,8^{0}C, a po dziesięciu dniach temperatura ta wzrosła do 71,4^{0}C. Po upływie 20 dni temperatura skał dalej się obniża, ale jeszcze na znacznym obszarze jest wyższa od 100^{0}C. Po upływie 50 dni wspomniana temperatura już tylko w kilku miejscach jest wyższa od 100^{0}C (rys. 2). Obserwuje się dalsze przesunięcie obszaru podwyższonej temperatury skał na odległość 5÷11 m od przewodu w głąb górotworu.

Tablica 2. Modelowanie temperatury masywu skalnego wokół przewodu, którym płynęły gorące produkty spalania w georeaktorze po upływie 1 dnia od zakończenia pracy georeaktora – do przewodu doprowadzany jest azot o temperaturze -10^{0}C w ilości 1200 m^3/h

Table 2. Modeling of the temperature of the rock mass surrounding the pipe through which hot products of combustion were flowing in the georeactor, 1 day after termination of its operation – the pipe was fed with nitrogen gas at -10°C and a flow rate of 1200 m3/h

x, m	t_{N2}	0	1	2	3	4	5	6	8	10	12	14
0	-10,0	210,3	418,0	265,0	159,7	98,3	62,8	43,2	27,9	24,6	24,1	24,0
5	26,0	213,1	389,3	246,9	149,5	92,7	59,9	41,8	27,6	24,6	24,1	24,0
10	56,6	214,4	363,0	230,4	140,2	87,6	57,3	40,5	27,4	24,5	24,1	24,0
15	82,4	214,3	338,7	215,1	131,6	82,9	54,8	39,2	27,1	24,5	24,1	24,0
20	104,0	213,0	315,8	200,8	123,5	78,5	52,4	38,1	26,9	24,4	24,0	24,0
25	121,8	210,9	294,8	187,7	116,1	74,4	50,4	37,0	26,6	24,4	24,0	24,0
30	136.4	207,7	274,9	175,4	109,3	70,7	48,4	36,1	26,4	24,4	24,0	24,0
35	148,1	204,0	256,6	164,0	102,9	67,2	46,6	35,2	26,2	24,3	24,0	24,0
40	157,2	199,7	239,8	153,6	97,0	63,9	44,8	34,3	26,1	24,3	24,0	24,0
46	165,5	194,1	221,1	142,1	90,4	60,4	43,0	33,4	25,9	24,3	24,0	24,0

x – odległość od ścianki przewodu w głąb górotworu oraz wzdłuż przewodu, m



Rys.1. Zmiany temperatury masywu skalnego ogrzanego przez gorące produkty spalania w georeaktorze podziemnego zgazowania węgla po pięciu dniach od zakończenia jego pracy

Fig. 1. Temperature variations in rock mass heated up by hot products of combustion in the georeactor for underground coal gasification, 5 days after termination of its operation

Pomimo znacznego wychłodzenia masywu skalnego widać wyraźne różnice temperatury skał w zależności od tego czy jest podawany schłodzony azot czy nie. W miarę wzrostu odległości od osi przewodu różnice te zanikają. Wydłuża się też strefa podwyższonej (tzn. wyższej od temperatury pierwotnej skał) temperatury masywu skalnego otaczającego przewód, którym płynęły produkty spalania. W momencie rozpoczęcia podawania schłodzonego azotu strefa ta sięgała 13 m (tablica1), po 10 dniach strefa ta dochodziła do 14 m (tablica 2), po 50 dniach – 17 m, a po 100 dniach 20 m (tablica 4).

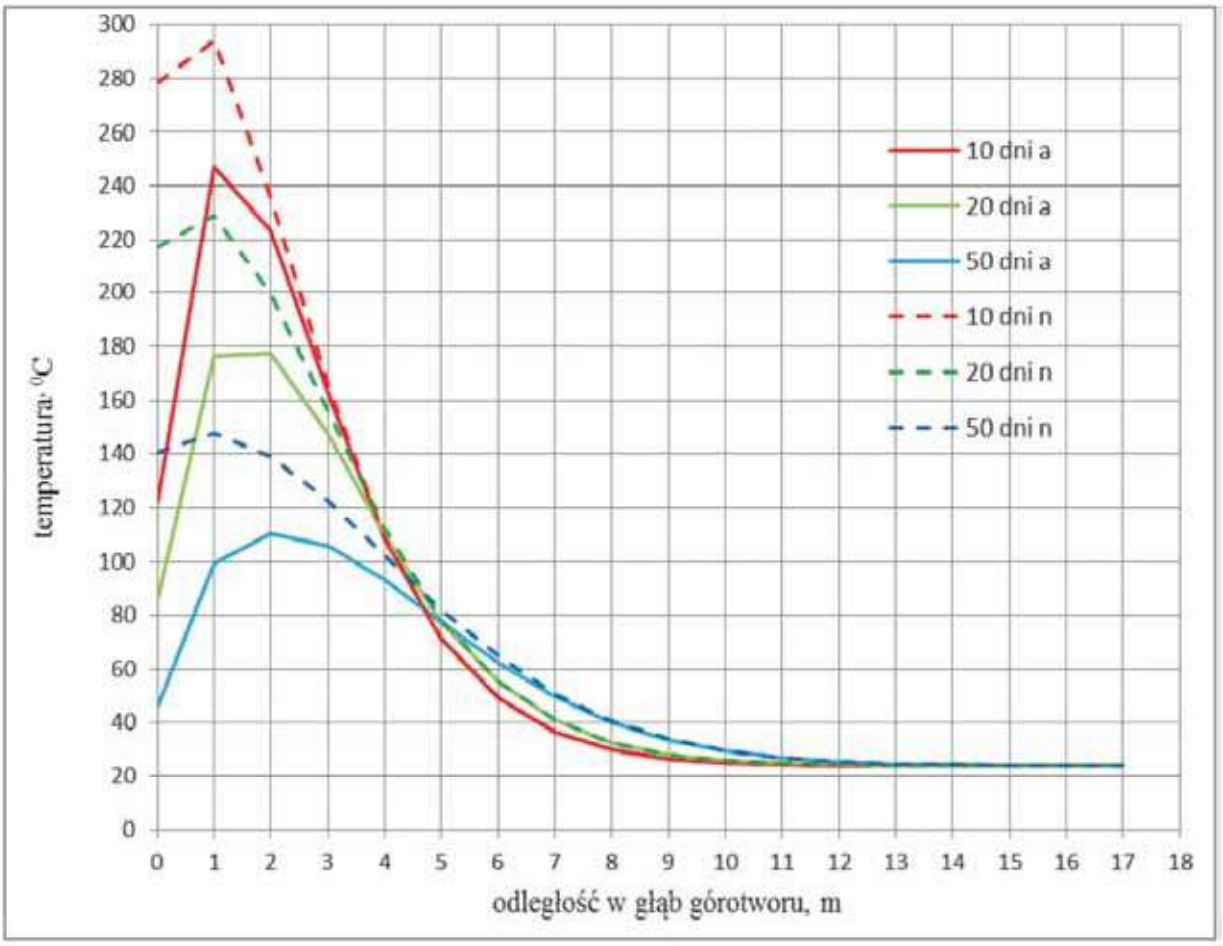
Wyniki obliczeń zawarte w tablicy 4 wskazują na to, że górotwór w znacznej mierze został wychłodzony. Temperatura skał jest dużo niższa od 100^{0}C. W wielu jednak miejscach temperatura ta jest jeszcze wyższa (i to znacznie) od 60^{0}C. Z doświadczeń Zakładu Aerologii Górniczej GIG wynika, że jeśli temperatura węgla jest wysoka, następuje silne samozagrzewanie węgla, które prowadzi do pożaru endogenicznego. Temperatura samozapłonu zależy od rodzaju węgla. Dla niektórych węgli samozapalenie następuje już przy temperaturze 70°C. Z tablicy 4 wynika, że w odległości 3 m od przewodu

Tablica 3. Modelowanie temperatury masywu skalnego wokół przewodu, którym płynęły gorące produkty spalania w georeaktorze po upływie 10 dni od zakończenia pracy georeaktora – do przewodu doprowadzany jest azot o temperaturze -10^{0}C w ilości 1200 m^3/h

Table 3. Modeling of the temperature of the rock mass surrounding the pipe through which hot products of combustion were flowing in the georeactor, 10 days after termination of its operation – the pipe was fed with nitrogen gas at -10°C and a flow rate of 1200 m^3/h

x, m	t_{N2}	0	1	2	3	4	5	6	8	10	12	14
0	-10,0	122,3	246,9	223,3	162,5	108,3	71,4	49,2	30,0	25,2	24,2	24,0
5	11,6	125,6	233,0	209,1	152,3	102,0	67,9	47,3	29,6	25,1	24,2	24,0
10	30,2	128,0	220,1	196,0	142,9	96,3	64,6	45,6	29,2	25,0	24,2	24,0
15	46,2	129,5	208,0	183,9	134,2	90,9	61,6	44,0	28,8	24,9	24,2	24,0
20	59,8	130,1	196,4	172,5	126,1	85,9	58,8	42,5	28,4	24,8	24,1	24,0
25	71,3	130,2	185,7	162,0	118,6	81,3	56,2	41,1	28,1	24,8	24,1	24,0
30	80,9	129,6	175,4	152,1	111,6	77,1	53,8	39,8	27,8	24,7	24,1	24,0
35	88,9	128,5	165,9	142,9	105,1	73,1	51,6	38,6	27,5	24,7	24,1	24,0
40	95,4	127,1	157,0	134,5	99,2	69,4	49,5	37,5	27,2	24,6	24,1	24,0
46	101,6	124,9	146,9	125,1	92,5	65,4	47,2	36,3	26,9	24,6	24,1	24,0

x – odległość od ścianki przewodu w głąb górotworu oraz wzdłuż przewodu, m



Rys. 2. Zmiany temperatury masywu skalnego ogrzanego przez gorące produkty spalania w georeaktorze podziemnego zgazowania węgla po upływie 10÷50 dni od zakończenia jego pracy

Fig. 2. Temperature variations in rock mass heated up by hot products of combustion in the georeactor for underground coal gasification, 10÷50 days after termination of its operation

można się takiej temperatury spodziewać. Nie można również wykluczyć samozapalenia przy temperaturze nieco niższej od 70^{0}C. Wydaje się, że bezpieczniejszą byłaby granica 60^{0}C. Z analizy rysunku 3 wynika, że, wydłużając czas podawania schłodzonego azotu do 150 dni można uzyskać temperaturę skał dużo niższą od 60^{0}C.

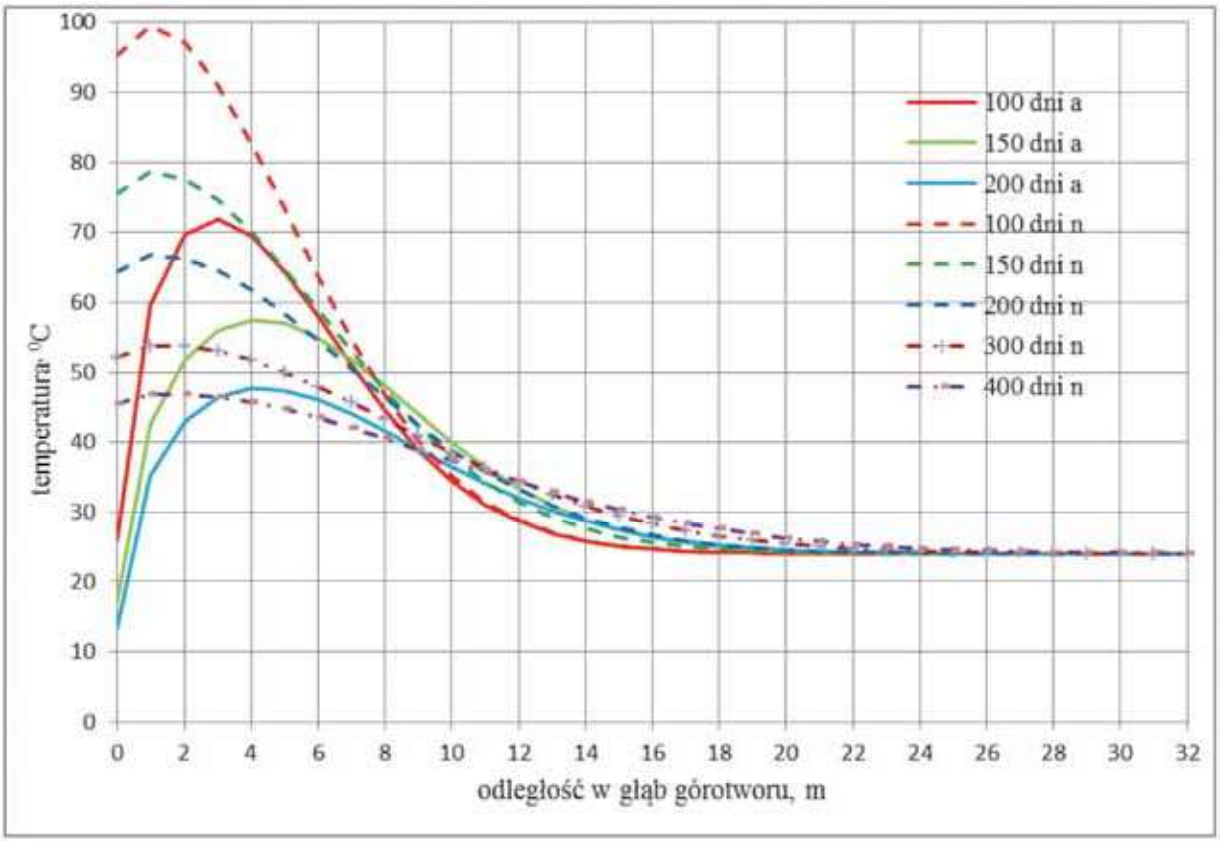
Na rysunku 3 oraz w tablicach 4÷7 przedstawiono wyniki modelowania numerycznego dla czasów stygnięcia górotworu od 100 do 400 dni. W wariantach dotyczących podawania schłodzonego azotu temperatura skał uległa znacznemu obniżeniu. Gdy czas podawania schłodzonego azotu wydłuży się do 200 dni, wówczas temperatura skał w żadnym miejscu

Tablica 4. Modelowanie temperatury masywu skalnego wokół przewodu, którym płynęły gorące produkty spalania w georeaktorze po upływie 100 dni od zakończenia pracy georeaktora – do przewodu doprowadzany jest azot o temperaturze -10^{0}C w ilości 1200 m^3/h

Table 4. Modeling of the temperature of the rock mass surrounding the pipe through which hot products of combustion were flowing in the georeactor, 100 days after termination of its operation – the pipe was fed with nitrogen gas at -100°C and a flow rate of 1200 m^3/h

x, m	t_{N2}	0	1	2	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20
0	-10,0	25,9	59,7	69,7	71,9	69,5	57,9	44,6	34,5	28,6	25,7	24,6	24,2	24,0
5	-4,1	27,9	58,1	67,0	68,7	66,3	55,4	43,1	33,7	28,2	25,6	24,5	24,2	24,0
10	1,1	29,7	56,6	64,4	65,8	63,5	53,2	41,7	33,0	27,9	25,5	24,5	24,1	24,0
15	5,8	31,2	55,1	62,0	63,1	60,8	51,1	40,4	32,4	27,6	25,4	24,4	24,1	24,0
20	10,0	32,5	53,7	59,7	60,5	58,2	49,2	39,2	31,7	27,4	25,3	24,4	24,1	24,0
25	13,7	33,6	52,3	57,6	58,1	55,9	47,4	38,1	31,2	27,1	25,2	24,4	24,1	24,0
30	17,0	34,5	51,0	55,5	55,9	53,7	45,7	37,1	30,6	26,9	25,1	24,4	24,1	24,0
35	19,9	35,3	49,8	53,6	53,8	51,7	44,1	36,1	30,1	26,7	25,0	24,3	24,1	24,0
40	22,4	35,9	48,6	51,9	51,8	49,8	42,7	35,2	29,7	26,5	24,9	24,3	24,1	24,0
46	25,0	36,4	47,1	49,8	49,6	47,7	41,1	34,3	29,2	26,3	24,8	24,3	24,1	24,0

x – odległość od ścianki przewodu w głąb górotworu oraz wzdłuż przewodu, m



Rys. 3. Zmiany temperatury masywu skalnego ogrzanego przez gorące produkty spalania w georeaktorze podziemnego zgazowania węgla po upływie 100÷400 dni od zakończenia jego pracy

Fig. 3. Temperature variations in rock mass heated up by hot products of combustion in the georeactor for underground coal gasification, 100÷400 days after termination of its operation

nie osiągnie wartości nawet 50°C, a w wielu miejscach będzie dużo niższa od 40°C (tablica 5).

Inaczej przedstawia się sytuacja, kiedy nie będzie podawany schłodzony azot. W przypadku naturalnego stygnięcia masywu skalnego na podobne efekty trzeba dłużej czekać. Po upływie około 100 dni temperatura skał w wielu miejscach dochodzi do 100°C, po upływie 150 dni, temperatura ta jest już dużo niższa, ale w dalszym ciągu bardzo wysoka i dochodzi do 80°C. Po upływie 200 dni jest jeszcze wyższa od 60°C (tablica 6), po upływie 250 dni niższa od 60°C, po upływie 300 dni wyższa od 50°C, a po upływie 400 dni uzyskuje się wyniki zbliżone do tych, jakie można uzyskać podając przez 200 dni schłodzony azot (tablica 7).

Analiza wyników podanych w tablicach od 4 do 7 oraz na rysunku 3 wskazuje na duże różnice temperatury uzyskanej z zastosowaniem schłodzonego azotu i temperatury wynikającej z naturalnego wychładzania górotworu, przy czym różnice te maleją z czasem. Dalszemu przesunięciu ulega strefa podwyższonej temperatury skał. Dla krótszych czasów było to od 5 do 10 m (rys. 2), a dla dłuższych czasów strefa ta znajduje się

Tablica 5. Modelowanie temperatury masywu skalnego wokół przewodu, którym płynęły gorące produkty spalania w georeaktorze po upływie 200 dni od zakończenia pracy georeaktora – do przewodu doprowadzany jest azot o temperaturze -10°C w ilości 1200 m³/h

Table 5. Modeling of the temperature of the rock mass surrounding the pipe through which hot products of combustion were flowing in the georeactor, 200 days after termination of its operation – the pipe was fed with nitrogen gas at -100°C and a flow rate of 1200 m³/h

x, m	tN2	0	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	25
0	-10,0	13,3	35,3	43,0	47,7	46,1	41,6	36,5	31,9	28,6	26,4	25,2	24,5	24,2	24,0
5	-6,2	14,5	34,0	40,9	45,1	43,7	39,8	35,2	31,2	28,2	26,2	25,1	24,5	24,2	24,0
10	-2,8	16,5	34,7	41,0	44,8	43,2	39,3	34,8	30,9	27,9	26,1	25,0	24,4	24,2	24,0
15	0,4	17,9	34,4	40,1	43,5	41,9	38,2	34,0	30,3	27,6	25,9	24,9	24,4	24,2	24,0
20	3,3	19,2	34,1	39,3	42,2	40,7	37,2	33,3	29,9	27,4	25,8	24,8	24,4	24,1	24,0
25	5,9	20,3	33,8	38,5	41,1	39,6	36,3	32,6	29,5	27,1	25,6	24,8	24,3	24,1	24,0
30	8,3	21,3	33,5	37,7	40,0	38,6	35,5	32,0	29,1	26,9	25,5	24,7	24,3	24,1	24,0
35	10,4	22,1	33,2	37,0	39,0	37,6	34,7	31,5	28,7	26,7	25,4	24,7	24,3	24,1	24,0
40	12,3	22,9	32,9	36,3	38,1	36,7	33,9	30,9	28,4	26,5	25,3	24,6	24,3	24,1	24,0
46	14,4	23,8	32,6	35,6	37,0	35,7	33,1	30,3	28,0	26,3	25,2	24,6	24,2	24,1	24,0

x – odległość od ścianki przewodu w głąb górotworu oraz wzdłuż przewodu, m

Tablica 6. Naturalne stygnięcie masywu skalnego wokół przewodu, którym płynęły gorące produkty spalania w georeaktorze po upływie 200 dni od zakończenia pracy georeaktora

Table 6. Natural cooling of the rock mass surrounding the pipe through which hot products of combustion were flowing in the georeactor, 200 days after termination of its operation

x, m	0	1	2	4	6	8	9	10	12	14	16	18	20	22	25
0	64,3	66,7	66,3	61,8	54,5	46,4	42,5	39,0	33,2	29,1	26,6	25,2	24,5	24,2	24,0
5	62,3	64,2	63,7	59,3	52,4	44,8	41,2	37,9	32,5	28,7	26,4	25,1	24,5	24,2	24,0
10	60,1	61,5	60,9	56,1	50,3	43,3	39,9	36,9	31,8	28,4	26,2	25,0	24,5	24,2	24,0
15	58,1	59,1	58,4	54,5	48,4	41,9	38,8	35,9	31,3	28,1	26,1	25,0	24,4	24,2	24,0
20	56,1	56,8	56,1	52,3	46,7	40,6	37,7	35,1	30,7	27,7	25,9	24,9	24,4	24,1	24,0
25	54,1	54,6	53,9	50,3	45,1	39,4	36,7	34,3	30,2	27,5	25,8	24,8	24,3	24,1	24,0
30	52,3	52,6	51,8	48,4	43,5	38,3	35,8	33,5	29,8	27,2	25,7	24,8	24,3	24,1	24,0
35	50,5	50,6	49,8	46,7	42,1	37,2	34,9	32,8	29,4	27,0	25,5	24,7	24,3	24,1	24,0
40	48,8	48,8	48,0	45,1	40,8	36,2	34,1	32,1	28,9	26,7	25,4	24,7	24,3	24,1	24,0
46	46,8	46,7	46,0	43,2	39,3	35,2	33,2	31,4	28,5	26,5	25,3	24,6	24,3	24,1	24,0

x – odległość od ścianki przewodu w głąb górotworu oraz wzdłuż przewodu, m

Tablica 7. Naturalne stygnięcie masywu skalnego wokół przewodu, którym płynęły gorące produkty spalania w georeaktorze po upływie 400 dni od zakończenia pracy georeaktora

Table 7. Natural cooling of the rock mass surrounding the pipe through which hot products of combustion were flowing in the georeactor, 400 days after termination of its operation

x, m	0	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	26	30	32
0	45,5	46,8	46,9	45,8	43,5	40,6	37,4	34,3	31,5	29,3	27,5	26,2	25,3	24,4	24,1	24,0
5	44,5	45,5	45,5	44,4	42,2	39,5	36,5	33,6	31,0	28,9	27,2	26,0	25,2	24,4	24,1	24,0
10	43,4	44,1	44,1	43,0	40,9	38,4	35,6	32,9	30,5	28,5	27,0	25,9	25,1	24,4	24,1	24,0
15	41,7	42,2	42,1	41,0	39,1	36,7	34,1	31,7	29,6	27,9	26,6	25,7	25,0	24,3	24,1	24,0
20	41,3	41,7	41,6	40,5	38,7	36,4	34,0	31,7	29,6	27,9	26,6	25,6	25,0	24,3	24,1	24,0
25	40,3	40,5	40,4	39,4	37,7	35,5	33,3	31,1	29,2	27,6	26,4	25,5	24,9	24,3	24,1	24,0
30	39,4	39,6	39,4	38,4	36,8	34,8	32,7	30,7	28,9	27,4	26,2	25,4	24,8	24,3	24,1	24,0
35	38,4	38,5	38,3	37,3	35,8	34,0	32,0	30,1	28,5	27,1	26,1	25,3	24,8	24,2	24,1	24,0
40	37,5	37,5	37,3	36,4	34,9	33,2	31,4	29,7	28,1	26,9	25,9	25,2	24,7	24,2	24,1	24,0
46	36,5	36,4	36,2	35,3	34,0	32,5	30,8	29,2	27,8	26,6	25,7	25,1	24,7	24,2	24,0	24,0

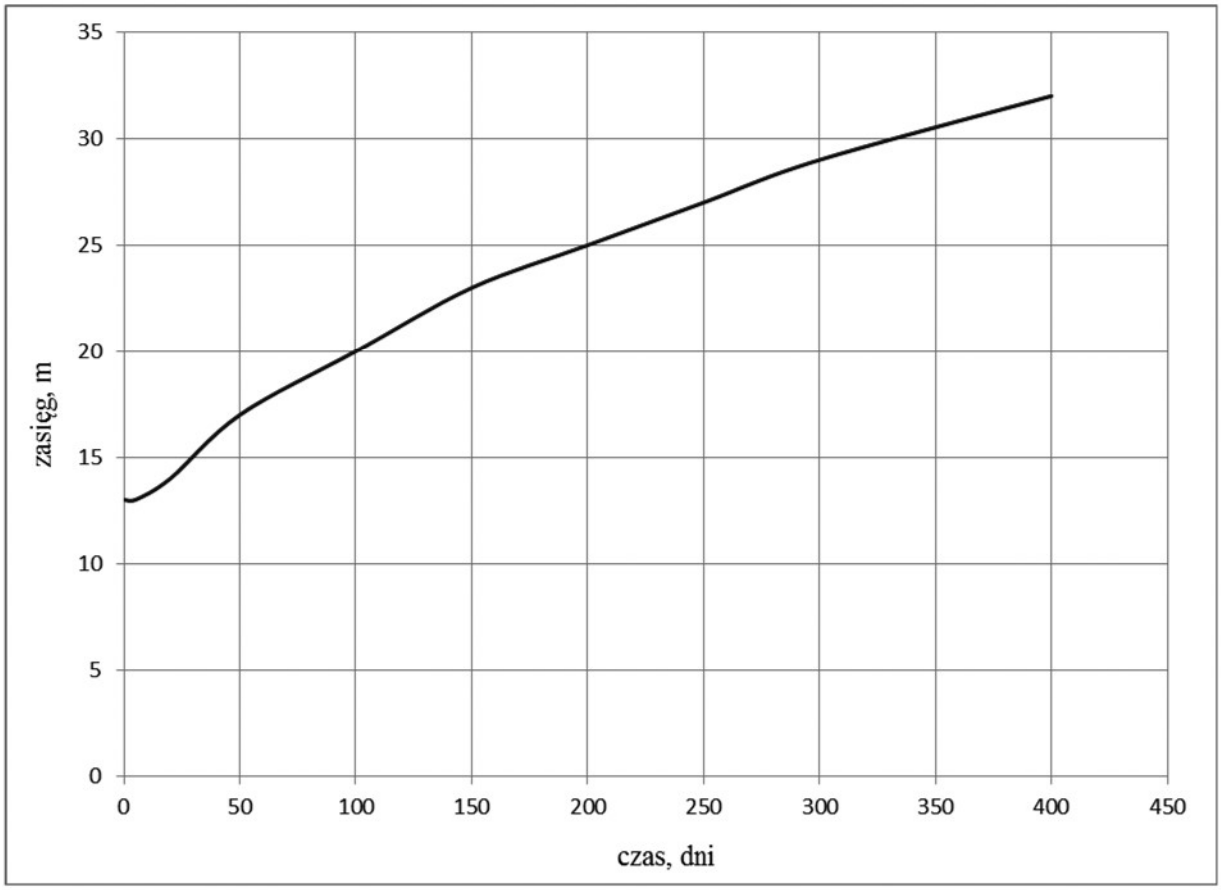
x – odległość od ścianki przewodu w głąb górotworu oraz wzdłuż przewodu, m

od 8 do około 20 m od przewodu (rys. 3). Np. w odległości 12 m od przewodu temperatura skał po upływie 100 dni od rozpoczęcia podawania schłodzonego azotu była równa 28,6^{0}C, po upływie 150 dni – 33,5^{0}C, a po upływie 200 dni – 31,9^{0}C. Z rysunku 3 wynika również, że termiczne efekty działania georeaktora sięgają na odległość 32 m od przewodu, którym płynęły gorące produkty spalania. Na rysunku 4 przedstawiono wpływ czasu na zasięg zmian temperatury masywu skalnego otaczającego przewód, którym płynęły gorące produkty zgazowania w wyniku działania georeaktora podziemnego zgazowania węgla. Dla warunków panujących na Kopalni „Wieczorek" strefa podwyższonej temperatury skał sięgała 32 m od osi przewodu. Przy długości przewodu równej 46 m jest to obszar o objętości około 150 000 m^3.

4. Podsumowanie

Badano wpływ podawania zimnego azotu do przewodu, którym płynęły gorące produkty zgazowania węgla, na proces wychładzania otaczającego masywu skalnego. Stopień tego wychłodzenia zależy oczywiście od temperatury schłodzonego azotu i natężenia jego przepływu. W artykule odniesiono się do wartości jakie udało się uzyskać podczas prób na dole kopalni. Azot udało się schłodzić do temperatury -10^{0}C i zapewnić intensywność jego przepływu równą 1200 m^3/h ≈ 0,3333 m^3/s. Nawet krótki czas podawania azotu daje efekty w postaci wyraźnego ochłodzenia skał. Już po 10 dniach podawania schłodzonego azotu temperatura skał w odległości 1 m od ścian przewodu spadła o ponad 200^{0}C (tablica 3). Po 100 dniach podawania azotu temperatura ta spadła poniżej 60^{0}C (tablica 4). Po 150 dniach podawania schłodzonego azotu w żadnym badanym miejscu nie stwierdzono temperatury wyższej od 60^{0}C (rys.3). Im dłuższy czas podawania azotu, tym większe wychłodzenie. Po około 200 dniach temperatura otaczającego masywu jest niższa od 50^{0}C. Stwierdzono również przesuwanie się strefy podwyższonej temperatury (tzn. od temperatury pierwotnej skał) w miarę upływu czasu w głąb górotworu i to niezależnie od tego czy jest podawany schłodzony azot, czy też nie. Dla krótkich czasów (po zakończeniu pracy georeaktora) rzędu 10 do 50 dni, strefa ta sięga od 5 do 11 m (rys. 2). Dla czasów dłuższych, rzędu 100 do 200 dni wspomniana strefa sięga od około 8 do ponad 20 m (rys. 3). W miarę upływu czasu rozszerza się również strefa wzrostu temperatury skał (rys. 4). Znaczy to, że niezależnie od stosowania technicznych środków schładzania górotworu, przejmuje on część ciepła pochodzącego z procesu podziemnego zgazowania węgla.

Rozważania prowadzono w odniesieniu do poziomu płytkiego, na którym temperatura pierwotna skał jest niska (t_{pg} = 24^0). Obecnie w polskim górnictwie węgla kamiennego mamy 9 ruchów górniczych, w których temperatura ta sięga 40^{0}C, a nawet znacznie ją przekracza. Dlatego analogiczne rozważania należałoby przeprowadzić w odniesieniu do oddziałów gorących.



Rys. 4. Wpływ czasu na zasięg zmian temperatury skał pod wpływem działania georeaktora podziemnego zgazowania węgla

Fig. 4. The influence of time on the range of rock mass temperature variations generated by operation of the georeactor for underground coal gasification

Przeprowadzone rozważania wykazały, że zastosowanie schłodzonego azotu do obniżenia temperatury masywu skalnego daje dobre efekty i może być stosowane w prewencji zagrożenia pożarowego.

Praca została wykonana w ramach zadania badawczego pt. „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej" finansowanego przez NCBR w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych pt.: „Zawansowane technologie pozyskiwania energii nr 23.23.660.8902/R34".

Literatura

1. *Chmura K.*: Własności fizyko-termiczne skał niektórych polskich zagłębi górniczych, Śląsk, Katowice 1970.
2. *Holek S.*: Metoda prognozowania temperatury i wilgotności powietrza w wyrobiskach górniczych z uwzględnieniem przestrzennej i czasowej zmienności czynników, Materiały konferencyjne z I Posiedzenia Grupy Roboczej nr 1 Międzynarodowego Biura Górniczej Fizyki Cieplnej, Katowice 9-13 czerwca 1980 r., Główny Instytut Górnictwa, Katowice 1981, str.485-502.
3. *Kempf E.*: Zur Berechnung der Wettertemperatur in sonderbewetterten Grubenbauen, Freiberger÷Forschungshefte, A460, 1969.
4. *Knechtel J., Gapiński G.*: Zaktualizowane mapy izolinii temperatury pierwotnej skał kopalń Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW), Główny Instytut Górnictwa, Katowice 2005.
5. *Knechtel J., Krause E., Świądrowski J.*: Ocena zagrożenia temperaturowego w wyrobiskach, w których zabudowany będzie rurociąg transportujący produkty wytworzone w georeaktorze podziemnego zgazowania węgla, monografia GIG pod red. J. Kabiesza: Zagrożenia i technologie, Katowice 2012, str. 151-165
6. *Nikitienko N. I.*: Issledowanije niestacionarnych processow tiepło-massoobmiena mietodom sietok, Naukowa Dumka, Kijów 1971.
7. *Ochęduszko S.*: Termodynamika stosowana, WNT, Warszawa 1974.