

*zagrożenia aerologiczne, szczelność tam,
zmiany ciśnienia barometrycznego w zrobach*

Andrzej STRUMIŃSKI*, Barbara MADEJA-STRUMIŃSKA**

ZROBY POEKSPLOATACYJNE JAKO ŹRÓDŁO ZAGROŻENIA GAZOWO-TERMICZNEGO W KOPALNIACH PODZIEMNYCH

W artykule przedstawiono koncepcję oceny zmian czasowych ciśnienia barycznego w przestrzeni otamowanych zrobów lub pól pożarowych przy zniżkach lub zwyżkach barometrycznych. Przedstawiona metoda umożliwia wyznaczanie współczynników wyrównywania ciśnień, ocenę szczelności izolacji zamkniętych przestrzeni oraz analizę zagrożeń związanych z wymianę atmosfery zrobowej lub pól pożarowych z czynnymi wyrobiskami górnictwami. Problematykę artykułu zilustrowano 5-ciomą uogólnionymi przykładami zaczerpniętymi z praktyki górnictwa kopalń węgla kamiennego i rud miedzi.

1. WSTĘP

Zmiany ciśnienia barometrycznego powietrza w kopalniach podziemnych mogą leżeć u podstaw wielu zagrożeń aerologicznych. W szczególności zmiany te powodują tzw. oddychanie zrobów (Budryk, 1951, Kajdasz i in., 2002, Strumiński & Madeja-Strumińska, 2004) przejawiające się wypływem gazów zrobowych do czynnych wyrobisk górnictw w czasie gwałtownych zniżek barometrycznych oraz dopływem powietrza do zrobów w okresach zwyżek barycznych.

W wielu przypadkach gazy zrobowe mają właściwości duszące, toksyczne, wybuchowe oraz wysoką temperaturę. Wypływ tych gazów do czynnych wyrobisk, zawsze wiąże się dużym zagrożeniem dla załóg górnictw. Znane są z praktyki górnictwa liczne śmiertelne wypadki pracowników przebywających w sąsiedztwie zrobów, z których wypływające gazy były praktycznie pozbawione tlenu. W pokładach metanowych w czasie zniżek barometrycznych często dochodzi do znacznych wypływów metanu ze zrobów do wyrobisk, w których prowadzone są roboty górnictwa. Niekiedy powoduje to duże utrudnienie normalnego procesu technologicznego, a nawet może być przyczyną katastrofy górnictwa wywołanej

* KGHM CUPRUM, sp. z o.o. Centrum Badawczo-Rozwojowe we Wrocławiu, Wrocław, pl. 1 Maja 1/3

** Instytut Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, pl. Teatralny 2, 50-051 Wrocław

e-mail: barbara.madeja-struminska@pwr.wroc.pl

wybuchem metanu. Groźne dla załóg górniczych są także wypływy gazów pożarowych z otamowanych pól pożarowych, jeśli zawierają one znaczne stężenia gazów toksycznych, a zwłaszcza tlenu węgla. Ponadto jeśli gazy zrobowe mają podwyższoną temperaturę, to dołączając się do prądów powietrznych płynących do robót eksploatacyjnych mogą wyraźnie pogorszyć warunki klimatyczne w miejscach pracy.

Przy wyższej barycznej powietrze przepływające czynnymi wyrobiskami górniczymi przenika do zrobów lub odizolowanych pól pożarowych, co może być przyczyną utworzenia się w zrobach wybuchowej mieszanki metanu i powietrza, powstania pożaru endogenicznego w zrobach, bądź też wzmożenia aktywności pożaru w otamowanej przestrzeni.

Natężenie występowania wymienionych zagrożeń można m.in. wiązać z różnicą ciśnień między izolowanymi przestrzeniami, a wyrobiskami czynnymi oraz szczelnością izolacji tych przestrzeni. Jest przy tym oczywiste, że im większa jest różnica tych ciśnień i im szczelność izolacji określonej przestrzeni kopalni jest mniejsza, tym intensywność tego przepływu jest większa.

W związku z tym opracowane są różne koncepcje eliminowania wpływu zmian ciśnienia barometrycznego na dopływ lub wypływ powietrza z izolowanych przestrzeni w kopalniach podziemnych (Budryk, 1951, Kajdasz i in., 2002, Szlązak J., 1984).

W niniejszym artykule przedstawiamy próbę oceny ilościowej tego procesu, przy czym zakładamy, że zrob poeksploatacyjny lub pola pożarowe są mniej lub bardziej szczelnie odizolowane od czynnych wyrobisk górniczych.

2. PRZYBLIŻONA OCENA ZMIAN CZASOWYCH CIŚNIENIA BAROMETRYCZNEGO W PRZESTRZENI ZROBÓW LUB PÓL POŻAROWYCH

Długotrwałe badania zmian ciśnienia barometrycznego na powierzchni kopalń wykazały (Wasilewski, 2003, 2004), że w okresach letnich ich przebieg jest na ogół spokojny, a gwałtowne zmiany są rejestrowane rzadko. Szybkie zmiany ciśnienia o dużych amplitudach obserwuje się zwykle w czasie późnej jesieni (listopad, grudzień) oraz w zimie. Zmiany ciśnienia w tych okresach mogą przekraczać nawet 50 hPa w ciągu tygodnia, a przenosząc się do podziemnych wyrobisk górniczych mogą wywierać bardzo duży wpływ na zagrożenie w kopalni związane z wypływem gazów zrobowych z otamowanych przestrzeni. Taka bowiem zmiana ciśnienia barometrycznego jest równoważna oddziaływaniu na dole kopalni dużego wentylatora ssącego o spiętrzeniu 5000 Pa.

W pracy (Wasilewski, 2004) podaje się m.in., że w ciągu 30 godzin zarejestrowano zniżkę baryczną wynoszącą około 30 hPa, przy czym dynamika zmian ciśnienia wynosiła 4 hPa/godz.

Przy tak gwałtownych zniżkach barycznych znaczny wpływ metanu lub gazów pożarowych z otamowanych przestrzeni kopalń do wyrobisk, w których przebywa załoga może wiązać się nawet z poważną katastrofą górniczą.

Intensywność wypływu gazów zrobowych do czynnych wyrobisk jest tym większa im krótszy jest okres wyrównywania się ciśnień wewnątrz przestrzeni zamkniętej z ciśnieniem na zewnątrz tej przestrzeni w warunkach określonej zniżki barycznej. Jeśli przy danej zniżce barometrycznej okres wyrównywania się wymienionych ciśnień jest odpowiednio długi, to może to świadczyć o dużej szczelności izolacji zamkniętej przestrzeni kopalni.

Biorąc to pod uwagę dla oceny szczelności izolacji zrobów lub pól pożarowych można brać pod uwagę dynamikę zmian ciśnienia w otamowanej przestrzeni, tj. czas wyrównywania się ciśnień między tą przestrzenią a czynnymi wyrobiskami górniczymi.

W celu wyznaczenia odpowiednich zależności analitycznych, niżej rozważa się pole pożarowe A obejmujące ślepy chodnik (rys. 1), który jest zamknięty jedną tamą pożarową T1.

Zakładamy, że w chwili rozpoczynania badań, tj. dla $\tau = 0$, ciśnienia barometryczne w polu pożarowym i w chodniku przed tamą pożarową są równe i wynoszą p_0 (Pa). Od tego momentu ciśnienie na zrębie szybu zaczyna spadać, przy czym zmiany te przenoszą się z prędkością dźwięku przed tamą pożarową T1 od strony chodnika z prądem opływowym. W miarę upływu czasu maleje również ciśnienie w polu pożarowym.

Dla elementarnego przedziału czasu $d\tau$ w polu pożarowym następuje spadek ciśnienia dp . Tak więc prędkość zmian tego ciśnienia (rys. 2) może być wyrażona równaniem różniczkowym

$$\frac{dp}{d\tau} = R(p - p_s) \quad (1)$$

gdzie:

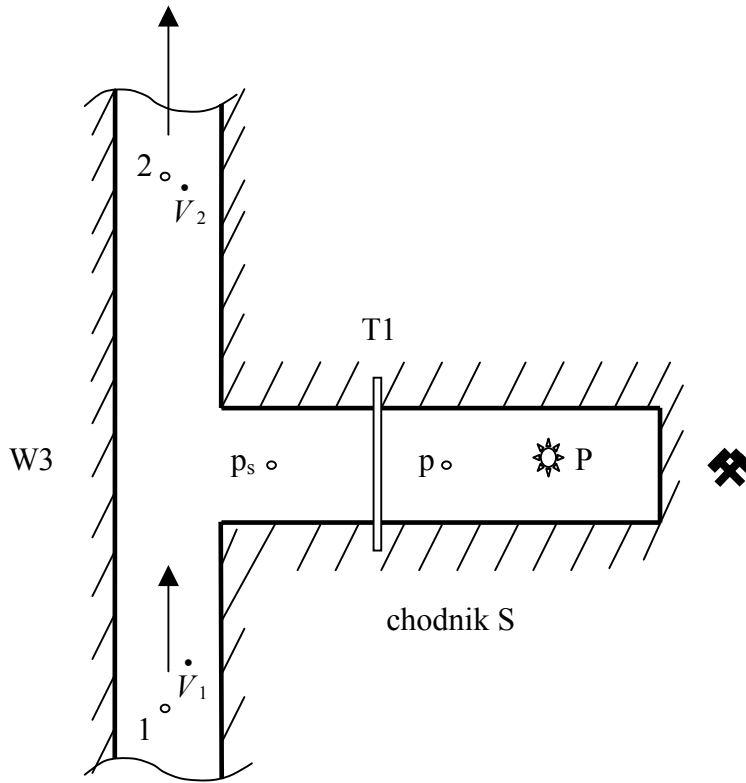
R – współczynnik proporcjonalności,

p – ciśnienie barometryczne w polu pożarowym, Pa,

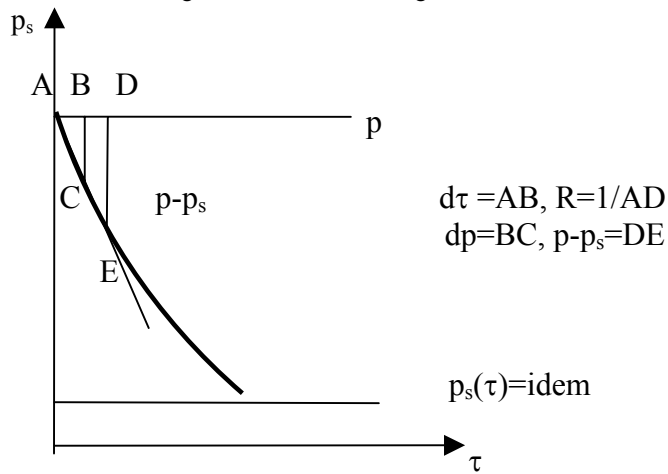
p_s – ciśnienie przed tamą pożarową, Pa.

Rozwiązując wymienione równanie uzyskuje się zależność

$$p(\tau) = p_s(\tau) + C \exp(R\tau) \quad (2)$$



Rys. 1. Pole pożarowe A obejmujące ślepy chodnik
 Fig. 1. A fire field covering the blind drift.



Rys. 2. Przybliżony przebieg zmian ciśnienia w polu pożarowym A wywołany niższą ciśnienia przed
 tamą T_1
 Fig. 2. Approximate course of pressure changes in the A fire field caused by the drop of pressure in front
 of T_1 stopping.

Stałą całkowania C wyznaczamy z warunku początkowego, przy czym przyjmujemy iż dla $\tau = 0$, $p(\tau) = p_0$. Przy tym założeniu stała C dana jest wzorem

$$C = p_0 - p_s(\tau) \quad (3)$$

Uwzględniając zależność (3) we wzorze (2) uzyskuje się równanie

$$p(\tau) = p_s(\tau) + [p_0 - p_s(\tau)] \exp(R\tau) \quad (4)$$

Z warunku dodatkowego wyznaczamy współczynnik proporcjonalności R . Przyjmujemy przy tym, że po czasie $\tau = \tau_1 > 0$ ciśnienie za tamą pojarową T1 obniżyło się do $p(\tau_1)$. Ze wzoru (4) uzyskujemy wówczas

$$p(\tau_1) = p_s(\tau_1) + [p_0 - p_s(\tau_1)] \exp(R\tau_1) \quad (5)$$

Wyznaczając z zależności (5) niewiadomą R otrzymujemy

$$R = \frac{1}{\tau_1} \ln \left[\frac{p(\tau_1) - p_s(\tau_1)}{p_0 - p_s(\tau_1)} \right] \quad (6)$$

Dalej R jest nazywany współczynnikiem wyrównywania ciśnienia w odizolowanej przestrzeni kopalni, przy czym $[R] = h^{-1}$.

Współczynnik ten w pewnym sensie charakteryzuje szczelność zamknięcia tej przestrzeni.

Ze skojarzenia wzorów (4) i (6) wynika zależność

$$p(\tau) = p_s(\tau) + [p_0 - p_s(\tau)] \left\{ \frac{p(\tau_1) - p_s(\tau_1)}{p_0 - p_s(\tau_1)} \right\}^{\frac{\tau}{\tau_1}} \quad (7)$$

na podstawie, której można wyznaczyć ciśnienie barometryczne w zamkniętej części kopalni po upływie określonego czasu $\tau(h)$.

Na podstawie wzorów (4) i (6) można również wyznaczyć czas po upływie którego ciśnienie w izolowanej części kopalni zrówna się z ciśnieniem panującym w czynnych wyrobiskach górniczych, oczywiście, jeśli określona zwyżka baryczna będzie odpowiednio długotrwała. Korzysta się przy tym z zależności

$$\tau = \tau_1 \frac{\ln[p(\tau) - p_s(\tau)] - \ln[p_0 - p_s(\tau)]}{\ln[p(\tau_1) - p_s(\tau_1)] - \ln[p_0 - p_s(\tau_1)]} \quad (8)$$

Stosując wzór (8) zakłada się, że dopuszczalna różnica między $p(\tau) - p_s(\tau)$ może wynosić 1 Pa. Wówczas wzór ten przyjmuje postać

$$\tau = \tau_1 \frac{-\ln[p_0 - p_s(\tau)]}{\ln[p(\tau_1) - p_s(\tau_1)] - \ln[p_0 - p_s(\tau_1)]} \quad (9)$$

Przyjęcie wymienionego założenia oznacza, że wyrównanie ciśnień następuje z dokładnością do +1 Pa.

Przykład 1

Rozważa się wyrównywanie ciśnień barometrycznych w polu pożarowym A przedstawionym na rys. 1. W chwili rozpoczęcia badań, ciśnienie barometryczne w wyniku długiego utrzymywania się stałego ciśnienia było jednakowe za i przed tamą pożarową T1 i wynosiło $p_0 = 100000$ Pa. Od tego momentu rozpoczął się spadek ciśnienia. Po upływie 6 godzin ciśnienie to za tamą pożarową wynosiło $p(6) = 99325$ Pa, a przed tamą miało wartość $p_s(6) = 99000$ Pa. Należy wyznaczyć wartość ciśnienia w polu pożarowym po upływie 20 i 30 godzin, jeśli zmierzone w tym czasie ciśnienia przed tamą pożarową wynosiły odpowiednio $p_s(20) = 98430$ Pa i $p_s(30) = 98000$ Pa, przy założeniu $R = \text{idem}$.

Rozwiązując postawiony problem w pierwszej kolejności wyznaczamy współczynnik R wyrównywania ciśnienia korzystając ze wzoru (6), przy czym uzyskuje się

$$R = -0,18732\text{h}^{-1}$$

Następnie ze wzoru (4) wyznaczamy ciśnienie jakie będzie panować w polu pożarowym:

$$\text{- po upływie czasu } \tau = 20 \text{ h} \quad p(20) = 98467 \text{ Pa}$$

$$\text{- po upływie czasu } \tau = 30 \text{ h} \quad p(30) = 98007 \text{ Pa}$$

Czas po którym dojdzie do wyrównania ciśnień barycznych przed i za tamą pożarową T1 można wyznaczyć z zależności (9). Podstawiając odpowiednie dane do tego wzoru otrzymujemy $\tau = 41$ h. Oznacza to, że przy długotrwałej zniżce barycznej wypływ gazów pożarowych z pola pożarowego do wyrobiska z prądem opływowym (rys. 1) może trwać do 41 godzin.

W przypadku gdy po długotrwałym utrzymywaniu się zrównoważonego ciśnienia przed i za tamą pożarową następuje zwyżka baryczna, to sposób oceny wyrównywania się ciśnień w przybliżeniu przebiega według krzywej podanej na rys. 3. Wzory z których należy korzystać w tym przypadku mają następującą postać:

- zmiany ciśnienia barycznego

$$p(\tau) = p_s(\tau) - [p_s(\tau) - p_0] \exp(-R\tau) \quad (10)$$

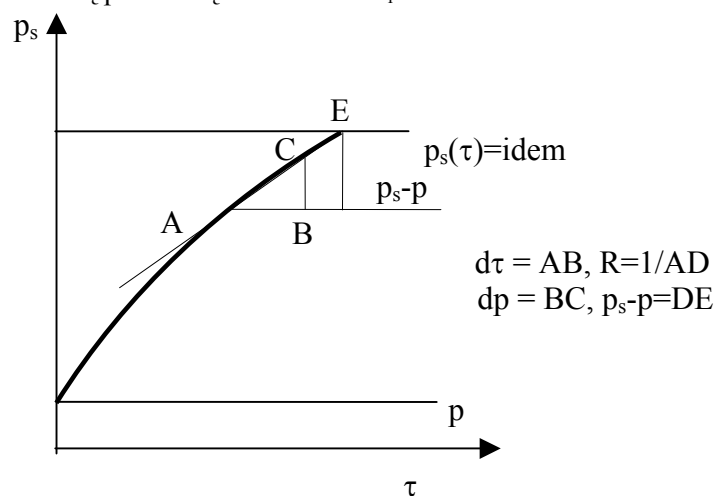
- współczynnik wyrównywania ciśnienia

$$R = -\frac{1}{\tau_1} \ln \left[\frac{p_s(\tau_1) - p(\tau_1)}{p_s(\tau_1) - p_0} \right] \quad (11)$$

- czas niezbędny do wyrównania ciśnień

$$\tau = \tau_1 \frac{-\ln[p_s(\tau) - p_0]}{\ln[p_s(\tau_1) - p(\tau_1)] - \ln[p_s(\tau_1) - p_0]} \quad (12)$$

We wzorach od (10) do (12) odpowiednio oznaczają: p_0 – ciśnienie początkowe dla warunków zrównoważonych przed i za tamą T1, $p(\tau_1)$ – ciśnienie w otamowanej przestrzeni po upływie czasu τ_1 oraz $p_s(\tau_1)$ – odpowiednia wartość ciśnienia zwiększającego przed tamą pożarową T1 w czasie τ_1 .



Rys. 3. Przybliżony przebieg zmian ciśnienia w polu pożarowym A wywołany wzrostem ciśnienia przed tamą T1

Fig. 3. Approximate course of pressure changes in the A fire field caused by the rise of pressure in front of T1 stopping.

Przykład 2

Niech pole pożarowe przedstawione na rys. 1 znajduje się w warunkach znacznej wyżki barycznej, przy czym za tamą pożarową T1 panuje ciśnienie początkowe $p_0 = 100325$ Pa. Po upływie czasu $\tau_1 = 13$ h ciśnienie w polu pożarowym (za tamą T1) wynosiło $p(13) = 100819$ Pa, a ciśnienie zwiększające było równe $p_s(13) = 101000$ Pa.

Wychodząc z wymienionych danych należy wyznaczyć współczynnik wyrównywania ciśnienia, wartość ciśnienia w polu pożarowym po $\tau = 24$ h oraz czas, po którym nastąpi wyrównanie ciśnienia przed i za tamą T1 jeśli ustalą się ciśnienie przed tą tamą na poziomie $p_s(\tau) = 101400$ Pa.

Korzystając ze wzorów (11), (10) i (12) uzyskuje się:

- współczynnik wyrównywania ciśnienia

$$R = 0,101247 \text{ h}^{-1}$$

- ciśnienie w polu pożarowym po upływie czasu $\tau = 24$ h

$$p(24) = 101305 \text{ Pa}$$

- czas po którym nastąpi wyrównanie ciśnień za i przed tamą

$$\tau = 69 \text{ h}$$

Z analizy przykładów 1 i 2 wynika, że współczynniki wyrównywania ciśnień dla rozważanego pola pożarowego (rys. 1) przy wypływie gazów z pola pożarowego ma znak (-), a przy dopływie powietrza do pola znak (+).

Jeśli pole pożarowe lub zroby poeksploatacyjne są izolowane kilkoma tamami wskazane jest wyznaczenie współczynnika wyrównywania ciśnień R dla wszystkich tam lub innych zamknięć izolowanych przestrzeni. Znajomość tych współczynników umożliwi bowiem wyznaczanie ciśnienia za tamami w zależności od zwyzek lub zniżek barycznych w czynnych wyrobiskach sąsiadujących z otamowanymi zrobami lub polami pożarowymi.

Należy zaznaczyć, że początkowe ciśnienie w zamkniętej części kopalni w chwili rozpoczynania badań, według omówionej procedury, może nie być równe ciśnieniu przed tamami izolacyjnymi lub pożarowymi. Wówczas w wyżej wyszczególnionych wzorach w miejsce p_0 należy podstawiać ciśnienie początkowe p_p panujące w izolowanej części kopalni w chwili $\tau = 0$.

3. OCENA SZCZELNOŚCI ZAMKNIĘĆ ZROBÓW LUB PÓL POŻAROWYCH

Wymiana gazów zrobowych lub gazów pożarowych w otamowanej przestrzeni z powietrzem kopalnianym występującym w czynnych wyrobiskach górniczych odbywa się przez nieszczelność tam izolacyjnych, spękany górotwór, podsadzkę oraz przez zroby (Szlązak J., 2002).

Szczelność tam izolacyjnych zależy od wielu czynników, a zwłaszcza od rodzaju tamy i jej konstrukcji, rodzaju i jakości materiału z którego zbudowana jest tama, wymiarów geometrycznych oraz różnicy ciśnień zachodzących w tamie.

W publikacjach dotyczących szczelności tam (Drenda, 1984, Madeja-Strumińska & Strumiński, 2004b, Rosiek i in., 1998) są podawane różne zależności analityczne umożliwiające wyznaczanie strat powietrza dla określonych rodzajów tam.

W szczególności w pracy (Rosiek i in., 1998) podaje się zależność

$$\dot{V}_t = k^* B \sqrt{\frac{\Delta p}{b}} \quad (13)$$

gdzie:

k^* - współczynnik przepuszczalności powietrza [$\text{m}^{3,5}/(\text{N}^{0,5} \cdot \text{s})$],

B – obwód tamy [m],

Δp – różnica ciśnień zachodząca w tamie [Pa],

b – grubość tamy [m],

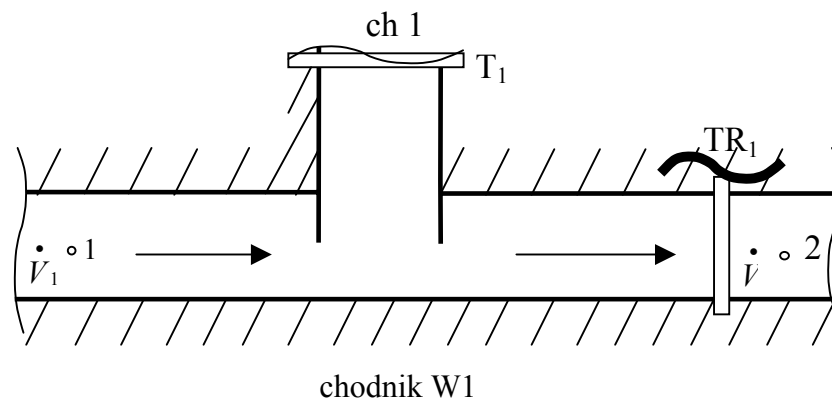
Wzór (13) może być stosowany wówczas, gdy znany jest współczynnik przepuszczalności k^* , różnica ciśnień Δp oraz parametry geometryczne tamy B i b .

Według pracy (Rosiek i in., 1998) współczynnik przepuszczalności powietrza dla tam pełnych wykonanych z betonitów mogą przykładowo przybierać wartości wyszczególnione w tabeli 1.

Tabela 1

Współczynniki przepuszczalności powietrza dla tam pełnych wykonanych z betonitów w kopalniach LGOM

Klasa tamy	Współczynnik przepuszczalności powietrza [m ^{3,5} /(N ^{0,5} · s)]
Bardzo szczelna	$10^3 k^* \leq 2,5$
Szczelna	$2,5 < 10^3 k^* \leq 5$
Średnio szczelna	$5 < 10^3 k^* \leq 10$
Mało szczelna	$10 < 10^3 k^* \leq 20$
Nieszczelna	$10^3 k^* > 20$



Rys. 4. Ocena szczelności zamknięcia chodnika ch1
Fig. 4. Evaluation of ch 1 drift closing leaktightness

Jeśli w oparciu o bezpośrednie pomiary można wyznaczyć różnicę ciśnień zachodzącą w tamie T_1 oraz strumień objętości powietrza ($\dot{V}_t = \dot{V}_1 - \dot{V}_2$, rys. 4) przepływający przez tamę i górotwór (uszczelnienie chodnika ch 1), to elementarny strumień objętości powietrza $d\dot{V}_t$ przepływający przez to uszczelnienie wywołany różnicą ciśnień $d(\Delta p)$ jest proporcjonalny do \dot{V}_t . Można więc napisać równanie różniczkowe (rys. 5)

$$\frac{d\dot{V}_t}{d(\Delta p)} = -k\dot{V}_t \quad (14)$$

gdzie k – współczynnik proporcjonalności.

W przypadku gdy gazy zrobowe wypływają z otamowanej przestrzeni do wyrobiska czynnego, wówczas równanie (14) ma postać

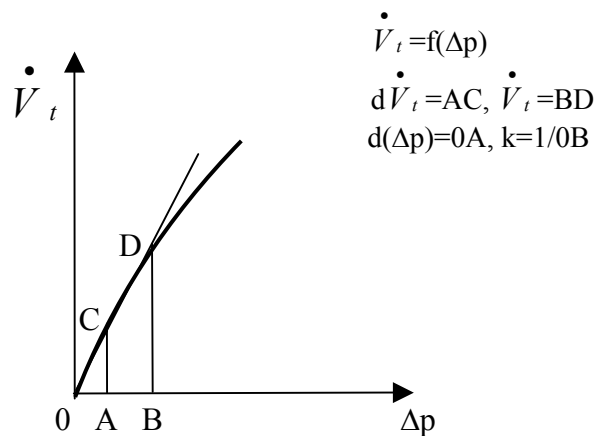
$$\frac{d\dot{V}_t}{d(\Delta p)} = k\dot{V}_t \quad (15)$$

Całkując równanie (14) uzyskuje się ogólne rozwiązanie tego równania w postaci

$$\dot{V}_t = C \exp(-k\Delta p) \quad (16)$$

Dokonując odpowiednich pomiarów Δp_1 i \dot{V}_{t1} wyznaczamy stałą całkowania C , a mianowicie:

$$C = \dot{V}_{t1} \exp(k\Delta p_1) \quad (17)$$



Rys. 5. Przybliżony przebieg zmian strumienia objętości powietrza przepływającego przez uszczelnienie chodnika ch_1 w zależności od wartości Δp

Fig. 5. Approximate course of changes of air flow volume passing through the sealing of ch_1 drift depending on Δp value

Przy innym przydławieniu tamy TR1 (rys. 4) uzyskuje się Δp_2 i \dot{V}_{t2} , przy czym ze wzorów (16) i (17) uzyskuje się

$$k = \frac{\ln \dot{V}_{t2} - \ln \dot{V}_{t1}}{\Delta p_1 - \Delta p_2} \quad (18)$$

Tak więc na podstawie dwukrotnego pomiaru \dot{V}_t i Δp można wyznaczyć wartości C i k interweniujące w równaniu (16). Równanie (16) przy znanych wartościach C i k umożliwia wyznaczenie strumienia objętości powietrza \dot{V}_t przepływającego przez uszczelnienie chodnika ch1 stanowiącego połączenie między zrobami lub polem pożarowym, a czynnym wentylacyjnie wyrobiskiem W1 (rys. 4).

Przykład 3

Rozważa się tamę izolacyjną T1 w chodniku ch1 izolującą zroby od chodnika W1 (rys. 4). Przy odpowiednio przymkniętej tamie regulacyjnej TR1 ilości powietrza w węzłach 1 i 2 wynosiły odpowiednio: $\dot{V}_1 = 5,0 \text{ m}^3/\text{s}$ i $\dot{V}_2 = 4,5 \text{ m}^3/\text{s}$, a różnica ciśnień w tamie T1 była równa $\Delta p_1 = 100 \text{ Pa}$. Po dalszym przymknięciu tamy TR1 uzyskano: $\dot{V}_1^* = 3,5 \text{ m}^3/\text{s}$, $\dot{V}_2^* = 2,8 \text{ m}^3/\text{s}$ oraz $\Delta p_2 = 130 \text{ Pa}$. W oparciu o te dane wyznaczono strumienie objętości powietrza wnikające do zrobów przy pierwszym i drugim położeniu zasowy regulacyjnej w tamie TR1, a mianowicie $\dot{V}_{t1} = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ i $\dot{V}_{t2} = 0,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

Korzystając ze wzoru (18) dla uszczelnienia chodnika ch1 tamą T1 uzyskuje się następującą wartość współczynnika k , nazywanego dalej współczynnikiem szczelności, przy czym $k = -0,01122 \text{ Pa}^{-1}$. Wobec tego wzór (16) na strumień objętości powietrza wpływającego do zrobów przez tamę T1 i jej otoczenie, przy $C = 0,1628 \text{ m}^3/\text{s}$ (17) przybiera postać

$$\dot{V}_t = 0,1628 \exp(0,01122 \Delta p) \quad (16a)$$

W oparciu o wymieniony wzór można wyznaczyć strumień objętości powietrza jaki wpływa do zrobów z wyrobiska W1 (rys. 4) przy określonym Δp .

Z ww. zależności wynika m.in. to, że w pewnych warunkach, tzn. gdyby różnica ciśnień w tamie T1 wnosila $\Delta p = 305,24 \text{ Pa}$, to ilość powietrza wpływającego do zrobów byłaby równa $\dot{V}_t = \dot{V}_1 = 5 \text{ m}^3/\text{s}$, czyli cały strumień powietrza z wyrobiska W1 wpływałby do otamowanej przestrzeni przez tamę T1 (uszczelnienie chodnika ch1).

W przypadku wypływu gazów zrobowych spoza tamy T1 (rys. 6.), ogólne rozwiązanie równania różniczkowego (15) ma postać

$$\dot{V}_t = C \exp(k \Delta p) \quad (19)$$

Wzory odpowiadające zależnościom (17) i (18) są następujące:

$$C = \dot{V}_{t1} \exp(-k \Delta p_1) \quad (20)$$

oraz

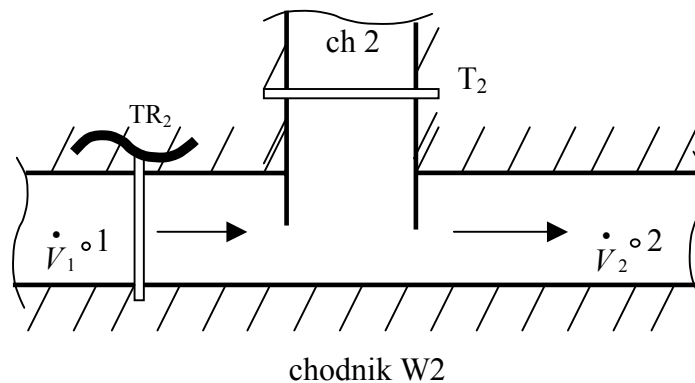
$$k = \frac{\ln \dot{V}_{t2} - \ln \dot{V}_{t1}}{\Delta p_2 - \Delta p_1} \quad (21)$$

Przykład 4

W celu określenia współczynnika szczelności tamy T2 i skał otaczających tę tamę, dokonano dwukrotnych pomiarów ilości powietrza w wyrobisku W2 (rys. 6) przy różnych położeniach zasuw w tamie TR2. Strumienie objętości powietrza w węzłach 1 i 2 przy pierwszym położeniu zasuw w tamie TR2 wynosiły: $\dot{V}_1 = 4 \text{ m}^3/\text{s}$ i $\dot{V}_2 = 4,6 \text{ m}^3/\text{s}$ przy $\Delta p_1 = 110 \text{ Pa}$, a przy drugim położeniu tej zasuw odpowiednio: $\dot{V}_1^* = 3,0 \text{ m}^3/\text{s}$, $\dot{V}_2^* = 3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ i $\Delta p_2 = 143 \text{ Pa}$. Biorąc pod uwagę wymienione pomiary określono strumienie objętości gazów zrobowych wypływających spoza tamy T2, przy czym przy pierwszym położeniu zasuw w tamie TR2 uzyskano $\dot{V}_{t1} = 0,6 \text{ m}^3/\text{s}$, a przy drugim $\dot{V}_{t2} = 0,9 \text{ m}^3/\text{s}$.

Dla przytoczonych wyników pomiarów ze wzoru (21) uzyskuje się następującą wartość współczynnika szczelności $k = 0,01229 \text{ Pa}^{-1}$.

Wartość stałej całkowania wg wzoru (20), dla tego przypadku wynosi $C = 0,1552 \text{ m}^3/\text{s}$.



Rys. 6. Ocena szczelności zamknięcia chodnika ch2
Fig. 6. Evaluation of ch 2 drift closing leaktightness

Biorąc pod uwagę wymienione wartości, wzór (19) umożliwiający wyznaczenie ilości wypływających gazów zrobowych spoza tamy T2 przy określonym Δp przybiera postać

$$\dot{V}_t = 0,1552 \exp(0,01229 \Delta p) \quad (19a)$$

Należy zauważyć, że wzór (19a) w odniesieniu do tamy T2 (rys. 6) może mieć zastosowanie tylko przy Δp nieprzekraczającym wartości $\Delta p = 264,40 \text{ Pa}$. Przy tej bowiem wartości Δp spoza tamy wypływałoby $\dot{V}_t = 4,0 \text{ m}^3/\text{s}$, tj. tyle gazów

zrobowych ile dopływało powietrza do węzła 1 przy pierwszym położeniu zasowy regulacyjnej w tamie TR2.

4. ZAGROŻENIE ZWIĄZANE Z WYMIANĄ ATMOSFERY ZROBOWEJ Z CZYNNYMI WYROBISKAMI GÓRNICZYMI

Zagrożenia związane z wymianą atmosfery zrobowej lub pól pożarowych z czynnymi wyrobiskami górniczymi, wiąże się głównie z wypływem z otamowanych przestrzeni gazów toksycznych, duszących lub wybuchowych, zwykle o znacznie podwyższonej temperaturze.

W zależności od intensywności wypływu tych gazów z otamowanych przestrzeni w określonych prądach powietrznych mogą być przekroczone dopuszczalne stężenia (Dz. U. Nr 139, poz. 1169, 2002) takich gazów jak: CO₂, CH₄, CO bądź też obniżone stężenie O₂ poniżej granicy dopuszczalnej. W wyniku wypływu gazów o podwyższonej temperaturze może nawet dojść do przekroczenia granicznych wartości temperatury powietrza w określonych wyrobiskach.

Intensywny wypływ gazów z otamowanych przestrzeni w kopalniach podziemnych ma na ogół miejsce w czasie gwałtownych zniżeń barycznych (rozdział 2). Ilość wymienionych natomiast gazów między zrobami lub polami pożarowymi wiąże się ściśle ze szczelnością izolacji tych przestrzeni (rozdział 3).

Jeśli znane są dla poszczególnych zamknięć zrobów lub pól pożarowych wartości współczynników wyrównywania ciśnień R oraz współczynniki szczelności k, to możliwe jest wyznaczenie w określonym czasie τ różnicy ciśnień w tych zamknięciach przy zniżce barycznej i wyznaczenie na tej podstawie strumieni gazów wypływających z tych przestrzeni do czynnych wyrobisk górniczych. Jeśli dodatkowo znany jest skład chemiczny gazów wypływających z otamowanych przestrzeni do wyrobisk czynnych oraz ich temperatura, a także ilość płynącego powietrza tymi wyrobiskami, to można określić wzrost zagrożenia aerologicznego (gazowego i temperaturowego).

Jeśli spoza tamy izolującej zrobów wypływa strumień gazów zrobowych \dot{V}_t (m³/s), który zawiera $i = 1, 2, \dots, I$ składników o stężeniu r_i (% obj.), to strumienie objętości poszczególnych składników \dot{V}_i (m³/s) można wyznaczyć z zależności

$$\dot{V}_i = \dot{V}_t \cdot r_i \quad (22)$$

W wyrobisku czynnym, w którym płynie opływowy prąd powietrza \dot{V}^* stężenia poszczególnych składników tego powietrza wynoszą r_i^* ($i = 1, 2, \dots, I$). Wobec tego strumienie objętości tych składników mogą być wyznaczone ze wzoru

$$\dot{V}_i^* = \dot{V}^* r_i^* \quad (23)$$

Strumienie mas składników gazów zrobowych lub powietrza kopalnianego $i = 1, 2, \dots, I$ wyznacza się korzystając z zależności (Madeja-Strumińska & Strumiński, 1998):

- dla gazów zrobowych

$$\dot{m}_i = \dot{V}_i \rho_i \quad (24)$$

- dla powietrza w prądzie opływowym przed miejscem dopływu gazów zrobowych

$$\dot{m}_i^* = \dot{V}_i^* \rho_i^* \quad (25)$$

Gęstości ρ_i i ρ_i^* mogą być określone w oparciu o tabelę 2 oraz wzór wynikający z równania stanu gazów doskonałych (Madeja-Strumińska & Strumiński, 1998), a mianowicie:

- dla gazów zrobowych

$$\rho_i = \rho_{ni} \frac{p}{p_n} \cdot \frac{T_n}{T} \quad (26)$$

- dla powietrza w prądzie opływowym przed miejscem dopływu gazów zrobowych

$$\rho_i^* = \rho_{ni} \frac{p_s}{p_n} \cdot \frac{T_n}{T_s} \quad (27)$$

gdzie:

p – ciśnienie statyczne, bezwzględne za tamą izolacyjną zmierzone lub np. wyznaczone ze wzoru (10) [Pa],

ρ_{ni} - gęstość i -tego składnika gazów zrobowych lub powietrza kopalnianego w warunkach normalnych, tj. dla $T_n = 273,15$ K i $p_n = 101325$ Pa,

T – temperatura bezwzględna gazów zrobowych [K],

p_s – ciśnienie statyczne, bezwzględne określone w drodze pomiarów bezpośrednich przed tamą izolacyjną [Pa],

T_s – temperatura bezwzględna powietrza przed tą tamą [K].

Całkowity strumień masy gazów w wyrobisku poza miejscem dołączania się gazów może być wyznaczony ze wzoru

$$\dot{m}_C = \sum_i \dot{m}_i + \sum_i \dot{m}_i^* \quad (28)$$

Udziały masowe poszczególnych składników natomiast określamy z zależności

$$g_i = \frac{\dot{m}_i + \dot{m}_i^*}{\dot{m}_C} \quad (29)$$

Masy drobinowe oraz gęstości w warunkach normalnych niektórych gazów

Rodzaj gazu	Wzór chemiczny	Masa drobinowa	Gęstość w warunkach normalnych
-	-	-	kg/m ³
Hel	He	4,002	0,178
Argon	Ar	39,94	1,784
Powietrze	-	28,97	1,293
Tlen	O ₂	32,00	1,429
Azot	N ₂	28,016	1,250
Wodór	H ₂	2,016	0,0898
Tlenek węgla	CO	28,00	1,250
Dwutlenek węgla	CO ₂	44,00	1,976
Para wodna	H ₂ O	18,02	0,804
Dwutlenek siarki	SO ₂	64,06	2,926
Acetylen	C ₂ H ₂	26,02	1,170
Metan	CH ₄	16,03	0,716
Etylen	C ₂ H ₄	28,03	1,260
Etan	C ₂ H ₆	30,70	1,356
Siarkowodór	H ₂ S	34,08	1,42895

Z kolei oblicza się udziały molowe tych składników korzystając ze wzoru

$$z_i = \frac{\dot{n}_i}{\dot{n}} \quad (30)$$

przy czym strumienie \dot{n}_i składników $i = 1, 2, \dots, I$ wyrażone w kilomolach na sekundę (lub minutę) są wyznaczone (Madeja-Strumińska & Strumiński, 1998) ze związku

$$\dot{n}_i = \frac{\dot{m}_i + \dot{m}_i^*}{M_i} \quad (31)$$

gdzie M_i oznacza masę drobinową i -tego składnika (tabela 2).

Całkowity strumień kilomoli mieszaniny gazowej w wyrobisku z prądem opływowym za otamowanym wyrobiskiem, z którego wypływają gazy, wynosi

$$\dot{n}_c = \sum_i \dot{n}_i \quad (32)$$

Ponieważ udziały molowe poszczególnych składników są równe udziałom objętościowym ($r_i = z_i$) (Madeja-Strumińska & Strumiński, 1998), wobec tego po wyznaczeniu tych udziałów określony jest skład procentowy poszczególnych składników gazów w prądzie opływowym za miejscem dołączania się gazów zrobowych. Znając ten skład można go porównać ze stężeniami gazów

dopuszczonych przepisami górnictwymi (Dz. U. Nr 139, poz. 1169, 2002) i ocenić zagrożenie wynikające z wypływu gazów spoza określonej tamy izolacyjnej lub pożarowej.

Jeśli temperatura gazów wypływających spoza tamy izolacyjnej lub pożarowej wynosi t ($^{\circ}\text{C}$), a temperatura powietrza w prądzie opływowym przed miejscem dołączania się gazów wypływających spoza tamy ma wartość t^* ($^{\circ}\text{C}$), to temperaturę powietrza po dołączeniu się tych gazów można wyznaczyć ze wzoru (Madeja-Strumińska & Strumiński, 1998, 2004a)

$$t_c = \frac{t \cdot \sum_i \dot{m}_i + t^* \cdot \sum_i \dot{m}_i^*}{\sum_i \dot{m}_i + \sum_i \dot{m}_i^*} \quad (33)$$

Należy zaznaczyć, że przy wyznaczaniu gęstości powietrza kopalnianego można także korzystać z termicznej temperatury wirtualnej tego powietrza (Madeja-Strumińska & Strumiński, 1998, 2004a).

Przykład 5

W przykładzie tym rozważa się pole pożarowe A izolowane tamą T1 (rys. 1). Według obliczeń przeprowadzonych zgodnie z metodą podaną w rozdziale 2, ciśnienie za tamą pożarową, w pewnym okresie wynosiło $p = 99890$ Pa, a przed tą tamą $p_s(6) = 99830$ Pa. Zatem różnica ciśnień w tamie T1 wynosiła $\Delta p = 60$ Pa. W oparciu o wzór (19a) dla warunków z przykładu 4 uzyskuje się następujący strumień objętości powietrza wypływającego spoza tamy T1: $\dot{V}_t = 0,324$ m³/s = 19,44 m³/min.

Gazy pożarowe CH₄, CO, CO₂, O₂, N₂ wypływające spoza tamy T1 miały następujące stężenia: $r_{\text{CH}_4} = 2,10\%$ obj., $r_{\text{CO}} = 0,08\%$ obj., $r_{\text{CO}_2} = 3,60\%$ obj., $r_{\text{O}_2} = 17,24\%$ obj., $r_{\text{N}_2} = 76,98\%$ obj. oraz temperaturę $t = 42,3^{\circ}\text{C}$.

Strumień objętości powietrza w punkcie 1 (rys. 1) wynosił $\dot{V}_1^* = 3,3$ m³/s = 198 m³/min, temperatura powietrza $t = 28^{\circ}\text{C}$, a stężenia poszczególnych składników tego powietrza były następujące: $r_{\text{CH}_4}^* = 0,5\%$ obj., $r_{\text{CO}}^* = 0\%$ obj., $r_{\text{CO}_2}^* = 0,27\%$ obj., $r_{\text{O}_2}^* = 19,61\%$ obj. oraz $r_{\text{N}_2}^* = 79,62\%$ obj.

Biorąc to pod uwagę należy ocenić jaki będzie skład powietrza po dołączeniu się do strumienia objętości powietrza \dot{V}_1^* , strumienia \dot{V}_t gazów wypływających spoza tamy T1.

W celu rozwiązania tego zagadnienia w pierwszej kolejności wyznaczamy strumienie objętości składników gazów pożarowych wypływających spoza tamy T1 oraz składników powietrza w węźle 1 (rys. 1), korzystając ze wzorów (22) i (23), przy czym uzyskujemy:

$$\begin{aligned}
 & - \dot{V}_{\text{CH}_4} = 0,41 \text{ m}^3/\text{min}, \dot{V}_{\text{CO}} = 0,02 \text{ m}^3/\text{min}, \dot{V}_{\text{CO}_2} = 0,70 \text{ m}^3/\text{min}, \dot{V}_{\text{O}_2} = 3,35 \text{ m}^3/\text{min}, \\
 & \dot{V}_{\text{N}_2} = 14,96 \text{ m}^3/\text{min}; \\
 & - \dot{V}_{\text{CH}_4}^* = 0,99 \text{ m}^3/\text{min}, \dot{V}_{\text{CO}}^* = 0 \text{ m}^3/\text{min}, \dot{V}_{\text{CO}_2}^* = 0,53 \text{ m}^3/\text{min}, \dot{V}_{\text{O}_2}^* = 38,83 \text{ m}^3/\text{min}, \\
 & \dot{V}_{\text{N}_2}^* = 157,65 \text{ m}^3/\text{min}.
 \end{aligned}$$

Gęstości mas wymienionych składników oblicza się w oparciu o zależności (26) i (27) oraz w oparciu o tabelę 2

$$\begin{aligned}
 & - \rho_{\text{CH}_4} = 0,6111 \text{ kg/m}^3, \rho_{\text{CO}} = 1,0669 \text{ kg/m}^3, \rho_{\text{CO}_2} = 1,6866 \text{ kg/m}^3, \rho_{\text{O}_2} = 1,2197 \text{ kg/m}^3, \\
 & \rho_{\text{N}_2} = 1,0669 \text{ kg/m}^3; \\
 & - \rho_{\text{CH}_4}^* = 0,6398 \text{ kg/m}^3, \rho_{\text{CO}_2}^* = 1,7657 \text{ kg/m}^3, \rho_{\text{O}_2}^* = 1,2769 \text{ kg/m}^3, \rho_{\text{N}_2}^* = 1,1169 \\
 & \text{kg/m}^3.
 \end{aligned}$$

Masy strumieni wymienionych składników wyznaczone w oparciu o wzory (24) i (25) wynoszą:

$$\begin{aligned}
 & - \dot{m}_{\text{CH}_4} = 0,251 \text{ kg/min}, \dot{m}_{\text{CO}} = 0,021 \text{ kg/min}, \dot{m}_{\text{CO}_2} = 1,181 \text{ kg/min}, \dot{m}_{\text{O}_2} = 4,086 \\
 & \text{kg/min}, \dot{m}_{\text{N}_2} = 15,961 \text{ kg/min}. \\
 & - \dot{m}_{\text{CH}_4}^* = 0,633 \text{ kg/min}, \dot{m}_{\text{CO}}^* = 0 \text{ kg/min}, \dot{m}_{\text{CO}_2}^* = 0,936 \text{ kg/min}, \dot{m}_{\text{O}_2}^* = 49,582 \\
 & \text{kg/min}, \dot{m}_{\text{N}_2}^* = 176,079 \text{ kg/min}.
 \end{aligned}$$

Całkowity strumień masy mieszaniny gazów pożarowych i powietrza w wyrobisku W3 wynosi (wzór (28)) $\dot{m}_c = 248,730 \text{ kg/min}$, a udziały masowe poszczególnych składników w tej mieszaninie mają wartości (wzór (29)):

$$- g_{\text{CH}_4} = 3,554 \cdot 10^{-3}, g_{\text{CO}} = 8,443 \cdot 10^{-5}, g_{\text{CO}_2} = 8,511 \cdot 10^{-3}, g_{\text{O}_2} = 0,216, g_{\text{N}_2} = 0,772.$$

Strumienie gazów CH_4 , CO , CO_2 , O_2 i N_2 wyrażone w kilomolach na minutę według wzoru (31) i tabeli 2 wynoszą:

$$\dot{n}_{\text{CH}_4} = 0,0551, \dot{n}_{\text{CO}} = 7,5 \cdot 10^{-4}, \dot{n}_{\text{CO}_2} = 0,0481, \dot{n}_{\text{O}_2} = 1,6771, \dot{n}_{\text{N}_2} = 6,855.$$

Na podstawie wymienionych danych i zależności (32) obliczamy całkowitą ilość kilomoli mieszaniny gazowej w wyrobisku z prądem opływowym W3 w węźle 2 (za chodnikiem chS, rys. 1), przy czym $\dot{n}_c = 8,6361 \text{ kmol/min}$.

Udziały molowe, które są równe udziałom objętościowym ($z_i = r_i$) wymienionej mieszaniny wynoszą (wzór (30)):

$$r_{\text{CH}_4} = 6,38 \cdot 10^{-3} (0,64\% \text{ obj.}), r_{\text{CO}} = 8,6845 \cdot 10^{-5} (0,0087\% \text{ obj.}), r_{\text{CO}_2} = 5,5696 \cdot 10^{-3} (0,56\% \text{ obj.}), r_{\text{O}_2} = 0,1942 (19,42\% \text{ obj.}), r_{\text{N}_2} = 0,7938 (79,38\% \text{ obj.}).$$

Zgodnie ze wzorem (33) temperatura powietrza po dołączeniu się gazów pożarowych wypływających spoza tamy T1 będzie wynosić $t_c = 29,24^\circ\text{C}$.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że w omawianych wyżej warunkach, po dołączeniu się do prądu powietrza płynącego wyrobiskiem W3 gazów pożarowych wypływających spoza tamy T1 przy rozważanej zniżce barycznej nastąpi przekroczenie dopuszczalnego stężenia: tlenku węgla, tj. 0,0026% obj. oraz

dopuszczonej przepisami górnictwymi temperatury powietrza wynoszącej 28°C (Dz. U. Nr 139, poz. 1169, 2002).

5. ZAKOŃCZENIE

Z przeprowadzonych w niniejszym artykule rozważań wynika, że w celu dokładnego rozpoznania zagrożeń jakie mogą wystąpić od izolowanych zrobów i pól pożarowych jest wskazane określenie dla każdego zamknięcia (np. tamy izolacyjnej) współczynnika wyrównywania ciśnienia R i współczynnika szczelności k .

Jeśli nie przeprowadzono badań wymienionych współczynników, to dla orientacyjnych obliczeń można korzystać z uśrednionych wartości przyjmując odpowiednio $R = \pm 0,15 \text{ h}^{-1}$ oraz $k = \pm 0,01 \text{ Pa}^{-1}$. Za ciśnienie początkowe p_0 można przyjmować ciśnienie powietrza przed tamą (uszczelnieniem) jakie poprzedzało zniżkę lub wyżkę baryczną.

Przedstawiona w niniejszym artykule metoda pozwala na ocenę zagrożeń jakie ewentualnie mogą wystąpić w kopalni podziemnej w czasie zniżki barycznej. Znajomość tych zagrożeń powinna, naszym zdaniem, ułatwić prognozowanie działań prewencyjnych w określonych rejonach kopalń podziemnych. Działania te powinny iść w kierunku zapewnienia odpowiednich strumieni objętości powietrza w zagrożonych rejonach kopalni, odpowiedniej szczelności izolacji zamkniętych przestrzeni oraz odpowiedniego monitoringu.

Niniejszy artykuł powstał w oparciu o wybrane wyniki badań przeprowadzonych w ramach projektu Ministerstwa Nauki i Informatyzacji 4T12A 03527.

LITERATURA

- BUDRYK W., 1951, *Wentylacja kopalń, Część I, Przewietrzanie wyrobisk*, PWT, Katowice, 63-67.
- DRENDA J., 1984, *Wyznaczanie oporów aerodynamicznych tam wentylacyjnych dla projektowania lub rekonstrukcji systemu wentylacji kopalń*. Przegląd Górniczy nr 3.
- KAJDASZ Z., MARKEFKA P., STEFANOWICZ T., 2002, *Zagrożenia aerologiczne wywołane w kopalniach zmianami ciśnienia barometrycznego – Sposób eliminowania*. Ratownictwo Górnicze, 2, 10-15.
- MADEJA-STRUMIŃSKA B., STRUMIŃSKI A., 1998, *Aerotermodynamika górnicza*. Wyd. Śląsk, Katowice, 48-59, 78-93.
- MADEJA-STRUMIŃSKA B., STRUMIŃSKI A., 2004a, *Projektowanie naturalno-wymuszonych rozplywów powietrza w kopalniach podziemnych*. Oficyna Wydawnicza PWr., Wrocław, 48-58.
- MADEJA-STRUMIŃSKA B., STRUMIŃSKI A., 2004b, *Optymalizacja wymuszonych rozplywów powietrza w warunkach skrapowanych oraz ocena wybranych zagrożeń w kopalniach podziemnych*. Oficyna Wydawnicza PWr., Wrocław, 83-98.
- PONOMARIEW K.K., 1969, *Układanie i rozwiązywanie równań różniczkowych w technice*. WNT, Warszawa, 13-28, 69-72.

- ROSIEK F., SIKORA M., URBAŃSKI J., 1998, *Ocena szczelności tam wentylacyjnych w kopalniach LGOM*. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa PWr., Studia i Materiały 27, Górnictwo i geologia IV, Wrocław, 81-82, 97.
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28.06.2002r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy oraz prowadzenia ruchu i specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych, Dz. U. Nr 139, poz. 1169.
- STRUMIŃSKI A., MADEJA-STRUMIŃSKA B., 2004, *Wpływ zmian ciśnienia barometrycznego na zagrożenie gazowe na górniczych terenach poeksploatacyjnych*. Cuprum, 2 (31), 51-64.
- SZŁĄZAK J., 1984, *Przegląd stosowanych technologii uszczelniania zrobów zawałowych*. Wiadomości Górnicze, 5-6, 119-123.
- SZŁĄZAK J., 2002, *Przepływ powietrza przez strefę zawału w świetle badań teoretycznych i eksperymentalnych*. WND AGH, Rozprawy, Monografie, 90, Kraków, 10-37.
- WASILEWSKI S., 2003, *Obserwacja ciśnienia powietrza i potencjału aerodynamicznego w kopalni*. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 3-4/387, Katowice, 7-19.
- WASILEWSKI S., 2004, *Ciśnienie barometryczne i jego zmiany w kopalniach głębinowych*. 3 Szkoła Aerologii Górniczej, Zakopane, 533-546.

*aerological hazards, stoppings leaktightness,
changes of barometric pressure in gobs*

POST MINING EXCAVATION AS A SOURCE OF GAS AND THERMAL HAZARD IN UNDERGROUND MINES

The paper presents the idea of evaluating the time changes of barometric pressure in the stopped excavation and fire fields during the barometric rises and drops. The presented method allows for determining the coefficients of pressure equalization, evaluation of insulation leaktightness of closed spaces and analysis of hazards resulting from the exchange of gobs and fire fields atmosphere with mining workings. The issues included in the paper are illustrated by five generalized examples taken from practice obtained in copper and hard coal mines.