ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1989

Seria: GÓRNICTWO z. 148 Nr kol. 899

Ryszard FRĄCZEK

ANALITYCZNA METODA PROGNOZOWANIA WILGOTNOŚCI POWIETRZA W WYROBISKACH GÓRNICZYCH PRZEWIETRZANYCH WENTYLACJĄ ODRĘBNĄ TŁOCZĄCĄ

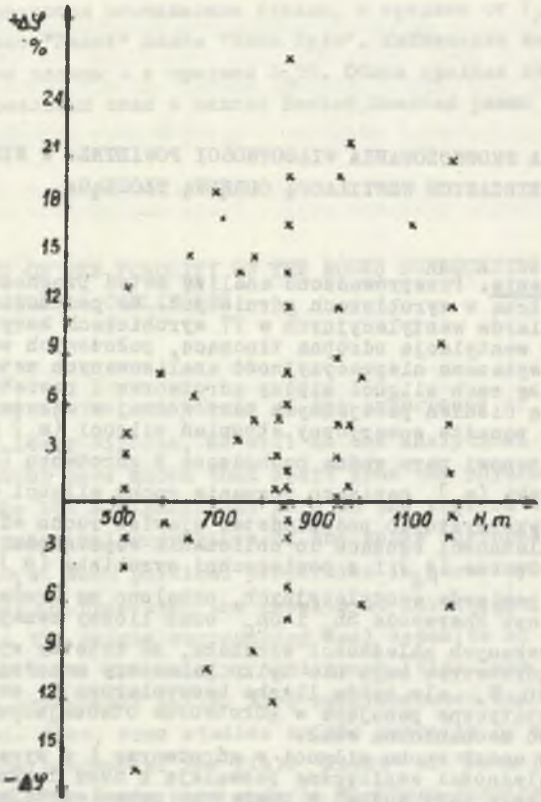
Streszczenie. Przeprowadzono analizę metod prognozowania wilgotności powietrza w wyrobiskach górniczych. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wentylacyjnych w 77 wyrobiskach korytarzowych przewietrzanych wentylacją odrębną tłoczącą, położonych na głębokości do 1240 m, wykazano nieprecyzyjność analizowanych metod. Przyjmując założenie, że ruch wilgoci między górotworem i powietrzem wywołany jest różnicą ciśnień parcjalnych pary wodnej w warstwie granicznej (p, p_n, p_g), a ponadto sumaryczny strumień wilgoci (m_c) nawilżający powietrze stanowi para wodna pochodząca z górotworu (m_g) i z powierzchni wyrobiska (m_p), napisano równanie ruchu wilgoci w wyrobisku. Następnie wykorzystując podobieństwo zjawisk ruchu wilgoci i ciepła, ustalono zależności służące do obliczania współczynników ruchu wilgoci w górotworze (β_g) i z powierzchni wyrobiska (β_p). Wykorzystując wyniki pomiarów wentylacyjnych, ustalono na drodze empirycznej wartości liczb Sherwooda Sh_g i Sh_p oraz liczby bezwymiarowej F. Analiza uzyskanych zależności wskazała, że istotny wpływ na ruch wilgoci w górotworze mają nie tylko parametry wchodzące w skład liczb Fo, Bi, W, ale także liczba bezwymiarowa R uwzględniająca ciśnienie statyczne panujące w górotworze otaczającym wyrobisko oraz wytrzymałość mechaniczna skał.

Przyjęty model ruchu wilgoci w górotworze i w wyrobisku oraz uzyskane zależności empiryczne pozwalają z dużą dokładnością prognozować ciśnienie pary wodnej w powietrzu przewietrzającym wyrobisko korytarzowe z wentylacją odrębną tłoczącą.

1. Wprowadzenie

Warunki klimatyczne w wyrobisku górniczym kształtują: temperatura, prędkość i wilgotność powietrza. Opublikowane metody prognozy temperatury powietrza w wyrobisku z wentylacją opływową [4, 11, 14, 15, 16] osiągnęły wysoki poziom dokładności. Istotne różnice między wynikami prognozy a wynikami pomiarów temperatury powietrza mierzonej termometrem suchym (t_s) uzyskuje się w wyrobiskach zawilgoconych.

Mniej metod prognozy temperatury powietrza opracowano dla wyrobisk przewietrzanych wentylacją odrębną [4, 6, 7, 11, 13, 16]. W wyżej wymienionych metodach uwzględniono wpływ procesu parowania wody na temperaturę powietrza bez prognozy wilgotności powietrza. W większości ww. metod z góry zakłada się przyrost wilgotności powietrza $\Delta\varphi$.

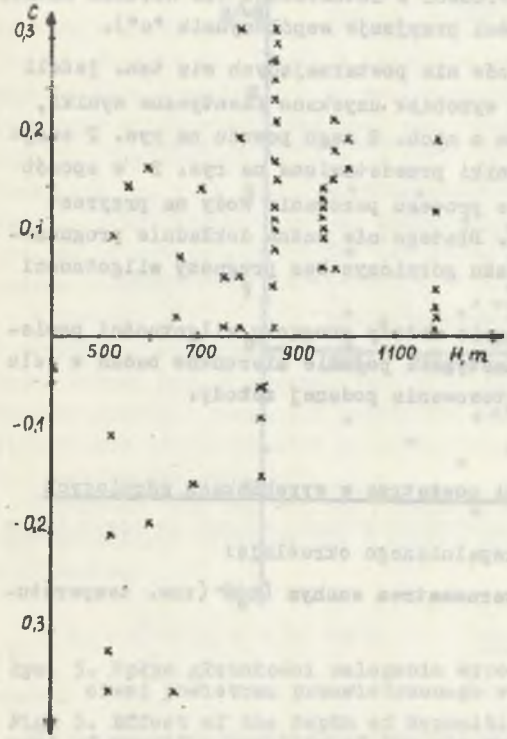


Rys. 1. Wpływ głębokości położenia wyrobiska na przyrost wilgotności względnej powietrza przy stosowaniu wentylacji odrębnej tłoczącej

Fig. 1. Effect of the depth of location of the excavation on the increment of relative humidity of air when using separate pressure fans

Z prac [4, 8, 10, 11, 14] wynika, że istotnym elementem kształtującym warunki klimatyczne w wyrobiskach górniczych jest głębokość zalegania wyrobiska. Na tej podstawie oraz korzystając z wyników pomiarów wentylacyjnych wykonanych w 77 wyrobiskach korytarzowych kamiennych, drążonych przez Przedsiębiorstwo Robót Górniczych w Gliwicach, autor przygotował dane do analizy wpływu głębokości zalegania wyrobiska na wartość danych stosowanych do prognozy wilgotności i temperatury powietrza.

Na rys. 1 przedstawiono wpływ głębokości zalegania wyrobiska na przyrost wilgotności względnej $\Delta\varphi$. Istotny wpływ na widoczne zróżnicowanie wartości $\Delta\varphi$ dla danej głębokości ma wilgotność i ilość doprowadzonego do przodku powietrza oraz wymiary geometryczne wyrobiska.



Rys. 2. Wpływ głębokości zalegania wyrobiska na udział ciepła wynoszonego przez parę wodną w bilansie ciepła wyrobiska przewietrzanego wentylacją odrębną

Fig. 2. Effect of the depth of deposition of the excavation on the percentange of the heat raised by water vapour in the heat balance of the excavation ventilated by separate fans

W pracach [11, 12, 16], do prognozy temperatury powietrza w wyrobisku znajduje zastosowanie tzw. cieplny współczynnik wymiany wilgoci "c". Jego wielkość określa się z zależności $c=1-q_p/q_c$, gdzie: q_p - entalpia właściwa pary wodnej w powietrzu kJ/kg, q_c - entalpia właściwa powietrza wilgotnego kJ/kg.

W wyrobiskach górniczych przewietrzanych wentylacją opływową stwierdza się, że około 50-80% ciepła wynoszonego przez powietrze z wyrobiska stanowi ciepło wynoszone przez parę wodną [3, 4, 11, 16]. Natomiast w wyrobiskach przewietrzanych wentylacją odrębną udział entalpii właściwej pary wodnej w bilansie entalpii wynoszonej przez powietrze z wyrobiska wzrasta do 95% [2, 16].

Na rys. 2 pokazano wpływ głębokości położenia wyrobiska na udział procentowy entalpii wynoszonej przez parę wodną, uzyskany na podstawie pomiarów wykonanych przez autora niniejszej pracy. Z przedstawionego rysunku wynika, że w większości wyrobisk uzyskano dodatnie wartości współczynnika "c", co oznacza, że przyrostowi temperatury powietrza towarzyszy przyrost pary wodnej w powietrzu. W części wyrobisk współczynnik "c" przyjmuje wartości ujemne, co oznacza, że spadkowi temperatury powietrza towarzyszy przyrost pary wodnej.

Dla wybranej głębokości H istotny wpływ na wielkość współczynnika "c" ma:

- czas przewietrzania wyrobiska (dłuższy czas przewietrzania wyrobiska powoduje wzrost wartości współczynnika "c"),
- temperatura i wilgotność powietrza wlotowego (im wyższa temperatura powietrza wlotowego, tym mniejsza wartość współczynnika "c" i podobnie większej wilgotności powietrza wlotowego odpowiada mniejsza wartość współczynnika "c"),

- ucieczki powietrza przez nieszczelności w lutniociągu (im większe ucieczki powietrza, tym mniejsze wartości przyjmuje współczynnik "c").

Na rys. 1-5 podano wyniki pomiarów nie powtarzających się tzn. jeżeli dla danej głębokości H dla różnych wyrobisk uzyskano identyczne wyniki, na rysunkach zaznaczono tylko jeden z nich. Z tego powodu na rys. 2 znajduje się 56 punktów zamiast 77. Wyniki przedstawione na rys. 2 w sposób dobitny świadczą o istotnym wpływie procesu parowania wody na przyrost temperatury powietrza w wyrobisku. Dlatego nie można dokładnie prognozować temperatury powietrza w wyrobisku górniczym bez prognozy wilgotności powietrza.

Celem niniejszej pracy jest podanie metody prognozy wilgotności powietrza w wyrobiskach górniczych, a następnie podanie kierunków badań w celu określenia potrzebnych danych do stosowania podanej metody.

2. Podstawy prognozy wilgotności powietrza w wyrobiskach górniczych

Parametry fizyczne powietrza kopalnianego określają:

- temperatura powietrza mierzona termometrem suchym (t_s) (tzw. temperatura sucha),
- ciśnienie powietrza (p_s),
- ciśnienie pary wodnej (p_p),
- stała gazowa powietrza (R_g).

W wentylacji kopalń dość często przy ocenie wilgotności powietrza stosuje się także takie parametry, jak: wilgotność właściwa powietrza x, wilgotność względna φ. Między poszczególnymi parametrami powietrza wilgotnego zachodzą relacje:

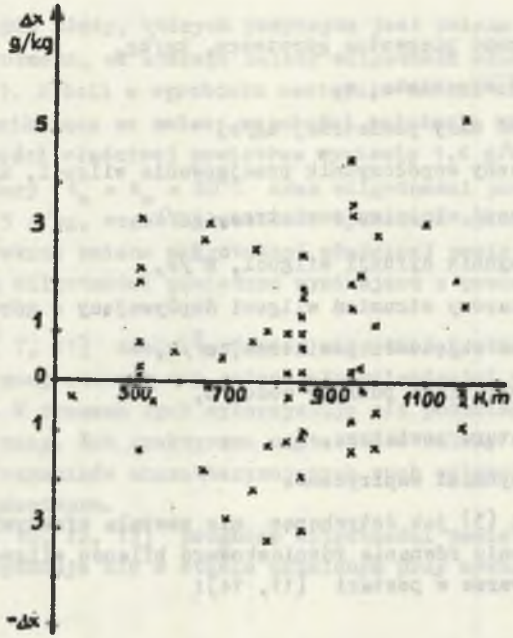
$$x = 0{,}622 \frac{p_p}{p_s - p_p}, \quad \text{kg/kg}, \tag{1}$$

$$\varphi = \frac{p_p}{p_n}, \quad \%, \tag{2}$$

gdzie:

p_n - ciśnienie parcjalne pary wodnej w stanie nasycenia w powietrzu, Pa.

Wyznaczenie jednego z trzech parametrów (p_p, x, φ) przy znanym ciśnieniu powietrza (p_s) i temperaturze (t_s) pozwala określić pozostałe. Najczęściej w obliczeniach wentylacyjnych operuje się wilgotnością właściwą powietrza x, a to z powodu wykorzystywania jej przy sporządzaniu bilansu ciepła i masy powietrza. Przy wykonywaniu prognozy powietrza i prognozy wilgotności powietrza korzystniej jest operować ciśnieniem pary wodnej,



Rys. 3. Wpływ głębokości zalegania wyrobiska na przyrost wilgotności właściwej powietrza przewietrzanego wentylacją odrębną tłoczącą

Fig. 3. Effect of the depth of deposition of the excavation on the increment of specific humidity of the air ventilated by separate pressure fans

gdyż ten parametr w niewielkim stopniu zależy od ciśnienia powietrza, co ma istotne znaczenie w nachylonych wyrobiskach górniczych.

Na rys. 3 pokazano, jak kształtuje się przyrost wilgotności właściwej powietrza w wyrobiskach z wentylacją odrębną tłoczącą, drążonych przez PRG Gliwice. Jak wynika z przedstawionego rysunku, wzrost głębokości położenia wyrobiska powoduje przyrost wilgotności właściwej powietrza wzdłuż osi wyrobiska. Duży wpływ na przedstawiony przebieg zmian Δx ma sprawność lutniociągu. Gdy sprawność lutniociągu maleje, obserwuje się zmniejszenie Δx lub zmniejszenie wilgotności właściwej powietrza płynącego w wyrobisku.

Mimo tak zróżnicowanego charakteru zmian wilgotności właściwej powietrza płynącego w wyrobiskach górniczych w pracy [14] zaleca się obliczać przyrost wilgotności ze wzoru:

$$\frac{dx}{ds} = \frac{D_w q_w}{V}(W_o - x) + \frac{B_w \sigma}{m}(A + BT - x) , \qquad (3)$$

gdzie:

W_o - wilgotność pierwotna górotworu, kg/kg,

s - długość wyrobiska, m,

m - strumień masy powietrza, kg/s,

σ - dynamiczny współczynnik przejmowania wilgoci, kg/ms,

x' - wilgotność właściwa powietrza, kg/kg,

D_w - współczynnik dyfuzji wilgoci, m^2/s,

q'_w - bezwymiarowy strumień wilgoci dopływający z górotworu,

V - strumień objętości powietrza, m^3/s,

B_w - obwód wyrobiska pokryty wodą, m,

T - temperatura powietrza, K,

A,B - współczynniki empiryczne.

Podana zależność (3) jak dotychczas nie została efektywnie rozwiązana.

Przy rozwiązaniu równania różniczkowego bilansu wilgoci w otaczającym wyrobisko górotworze w postaci [11, 14]:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = D_w\left[\frac{\partial^2 W(r,\tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial W(r,\tau)}{\partial r}\right], \tag{4}$$

założono warunek brzegowy trzeciego rodzaju

$$\varrho_s D_w\left[\frac{\partial W(r,\tau)}{\partial r}\right]_{r_o} = \sigma(x_n - x), \tag{5}$$

gdzie:

τ - czas przewietrzania wyrobiska, s,

r - promień, m

ϱ_s - gęstość otaczającego górotworu, kg/m^3,

x_n - wilgotność właściwa powietrza o temperaturze T, kg/kg.

Zastosowanie symetrii radialnej wokół wyrobiska, jak to ma miejsce w równaniu (4), może prowadzić do błędu wynikającego z warstwowej budowy górotworu. Wyrobiska najczęściej prowadzone są równolegle do uławicenia pokładów węgla i warstw skalnych, węgiel i skały płonne cechują się różną wilgotnością pierwotną. Także przepływ wilgoci odbywa się znacznie szybciej wzdłuż uławicenia skał w stosunku do przepływu wilgoci poprzecznie do uławicenia.

Natomiast zastosowanie warunku brzegowego (5) do rozwiązania równania (4) jest słuszne dla wyrobisk poziomych. Dla wyrobisk pionowych i nachy-

lonych mogą wystąpić błędy, których przyczyną jest zmiana ciśnienia powietrza atmosferycznego, od którego zależy wilgotność właściwa powietrza x (patrz równanie 1). Jeżeli w wyrobisku następuje zmiana ciśnienia statycznego powietrza wynikająca ze zmiany wysokości położenia wyrobiska o 1000 m, to zmiana wilgotności właściwej powietrza wyniesie 1,4 g/kg. Wynik ten uzyskano dla temperatury $t_s = t_w = 20^oC$ oraz wilgotności powietrza na powierzchni $x_1 = 15$ g/kg, wzrost głębokości spowoduje spadek wilgotności do 13,6 g/kg. Uzyskana zmiana wilgotności właściwej powietrza jest porównywalna ze zmianą wilgotności powietrza wynikającą z procesu parowania wody w szybie.

W pracach [5, 7, 11] zamiast różnicy wilgotności właściwej powietrza w warstwie granicznej stosuje się potencjały wilgotności wyprowadzone w pracy Łykowa [9]. W pracach tych wykorzystuje się podobieństwo zjawisk wymiany ciepła i masy. Ich praktyczna użyteczność zależy od znajomości stosowanych współczynników charakteryzujących ruch wilgoci w górotworze i z powierzchni górotworu.

W pracach [6, 10, 12, 13] prognozę wilgotności powietrza w wyrobiskach górniczych wykonuje się w stanie ustalonym przy wykorzystaniu równania Stefana:

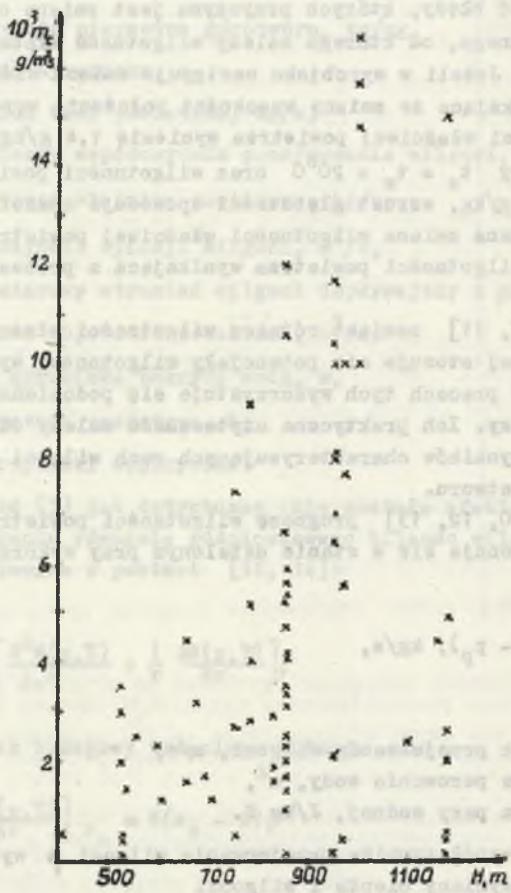
$$m_w = \frac{\beta A}{R_p T}(p_n - p_p), \text{ kg/s}, \tag{6}$$

gdzie:

β - współczynnik przejmowania wilgoci, m/s,
A - powierzchnia parowania wody, m^2,
R_p - stała gazowa pary wodnej, J/kg K.

Przy określaniu współczynnika przejmowania wilgoci β wykorzystuje się także analogię wymiany ciepła i wilgoci.

W celu wykazania, że w prognozie wilgotności powietrza kopalnianego korzystniej jest operować różnicą ciśnień pary wodnej zamiast różnicą wilgotności właściwej Δx lub różnicą wilgotności względnej $\Delta\varphi$, sporządzono wykres 4, na którym pokazano, jak kształtuje się strumień wilgoci dla przypadków pokazanych na rys. 1 i 3. Z przedstawionego rysunku 4 wynika, że wzrost głębokości położenia wyrobiska powoduje wzrost strumienia pary wodnej nawilżającej powietrze oraz że we wszystkich analizowanych wyrobiskach następuje nawilżenie powietrza, mimo że stwierdzono w niektórych z nich spadek wilgotności (Δx, $\Delta\varphi$). Świadczy to o ograniczonym zastosowaniu warunku brzegowego (5) oraz metody prognozy warunków klimatycznych operujących różnicą wilgotności względnej powietrza $\Delta\varphi$.



Rys. 4. Wpływ głębokości położenia wyrobiska na wartość strumienia pary wodnej nawilżającej powietrze przy stosowaniu wentylacji odrębnej tłoczącej

Fig. 4. Effect of the depth of location of the excavation on the value of the stream of water vapour humidifying the air when using separate pressure fans

3. Metoda analityczna określenia wilgotności powietrza w wyrobisku górniczym

Obok temperatury powietrza, ciśnienie pary wodnej w powietrzu stanowi jego podstawowy parametr fizyczny. Ciśnienie pary wodnej w powietrzu nasyconym jest jedynie funkcją temperatury powietrza. Natomiast w powietrzu nienasyconym ciśnienie pary wodnej zależy od wilgotności i jego temperatury.

Równanie bilansu wilgoci dla przepływającego powietrza w wyrobisku ma postać:

$$\frac{dm_c}{ds} = \frac{dm_p}{ds} + \frac{dm_g}{ds}, \tag{7}$$

gdzie:

m_p - strumień wilgoci dopływającej do powietrza z dodatkowych źródeł wilgoci zlokalizowanych w wyrobisku i parującej z wilgotnej powierzchni wyrobiska, kg/s m^2,

m_g - strumień wilgoci dopływającej do powietrza z górotworu, kg/s m^2.

Przyjmując, że siłę napędową ruchu pary wodnej w powietrzu i w górotworze stanowi różnica ciśnienia, analogicznie do równania (3), równanie ruchu wilgoci w wyrobisku przyjmie postać:

$$\frac{dp}{ds} = \frac{B_s\beta_g}{V}(p_g - p) + \frac{B_s\beta_p}{V}(p_n - p_1), \tag{8}$$

gdzie:

B_s - obwód wyrobiska, m,

β_g - współczynnik przejmowania wilgoci w górotworze, m/s,

p_g - ciśnienie pary wodnej w górotworze, Pa,

β_p - współczynnik przejmowania wilgoci z powierzchni wyrobiska, m/s,

p - ciśnienie pary wodnej w powietrzu, Pa,

p_1 - ciśnienie pary wodnej w powietrzu wlotowym, Pa.

Wprowadzając bezwymiarowy kompleks liczb

$$F = \frac{B_s s\beta_g}{V}, \tag{9}$$

po scałkowaniu równania (8) w przedziale od p_1 do p_2 oraz od 0 do s otrzymamy:

$$p_2 = p_1 e^{-F} + (1 - e^{-F})\left[p_g + \frac{\beta_p}{\beta_g}(p_n - p_1)\right], \text{ Pa.} \tag{10}$$

Z równania (10) wynika, że dla obliczenia ciśnienia pary wodnej na końcu wyrobiska konieczna jest znajomość:

- ciśnienie pary wodnej w powietrzu wlotowym do wyrobiska i w górotworze,
- współczynników przejmowania wilgoci w górotworze i na granicy górotwór-powietrze,

- wymiarów geometrycznych wyrobiska,
- strumienia objętości powietrza.

Istotny wpływ na poprawność uzyskanych wyników prognozy wilgotności powietrza ma dokładność stosowanych współczynników przejmowania wilgoci β_g i β_p. Ponieważ zdaniem autora stosowany współczynnik przejmowania wilgoci β_p jak przy wyuianie ciepła budzi poważne zastrzeżenia ze względu na ograniczoną dokładność określenia powierzchni wilgotnej wyrobiska, w związku z tym wskazane jest wykonanie odpowiednich pomiarów i określenie jego faktycznej wartości.

Jak wynika z literatury [1, 3, 5, 6, 7, 11, 12, 14, 16], współczynnik przejmowania wilgoci w górotworze jest funkcją między innymi:

$$\beta_g = f(\tau, d, H, \varrho_s, \varrho_w, \lambda_s, a_s, \sigma_s, D_w, \alpha), \tag{11}$$

gdzie:

d - średnica ekwiwalentna przekroju wyrobiska, m,

H - głębokość zalegania wyrobiska, m,

ϱ_s - gęstość skał zalegających nad wyrobiskiem, kg/m^3,

ϱ_w - zawartość wilgoci w górotworze, kg/m^3,

λ_s - współczynnik przewodzenia ciepła w górotworze, W/m K,

a_s - współczynnik wyrównywania temperatury w górotworze, m^2/s,

σ_s - współczynnik wytrzymałości mechanicznej skał na ściskanie, N/m^2,

α - współczynnik wnikania ciepła między powierzchnią górotworu a przepływającym powietrzem, W/m^2 K.

Stosując teorię podobieństwa można równanie (11) napisać w postaci [3, 9, 11]

$$Sh_g = k_1 Fo^a Bi^b R^c W^l , \tag{12}$$

gdzie:

$Sh_g = \frac{\beta_g d}{D_w}$ - liczba Sherwooda dotycząca ruchu pary wodnej w górotworze,

$Fo = \frac{a_s \tau}{r^2}$ - liczba Fouriera,

$Bi = \frac{\alpha d}{\lambda_s}$ - liczba Biota,

$R = \frac{H \varrho_s g}{\sigma_s}$ - liczba charakteryzująca własności mechaniczne górotworu,

g - przyspieszenie ziemskie, m/s^2

$W = \frac{\varrho_w}{\varrho_s}$ - wilgotność właściwa górotworu.

Natomiast współczynnik przejmowania wilgoci z powierzchni górotworu do powietrza, przy zastosowaniu tej samej metody, można określić z zależności [3, 9, 11]:

$$Sh_p = k_2 \, Re^f Gu^h \eta^i Fo^j, \tag{13}$$

gdzie:

$Sh_p = \frac{\beta_p d}{D_w}$ - liczba Sherwooda dotycząca dyfuzji pary wodnej w powietrzu,

$Re = \frac{wd}{\nu}$ - liczba Reynoldsa,

w - prędkość powietrza w wyrobisku, m/s,

ν - współczynnik lepkości kinematycznej powietrza, m^2/s,

$Gu = \frac{t_s - t_w}{t_s + 273}$ - liczba Guchmana,

t_w - temperatura powietrza mierzona termometrem wilgotnym, ^oC,

$\eta = \frac{V_k}{V_p}$ - sprawność lutniociągu,

V_k - strumień objętości powietrza na końcu wyrobiska (lutniociągu), m^3/s,

V_p - strumień objętości powietrza na początku wyrobiska (lutniociągu) m^3/s.

Aby wyznaczyć wykładniki (a, b, c, f, h, i, j, l) oraz współczynniki k_1, k_2, należy wykonać odpowiednie pomiary (w, d, s, B_s), wyznaczyć (ϱ_s, ϱ_w, λ_s, $_s$, a_s, H, p_1, α, p_n, p_g, τ, η), a następnie wykonać obliczenia celem uzyskania wartości Sh_g i Sh_p.

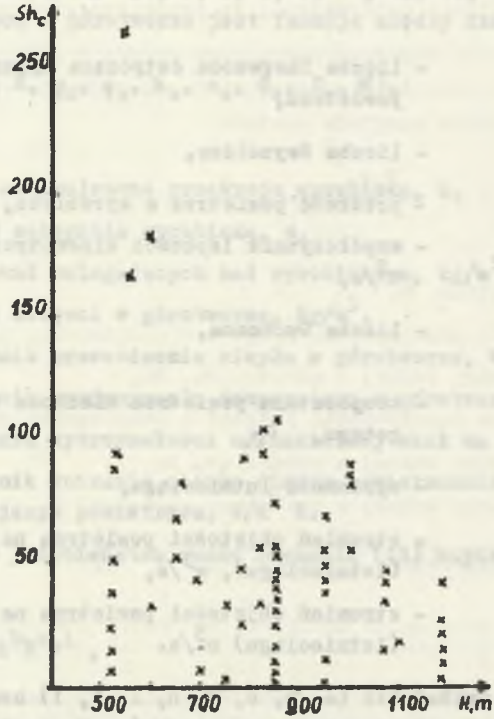
Na rys. 5 pokazano wpływ głębokości położenia wyrobiska na wartość liczby Sh_c będącej sumą liczb Sh_g i Sh_p. Z przedstawionego rysunku wynika, że wzrost głębokości położenia wyrobiska (zwłaszcza wzrost temperatury pierwotnej górotworu) powoduje zmniejszenie wartości liczby Sh_c. Dla wyrobisk udostępniających, drążonych przez PRG Gliwice w latach 1983-84 (77 przypadków), autor uzyskał następujące zależności na określenie liczb Sh_g i Sh_p:

$$Sh_g = 6\ Fo^{-0,3} R^{-0,7} Bi^{-0,4} W^{-0,3} \tag{14}$$

$$Sh_p = 12\ 000\ Re^{-0,8} Gu^{-0,5} Fo^{-0,2} \eta^{-0,6}, \tag{15}$$

oraz liczby bezwymiarowej

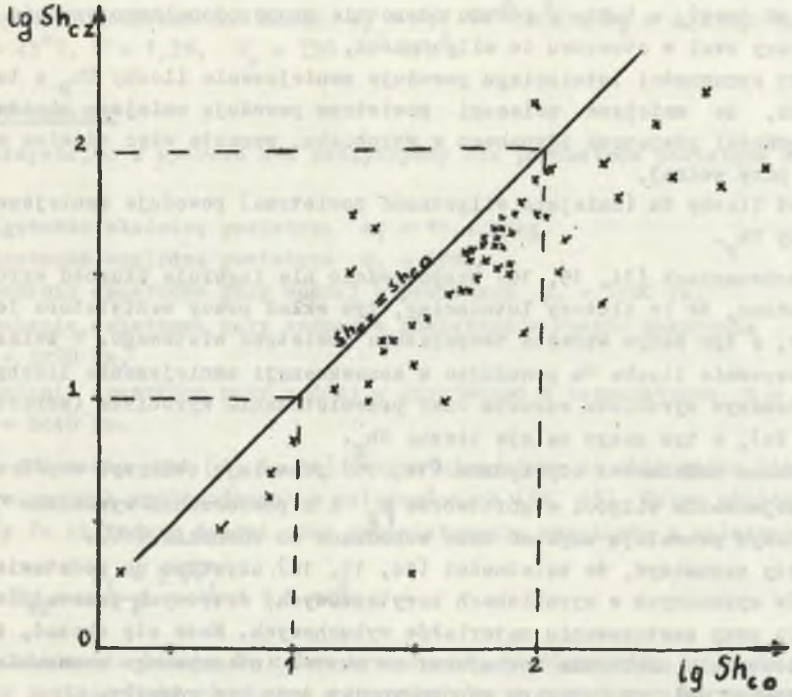
$$F = 0,15 + \frac{0,2\ B_{si} \beta_g\ s}{v}, \tag{16}$$



Rys. 5. Wpływ głębokości położenia wyrobiska na wartość liczby Sh_c przy stosowaniu wentylacji tłoczącej

Fig. 5. Effect of the depth location of the excavation on the value of the number Sh_c when using pressure fans

Na rys. 6 przedstawiono zależność między wartościami liczb Sh_c: uzyskaną z pomiarów Sh_{cz} i Sh_{co} uzyskaną z obliczeń (wzory 14 i 15). Z przedstawionego rysunku wynika, że uzyskano dość dobrą korelację między Sh_{cz} i Sh_{co}.



Rys. 6. Zależność między wartością liczby Sh_{cz} uzyskaną z pomiarów a wartością liczby Sh_{co} uzyskaną z obliczeń

Fig. 6. Dependence between the value of the number Sh_{cz} obtained from the measurements and the value of the number Sh_{co} obtained from the calculations

Z uzyskanych zależności empirycznych (14 i 15) wynika:

- wzrost czasu przewietrzania wyrobiska powoduje zmniejszenie liczb Sh_g i Sh_p, innymi słowy wyrobisko zostaje wysuszone,
- wzrost głębokości położenia wyrobiska powoduje zmniejszenie liczby Sh_g (wynika to także z rys. 5),
- wzrost prędkości powietrza (wzrost liczb Re i Bi) powoduje zmniejszenie liczby Sh_p, a więc zachodzi odwrotna zależność niż przy wymianie ciepła. Przyczyna tego stanu tkwi w tym, że wzrost prędkości powietrza w lutniociągu związany jest z dodatkowym wkładem ciepła (zużyciem energii) przez wentylator. Wzrasta temperatura powietrza płynącego w lutniociągu, a wraz z nią różnica ciśnień cząstkowych pary wodnej w powietrzu nasyconym i w warstwie granicznej;
- wzrost wilgotności górotworu także powoduje spadek liczby Sh_g z powodu wzrostu ciśnienia cząstkowego pary wodnej w górotworze (wzrasta różnica

ciśnień pary), a także z powodu odwrotnie proporcjonalnego wzrostu temperatury skał w stosunku do wilgotności,
- wzrost sprawności lutniociągu powoduje zmniejszenie liczby Sh_p z tego powodu, że mniejsze ucieczki powietrza powodują mniejsze obniżenie wilgotności powietrza płynącego w wyrobisku, wzrasta więc różnica ciśnień pary wodnej,
- wzrost liczby Gu (mniejsza wilgotność powietrza) powoduje zmniejszenie liczby Sh_p.

W porównaniach (14, 15, 16) bezpośrednio nie ingeruje długość wyrobiska, ale wiadomo, że im dłuższy lutniociąg, tym wkład pracy wentylatora jest większy, a tym samym wzrasta temperatura powietrza wlotowego. W związku z tym wzrośnie liczba Gu powodując w konsekwencji zmniejszenie liczby Sh_p. Przy dłuższym wyrobisku wzrasta czas przewietrzania wyrobiska (wzrasta liczba Fo), a tym samym maleje liczba Sh_g.

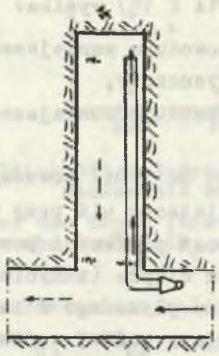
Uzyskane zależności empiryczne (14, 15) pozwalają obliczyć współczynnik przejmowania wilgoci w górotworze β_g i z powierzchni wyrobiska β_p, a tym samym pozwalają uzyskać dane wchodzące do równania (10).

Należy zaznaczyć, że zależności (14, 15, 16) uzyskano na podstawie 77 pomiarów wykonanych w wyrobiskach korytarzowych, drążonych przeważnie w kamieniu przy zastosowaniu materiałów wybuchowych. Może się okazać, że przy stosowaniu urabiania kombajnami na skutek intensywnego zraszania wodą urabianej calizny uzyskane współczynniki będą się różniły.

4. Przykład

Obliczyć przyrost wilgotności powietrza w wyrobisku przewietrzanym wentylacją odrębną tłoczącą (rys. 7 między punktami 2 i 3) mając dane:

- parametry powietrza wlotowego: $t_{s1} = 20^oC$, $t_{w1} = 18^oC$, $p = 1075$ hPa, $V_{p1} = 6\ m^3/s$,
- wymiary geometryczne wyrobiska: $s = 1000$ m, $B_s = 12$ m, $a = 11{,}5\ m^2$, $H = 1000$ m,
- średnica lutniociągu $d_l = 0{,}8$ m, sprawność $\eta = 0{,}5$,
- okres przewietrzania wyrobiska od momentu rozpoczęcia drążenia $\tau_p = 12$ miesięcy,



Rys. 7. Szkic wyrobiska przewietrzanego wentylacją odrębną tłoczącą

Fig. 7. Draft of the excavation ventilated by separate pressure fans

- własności geotermiczne skał: $a_s = 1,2\ 10^{-6}\ m^2/s$, $\lambda_s = 2,9\ W/m\ K$, $\vartheta = 43^oC$, $W = 1,3\%$, $\sigma_s = 730\ 10^5\ N/m^2$.

Rozwiązanie

Korzystając z wykresu h-x odczytujemy dla parametrów powietrza wlotowego:

- wilgotność właściwą powietrza $x_1 = 11,4\ g/kg$,
- wilgotność względną powietrza $\varphi_1 = 83\%$,
- ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu $p_1 = 1800\ Pa$,
- ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu w stanie nasycenia $p_n = 2200\ Pa$,
- ciśnienie cząstkowe pary wodnej w górotworze o temperaturze $t = 43^oC$, $p_g = 8440\ Pa$.

Na podstawie prac [2, 4, 16] przygotujemy dane do obliczenia liczb bezwymiarowych występujących w zależnościach (14, 15). Celem obliczenia liczby Fo obliczamy średni czas przewietrzania wyrobiska z zależności:

$$\tau_{śr} = \frac{\tau_1 + 2\sqrt{\tau_1}}{4} = 9,5\ 10^6 s,$$

Przy obliczaniu liczby Bi celem wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła między powierzchnią górotworu a przepływającym powietrzem korzystamy z zależności:

$$\alpha = 8,6\ \frac{w^{0,9}}{d^{0,1}} = 2,5\ W/m^2\ K,$$

Przy obliczaniu liczby Re prędkość powietrza w wyrobisku obliczamy z zależności:

$$w = \frac{V_p + V_k}{2A} = 0,37\ m/s$$

Następnie stosując zależności (14, 15, 9) obliczamy:

$$Sh_g = 6\left(\frac{1,2\cdot 10^{-6}\ 9,5\ 10^6}{1,9^2}\right)^{-0,3}\left(\frac{1000\cdot 2,4\cdot 1000\ 10}{730\cdot 10^5}\right)^{-0,7}\left(\frac{2,5\cdot 3}{2,9}\right)^{-0,4}(0,013)^{-0,3} = 23,7,$$

$$Sh_p = 12000\left(\frac{0,37\ 3,8}{16\ 10^{-6}}\right)^{-0,8}\left(\frac{20-18}{20+273}\right)^{-0,5}(3,2)^{-0,2}(0,5)^{-0,6} = 20,5,$$

$$F = 0,15 + \frac{0,2\ 1000\ 23,7\ 3,14\ 2,2}{4,5} = 0,22.$$

Ciśnienie pary wodnej na końcu wyrobiska zgodnie z zależnością (10) wyniesie:

$$p_2 = 1800\ e^{-0,22} + (1-e^{-0,22})[8440 + \frac{20,5}{23,7}(2200-1800)] = 3190\ \text{Pa}.$$

Z wykresu h-x odczytujemy dla ciśnienia pary wodnej $p_2 = 3190$ Pa i temperatury odpowiadającej temu ciśnieniu $t_s = t_w = 29^{\circ}C$ wilgotność właściwą powietrza $x = 20,5$ g/kg. Mając wykonaną prognozę temperatury powietrza, można dla otrzymanego ciśnienia odczytać wilgotność względną powietrza (temperaturę wilgotną).

Uzyskany przyrost wilgotności właściwej powietrza $\Delta x = 9,1$ g/kg w wyrobisku długości 1000 m, drążonym w skałach o temperaturze $43^{\circ}C$, znakomicie koreluje z wynikami pomiarów uzyskanymi w wyrobiskach drążonych na poziomie 950 m w KWK Sośnica i na poziomie 1000 m w KWK Zabrze-Bielszowice.

5. Zakończenie

Prognoza wilgotności powietrza w wyrobiskach górniczych przewietrzanych wentylacją odrębną tłoczącą jest zagadnieniem złożonym i trudnym. Mimo to autor wykorzystując zdobyte doświadczenia teoretyczne i praktyczne, analogicznie do stosowanych metod prognozy temperatury powietrza uzyskał równanie służące do obliczenia ciśnienia cząstkowego pary wodnej w powietrzu na końcu wyrobiska. Następnie wykorzystując wyniki pomiarów wentylacyjnych wykonanych w drążonych wyrobiskach kamiennych i kamienno-węglowych oraz dane dotyczące wymiarów geometrycznych wyrobisk i własności fizyko-termicznych skał zalegających wokół wyrobiska [1], uzyskał empiryczne wartości współczynników przejmowania wilgoci w górotworze i na granicy górotwór - powietrze. Przeprowadzona analiza kształtowania się tych współczynników jako funkcji liczb Re, Gu, Bi, R, Fo, W, η wykazała, że nie zawsze analogia wymiany ciepła i wilgoci jest potwierdzana w złożonych warunkach górniczych. Wyniki badań potwierdziły istotny wpływ liczby charakteryzującej własności mechaniczne skał na ruch wilgoci w nich. Liczba bezwymiarowa R zastosowana przez autora po raz pierwszy w pracy [3] tutaj znalazła potwierdzenia w sposób dobitny.

Przyjęty model ruchu wilgoci w wyrobisku powinien spełnić oczekiwanie inżynierów wentylacji w zakresie prognozy i regulacji warunków klimatycznych w wyrobiskach przewietrzanych wentylacją odrębną tłoczącą. Oczywiście pełną prognozę temperatury powietrza uzyska się korzystając z prac [4, 5, 11, 16].

LITERATURA

[1] Chmura K.: Własności fizykotermiczne skał niektórych polskich zagłębi górniczych. Wyd. "Śląsk", Katowice 1970.

[2] Frączek R.: Wpływ pracy urządzeń energomechanicznych na warunki klimatyczne w przodkach wyrobisk korytarzowych przewietrzanych przy stosowaniu wentylacji odrębnej. Przegląd Górniczy. Nr 4, 1984.

[3] Frączek R.: Proces nawilżania powietrza w wyrobiskach górniczych w świetle rozważań teoretycznych i obserwacji w kopalniach. ZN Politechniki Śląskiej, Gliwice 1979.

[4] Frycz A.: Klimatyzacja kopalń. Wyd. "Śląsk", Katowice 1981.

[5] Holek S.: Metoda prognozowania temperatury i wilgotności powietrza w wyrobiskach górniczych z uwzględnieniem przestrzennej i czasowej zmienności czynników. Konf. MBGFC, Katowice 1980.

[6] Kempf E.: Ein neues Verfahren zur Berechnung der Wettertemperatur in sonderbewetterten Grubenbauen. Bergakademie. H. 2. Februer 1969.

[7] Knechtel J.: Metoda prognozowania temperatury i wilgotności powietrza w wyrobiskach rozgałęzionych z lutniociągami nierozgałęzionymi. Przegląd Górniczy Nr 2, 1984.

[8] Kriworuczko A.M.: Rol gornowo massiwa w izmienieni właźnosti wozducha z wyrabotkach głubokich szacht. Izdat. Don UGI, Donieck 1963.

[9] Łykow A.W.: Tiepło i massoobmien w procesach suszki. Gosenenergoizdat, Moskwa, Leningrad 1956.

[10] Mucke G.: Die Wärmeleitfahikeit von Karbongesteinen und ihr Einfluss auf das Grubenklima. Berbau-Archiv. 25. H1/2. 1964.

[11] Szczerbań A.N. i inni: Rukowodstwo po rieguliroważju tiepłowowo rieżima szacht Izdat. "Niedra", Moskwa 1977.

[12] Voss J.: Beitreg zur vorausberechnung der Erwärmung und der Wasserdampfaufnahme der Wetter in Steinkohlenbergwerken. Glückauf-Forszch. H. 4. 1965.

[13] Voss J.: Ein neus Verfahren zur Klimavorausberechnung in Steinkohlenbergwerken Glückauf-Forszch. H. 6. 1969.

[14] Wacławik J.: Prognoza warunków klimatycznych z uwzględnieniem wpływu wilgoci, ZN AGH nr 33, Kraków 1971.

[15] Wieliczko A.N. i inni: Mietodika prognozirowanija tiempieraturnych usłowii w głubokich ugolnych szachtach. Tiepłofizyczieskije processy w podziemnych sooruźienijach. Izdat. "Naukowaja-Dumka". Kijew 1980.

[16] Woropajew A.F.: Tiepłowoje kondicionirowanije rudnicznogo wozducha w głubokich szachtach. Izdat. "Niedra", Moskwa 1979.

Recenzent: Doc. dr hab. Andrzej Olajossy

Wpłynęło do Redakcji w październiku 1984 r.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ С ВЫДЕЛЕННОЙ НАГНЕТАЮЩЕЙ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ

Р е з ю м е

В работе дан анализ методов прогнозирования влажности воздуха в горных выработках. На основании проведённых вентиляционных измерений в 77 корридорных выработках с выделенной нагнетающей вентиляцией, находящейся на глубине до 1240 м, указана неточность анализируемых методов. Предполагая, что движение влажности между горообразованием и воздухом является эффектом разницы парциальных давлений воды в граничном слое (p, p_n, p_g) а кроме этого суммарный поток влажности (m_c) есть водянной пар образующийся из горообразования (m_g) и из поверхности выработки (m_p) написаны уравнения движения влажности в выработке.

Используя сходность явлений движения влажности и тепла, предложены зависимости для расчётов коэффициентов движения влажности в горообразовании и с поверхности выработки (β_p). Используя результаты вентиляционных измерений, эмпирически установлена величина чисел Шервуда Sh_g i Sh_p и безразмерного числа F.

Анализ полученных зависимостей показал, что существенное влияние на движение влажности в горообразовании имеют не только параметры входящие в состав чисел F_o, β_i, W, но и безразмерное число R учитывающее статическое давление, присущее горообразованию в окрестности выработки.

Принятая модель движения влажности в горообразовании и в выработке а также получение эмпирические зависимости, дают возможность с большей точностью прогнозировать давление водянного пара в воздухе вентилируемой корридорной выработки с выделенной нагнетающей вентиляцией.

AN ANALYTICAL METHOD OF PROGNOSTICATING AIR HUMIDITY IN MINING EXCAVATIONS VENTILATED BY SEPARATE PRESSURE FANS

S u m m a r y

An analysis of the method of prognosticating air humidity in mining excavations has been carried out. On the basis of the conducted ventilation measurements in 77 dog headings ventilated by separate pressure fans, located at the depth up to 1240 m, it has been shown that the methods analyzed are not precise. Assuming that humidity motion between the rock mass and air is the result of the difference of partial pressures of water vapour in the boundary layer (p, p_n, p_g), and moreover, the total stream of humidity (m_c) humidyfying the air consists of water vapour from the rock mass (m_g) and the surface of the excavation (m_p), an equation of

humidity motion in the excavation has been written . Next, making use of the similarity of the phenomena of humidity motion and heat motion, the dependences have been determined to calculate the coefficients of humidity motion in the rock mass (β_g) and from the surface of the excavation (β_p). Making use of the ventilation measurements the values of Sherwood numbers Sh_g and Sh_p, and of nondimensional number F have been determined in an empirical way F.