

**ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ**

GÓRNICtwo

**Z. 98
GLIWICE
1979**

SPIS TREŚCI

	str.
SPIS WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	3
1. WSTĘP	5
2. METODY UJĘCIA PROCESU PAROWANIA WODY W METODACH PROGNOZOWANIA TEMPERATURY POWIETRZA W WYROBISKACH GÓRNICZYCH	7
3. RUCH WILGOCI W WYROBISKACH GÓRNICZYCH	16
3.1. Wyniki przeprowadzonych obserwacji zmian nawilżenia powietrza przewietrzającego wyrobiska górnicze	16
3.2. Źródła wilgoci w wyrobiskach górniczych	17
4. MECHANIZM WYMIANY WILGOCI W WYROBISKU GÓRNICZYM	21
4.1. Ruch ciepła i wilgoci w wyrobisku górniczym	21
4.2. Charakterystyka procesu parowania wody w wyrobisku górniczym	22
4.2.1. Parowanie wody rozpylonej w powietrzu	22
4.2.2. Parowanie wody ze swobodnej powierzchni	24
4.2.3. Parowanie wody z powierzchni wyrobiska	27
4.2.4. Parowanie wody wewnątrz górotworu	28
5. EMPIRYCZNE WYZNACZENIE ZALEŻNOŚCI OPISUJĄCYCH PROCES NAWILŻENIA POWIETRZA W WYROBISKACH GÓRNICZYCH	37
5.1. Określenie czynników charakteryzujących proces nawilżania powietrza	37
5.2. Analiza danych pomiarowych z kopalń węgla kamiennego GZW	39
5.3. Przygotowanie danych pomiarowych do analizy procesu nawilżania powietrza	44
5.4. Analiza wpływu parametrów bezwymiarowych na proces nawilżania powietrza	47
5.4.1. Wpływ prędkości powietrza na wymianę wilgoci w wyrobiskach górniczych	47
5.4.2. Wpływ temperatury powietrza na wymianę wilgoci w wyrobiskach górniczych	49
5.4.3. Wpływ głębokości położenia wyrobiska na proces wymiany wilgoci	53
5.4.4. Wpływ temperatury górotworu na proces wymiany wilgoci w wyrobiskach górniczych	57
5.5. Wyznaczenie zależności opisujących proces parowania wody w wyrobiskach górniczych	61
5.6. Uwagi dotyczące współczynnika wnikania ciepła w wyrobiskach górniczych	65
6. ZAKOŃCZENIE	67
7. LITERATURA	69
8. DODATEK	75
STRESZCZENIA	87

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 598

RYSZARD FRĄCZEK

**PROCES NAWILŻANIA POWIETRZA
W WYROBISKACH GÓRNICZYCH
W ŚWIETLE ROZWAŻAŃ
TEORETYCZNYCH I OBSERWACJI
W KOPALNIACH**

PL ISSN 0372-9508

GLIWICE

1979

OPINIODAWCA

Prof. dr hab. inż. Józef Wacławik

REDAKTOR NACZELNY WYDAWNICTW UCZELNIANYCH
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Jan Bandrowski

REDAKTOR DZIAŁU

Mirosław Chudek

SEKRETARZ REDAKCJI

Wojciech Mikołajków

OPRACOWANIE REDAKCYJNE

Anna Błażkiewicz

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej
Gliwice, ul. Kujawska 2

Nakł. 160+85 Ark. wyd. 5,4 Ark. druk. 5,62 Papier offset. kl. V 70x100 80 g
Oddano do druku 18.01.1979 Podpis. do druku 12.02.1979 Druk ukończ. w marcu 1979
Zam 74/79 G-24 Cena zł 13,—

Skład, fotokopie, druk i oprawę
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

SPIS WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

A	- przekrój wyrobiska
B	- obwód wyrobiska
D	- współczynnik dyfuzji
D_w	- współczynnik dyfuzji wilgoci
H	- głębokość zalegania wyrobiska
R_p	- stała gazowa pary wodnej
T	- temperatura absolutna powietrza
V	- wydatek objętościowy powietrza
W	- wilgotność górotworu
e	- współczynnik wyrównywania temperatury skał
c	- współczynnik wymiany wilgoci
c_p	- ciepło właściwe powietrza
d	- średnica wyrobiska
ε	- przyspieszenie ziemskie
k	- współczynnik przewodzenia wilgoci
\dot{M}	- wydatek masowy powietrza
m, n, l	- współczynniki
p	- ciśnienie atmosferyczne
p_s, p_p	- ciśnienie pary wodnej
r	- ciepło parowania wody
r_o	- promień wyrobiska
s	- długość wyrobiska
t, t_s, t_w	- temperatura powietrza
q_k	- ciepło wymienione na drodze krzywoliniowej
q_p	- ciepło parowania wody
q_d	- ciepło wydzielone przez dodatkowe źródła
\dot{q}_s	- nieustalony strumień ciepła
w	- prędkość powietrza
x	- wilgotność właściwa powietrza (stopień nawilżenia)
ϑ	- temperatura pierwotna skał
α	- współczynnik przejmowania ciepła
β	- współczynnik przejmowania masy
Δx	- przyrost wilgotności właściwej
$\Delta \vartheta$	- przyrost wilgotności względnej
Δt	- przyrost temperatury powietrza
σ	- dynamiczny współczynnik dyfuzji pary wodnej
ε	- współczynnik wewnętrznego parowania

λ	- współczynnik przewodzenia ciepła
φ	- wilgotność względna
γ	- współczynnik lepkości dynamicznej
ν	- współczynnik lepkości kinematycznej
ρ	- gęstość właściwa powietrza
τ	- okres przewietrzania
Bi	- liczba Biota
Fo	- liczba Fouriera
Gu	- liczba Guchmana
Ki	- Liczba Kirpiczewa
K	- parametr temperaturowy
Nu	- liczba Nusselta
Nu'	- liczba Nusselta dotycząca wymiany masy
Pr	- liczba Prandtla
Re	- liczba Reynoldsa
Sc	- liczba Schmidta

1. WSTĘP

Przy rozwiązywaniu szeregu praktycznych zagadnień techniki górniczej w głębokich kopalniach, konieczna jest także znajomość procesu wymiany ciepła i masy między przepływającym w wyrobisku górniczym powietrzem a otoczeniem. W praktyce górniczej w zagadnieniach związanych z regulacją warunków klimatycznych w istniejących lub projektowanych wyrobiskach górniczych znalazło zastosowanie szereg metod prognozowania warunków klimatycznych. W stosowanych metodach prognozowania temperatury powietrza proces nawilżenia powietrza kopalnianego został różnorodnie opisany. Uzyskane wyniki obliczeń temperatury powietrza, w zależności od przeznaczenia wyrobiska, czasu jego przewietrzania czy głębokości, wykazywały znaczne odchylenie od wyników uzyskanych z pomiarów. Szczegółowa analiza środowiska, w jakiej realizuje się proces wymiany ciepła i masy, wskazuje na jego specyfikę w odniesieniu do warunków wymiany ciepła i masy, opisanych równaniami stosowanymi w inżynierii chemicznej czy w technice suszarniczej znajdujących także zastosowanie w metodach prognozowania. Na specyfikę tę nakłada się rezultat działalności człowieka związanej z wydobywaniem kopaliny oraz oddziaływanie naruszonego górotworu.

W wyrobisku górniczym zmienia się charakter przepływu powietrza, rozmieszczenie, ilość i jakość źródeł ciepła i wilgoci. Dotychczasowa ocena jakościowa i ilościowa tych źródeł nie zawsze w pełni odzwierciedla stan faktyczny, w związku z czym stawia znak zapytania nad wynikami prognozy stycznych temperatury powietrza.

Celem niniejszej pracy jest próba teoretycznego wyjaśnienia procesu nawilżenia powietrza kopalnianego, poprzez opisanie zjawisk zachodzących na granicy woda - powietrze, powietrze - górotwór oraz w górotworze oraz ustalenie zależności analitycznych ujmujących ten proces. Założony cel postenowiono rozwiązać drogą:

- określenia źródeł ciepła i wilgoci mających decydujący wpływ na proces nawilżenia powietrza,
- prowadzenia obserwacji i pomiarów w wyrobiskach górniczych celem określenia czynników warunkujących wymianę ciepła i masy,
- analitycznego ujęcia procesu wymiany wilgoci i ciepła.

Mając na uwadze obszerną literaturę omawiającą proces wymiany ciepła i masy w urządzeniach chemicznych, energetycznych i suszarniczych, zagadnienie to świadomie autor podał w formie skondensowanej, stosując wiele skrótów myślowych w celu poświęcenia większej uwagi warunkom klimatycznym pa-

nującym w wyrobiskach kopalń Zagłębia Górnośląskiego. Uwaga ta także dotyczy sposobu opracowania danych pomiarowych, który szerzej był potraktowany przez autora w pracy doktorskiej. Uważam, że powyższe mankamenty nie będą stanowić podstawowej przeszkody dla czytającego.

Autor wyraża głęboką wdzięczność prof. dr hab. inż. J. Wacławikowi z Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie za cenne wskazówki przy recenzji rękopisu niniejszej pracy.

2. METODY UJĘCIA PROCESU PAROWANIA WODY
W METODACH PROGNOZOWANIA TEMPERATURY POWIETRZA W WYROBISKACH GÓRNICZYCH

Metody obliczenia zmian temperatury powietrza w wyrobiskach górniczych są rozwijane od kilkudziesięciu lat. Pierwsze prace były adaptacją rezultatów z innych dziedzin techniki i opierały się jedynie na prawie zachowania energii i teorii ruchu ciepła. Podjęcie eksploatacji rud złota, miedzi czy węgla na dużych głębokościach (do 3000 m), spowodowało zapotrzebowanie na dokładną metodę prognozowania warunków klimatycznych w projektowanych wyrobiskach. W latach pięćdziesiątych naszego stulecia powstało szereg metod prognozowania temperatury powietrza kopalnianego. Na uwagę zasługują prace: Kremniewa [42, 83, 84], de Braefa [8], Szczerbenia [84], Königa [40], Betzele [3], Boldizsara [4, 5]. W metodach tych przyjęto cztery założenia stanowiące podstawę do ustalenia warunków granicznych:

- Temperatura pierwotna skał w osi wyrobiska wynosi:

$$t = t_0 + \sigma_s \frac{dz}{ds} \quad (2.1)$$

gdzie:

- t - temperatura pierwotna skał,
- t_0 - temperatura pierwotna skał na początku wyrobiska,
- σ - gradient geotermiczny skał,
- z - oś skierowana pionowo do góry,
- s - współrzędna bieżąca, mierzona wzdłuż osi wyrobiska.

- Na powierzchni wyrobiska zachodzi wymiana ciepła między górotworem a powietrzem, opisana przez prawa Fouriera i Newtona:

$$\lambda_B \left[\frac{\partial t(r_w, s, \tau)}{\partial r_w} \right]_{r_0} = \alpha [t(r_0, s, \tau) - t] \quad (2.2)$$

gdzie:

- λ_B - współczynnik przewodzenia ciepła przez górotwór,
- r_0 - promień hydrauliczny wyrobiska,
- τ - okres wychładzania górotworu,
- α - współczynnik przejmowania ciepła,
- r_w - promień wodzący współrzędnych cylindrycznych,
- t - temperatura powietrza.

- Temperatura powietrza (t) nie zależy od okresu przewietrzania wyrobiska.
- W nieskończonej odległości od wyrobiska na jego wysokości niwelacyjnej, temperatura skał jest niezmienna i równa jest temperaturze pierwotnej skał.

Założenia powyższe wraz z uproszczonymi równaniami energii i przewodzenia ciepła:

$$\frac{dt}{ds} = \frac{\dot{q}_s}{m c_p} + \frac{\dot{q}_a}{m c_p} + \frac{g}{c_p} \frac{ds}{ds} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial^2 v(r_w, s, \tau)}{\partial \tau} = a \left[\frac{\partial^2 v(r_w, s, \tau)}{\partial r_w^2} + \frac{1}{r_w} \frac{\partial v(r_w, s, \tau)}{\partial r_w} \right] \quad (2.4)$$

pozwołyły rozwiązać równanie dotyczące zmian temperatury powietrza w wyrobisku pozbawionym wilgoci.

Zmienne niezależne równań (2.3) i (2.4) przyjmują wartości z przedziałów

$$r_0 \leq r_w \leq \infty, \quad 0 \leq \tau \leq \infty, \quad 0 \leq s \leq s_w$$

gdzie:

- \dot{q}_s - nieustalony strumień ciepła wymieniony między powietrzem a górotworem,
- m - wydatek masowy powietrza,
- c_p - ciepło właściwe powietrza przy stałym ciśnieniu,
- \dot{q}_a - strumień ciepła dopływający z dodatkowych źródeł ciepła,
- g - przyspieszenie ziemskie,
- a - współczynnik wyrównywania temperatury w górotworze.

Autorzy prac [3, 4, 58, 84, 91] przyjmują różniące się dodatkowo założenia upraszczające lub stosują różne, często przybliżone, metody rozwiązania podanych równań. Te właśnie okoliczności są powodem pewnych rozbieżności w uzyskiwanych wynikach końcowych, jak to wykazano w pracy [83].

Jednakże zbyt duże różnice wyników uzyskanych na drodze obliczeń i pomiarów spowodowały, że w dalszych pracach dotyczących wymiany ciepła między górotworem a przepływającym powietrzem uwzględniano proces nawilżenia powietrza. W pracach [4, 14, 84, 101] w bilansie ciepła zakładano, że cały przyrost wilgotności powietrza następuje kosztem ciepła niesionego przez powietrze. Boldizsar w pracach [4, 5] przyjął liniowy przyrost wilgotności właściwej powietrza wzdłuż wyrobiska, który spowoduje zmianę temperatury powietrza o wartość:

$$\Delta t = \frac{\Delta x \bar{v}}{\Delta r (F_0) s} \left[1 - \exp \frac{-\Delta r (F_0) s}{\bar{v} c_p} \right] \quad (2.5)$$

gdzie:

- Δx - zmiana wilgotności właściwej w danym wyrobisku,
- r - ciepło parowania wody,
- \dot{V} - wydatek objętościowy powietrza,
- c'_p - ciepło właściwe objętościowe przy stałym ciśnieniu,
- $f(F_0)$ - parametr bezwymiarowy zależny od liczby Fouriera.

W pracach Szczerbiana [83, 84] i Chochoławy [14, 15] przyjęto liniową zmianę wilgotności względnej powietrza przypadającą na jednostkę długości wyrobiska w postaci:

$$\varphi_n = \varphi_1 + f(s_1 + s_2 + \dots + s_n) \quad (2.6)$$

gdzie:

- φ_n - wilgotność względna na końcu danego wyrobiska,
- φ_1 - wilgotność względna na początku wyrobiska,

$f = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{s}$ - współczynnik zmiany wilgotności w wyrobku, %/m.

Wilgotność właściwą powietrza (x) dla danego wąskiego przedziału temperatur (np. 5-10 K) oblicza się z zależności liniowej lub kwadratowej:

$$x = (m + nt)\varphi$$

$$x = (m + nt + lt^2)\varphi \quad (2.7)$$

gdzie:

- m, n, l - współczynniki, które dla danych przedziałów temperatur powietrza i ciśnienia atmosferycznego podano w tablicach lub na wykresach.

W przypadku wyrobiska mocno zawilgoconego, współczynnik przejmowanie ciepła α powiększa się dodatkowo o ciepło pobrane w procesie parowania wody wg zależności:

$$\alpha_r = \alpha + \beta \left(\frac{P_s - P_p}{t_s - t_p} \right) r \quad (2.8)$$

$$\beta = 0,015 \frac{0,5_B 0,2}{A} \frac{273 + t_p}{p} \quad (2.9)$$

gdzie:

- β - współczynnik wymiany masy,
- P_s, P_p - ciśnienie pary wodnej odpowiednio w temperaturze ścianki wyrobiska i powietrza,
- t_s, t_p - temperatura powierzchni ścianki wyrobiska i powietrza,

\dot{m} - wydatek masowy powietrza,
 B - obwód wyrobiska,
 A - przekrój wyrobiska,
 p - ciśnienie atmosferyczne.

W przypadku gdy $\alpha > 33 \text{ W/m}^2\text{K}$, autorzy przyjmują $\alpha = \infty$. W pracy Woropajewa [101] wprowadzono tzw. ciepły współczynnik przejmowania wilgoci A_p , który określany jest przez stosunek:

$$A_p = \frac{q_k}{q_k + q_p} \quad (2.10)$$

gdzie:

q_k - ciepło pobrane na drodze konwekcji,
 q_p - ciepło pobrane w procesie parowania wody,

Współczynnik A_p może przyjmować wartości w przedziale $-\infty < A_p < \infty$ w zależności od rodzaju przemiany, jakiej podlega wilgotne powietrze w danym wyrobisku.

W pracy Hiromatsu i Amano [35] pogłębiono model wymiany ciepła w wyrobisku poprzez:

- wykorzystanie zachodzącego związku między współczynnikami wymiany ciepła i masy w postaci:

$$\beta = \frac{\alpha}{\rho_p \rho_p} \quad (2.11)$$

gdzie:

β - współczynnik wymiany masy, m/s ,
 ρ_p - gęstość właściwa powietrza, kg/m^3 ,

- podział powierzchni wyrobiska na część wilgotną i suchą, w wyniku czego ciepło pobrane w procesie parowania wyniesie:

$$\Delta Q = 2\pi r_0 s \gamma \alpha (x_p - x) \frac{1}{\rho_p} \quad (2.12)$$

gdzie:

$\gamma = \frac{A_w}{A}$ - współczynnik określający udział powierzchni wilgotnej do całej powierzchni,

- wykorzystanie zasady działania psychrometru (wymiany adiabaticznej ciepła i masy), celem obliczenia temperatury powierzchni ścianki wyrobiska, przyjmując $t_w = t_w$ w wyniku czego uzyskano:

$$Q_T = 2\pi r_0 s \gamma \alpha (t_w - t_s) \quad (2.13)$$

gdzie:

Q_r - ciepło oddane przez powierzchnię wilgotną,

t_m - średnia arytmetyczna temperatura powietrza w wyrobisku.

W pracach Vossa [92, 93, 95, 97] proces parowania wody zostaje zintensyfikowany poprzez wprowadzenie ekwiwalentnych współczynników: przewodzenia ciepła przez górotwór (λ_{ef}), wyrównywania temperatury (s_{ef}) i wnicania ciepła (α_{ef}). Autor zakłada, że proces parowania wody zachodzi na powierzchni wyrobiska zgodnie z zależnością:

$$q_p = \frac{A_r}{R_p T} (p_s - p) \quad (2.14)$$

gdzie:

R_p - stała gazowa pary wodnej,

T - temperatura absolutna powietrza.

Ekwiwalentne współczynniki przewodzenia i wnicania ciepła przyjmują wartości:

$$\lambda = \frac{q_k}{q_k + q_p} \lambda_{ef} = \lambda_p \lambda_{ef} \quad (2.15)$$

$$\alpha_{ef} = \frac{a}{\lambda_p} \quad (2.16)$$

W zależnościach (2.14) i (2.15) wykorzystano współczynnik wyprowadzony przez Woropajewa (2.10). W ten sposób uwzględniono zwiększony przepływ ciepła z górotworu. Poprzez podział wyrobiska na suchą i moką część, podobnie jak w pracy Hiromatsu i Amano [35], autor układa bilans ciepła osobno dla każdej z nich, korzystając z zależności Levisa (2.11).

Wymienione prace nie uwzględniają zjawisk związanych z ruchem wilgoci w górotworze. Większość z nich opiera się na założeniu, że cały przyrost wilgoci w powietrzu następuje kosztem ciepła niesionego przez powietrze.

Prace Wacławika [89, 90, 91] zawierają rozwiązanie równań różniczkowych bilansu wilgoci i ciepła w skałach wokół wyrobiska w postaci:

$$\frac{\partial W(r_w, \tau)}{\partial \tau} = D_w \left[\frac{\partial^2 W(r_w, \tau)}{\partial r_w^2} + \frac{1}{r_w} \frac{\partial W(r_w, \tau)}{\partial r_w} \right] \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial v(r_w, \tau)}{\partial \tau} = a \left[\frac{\partial^2 v(r_w, \tau)}{\partial r_w^2} + \frac{1}{r_w} \frac{\partial v(r_w, \tau)}{\partial r_w} \right] + \frac{c r \partial W(r_w, \tau)}{c_s \partial \tau} \quad (2.18)$$

gdzie:

W - wilgotność górotworu,

D_w - współczynnik dyfuzji wilgoci w skałach,

ε - współczynnik wynikający z kinetyki procesu zmiany stanu skupienia
tzw. kryterium wewnętrznego parowania,

c_s - ciepło właściwe skał.

Rozwiązanie uzyskano przy założeniach:

- wilgotność początkowa skał jest funkcją głębokości $W_0(r, H, 0) = W_0(H)$,
- na brzegu skał obowiązuje warunek

$$v(r_0, \tau) = t(s, \tau) \quad \text{i} \quad \varrho_s D_w \left(\frac{\partial W(r_w, \tau)}{\partial r_w} \right)_{r_0} = \Omega(x_n - x) \quad (2.19)$$

gdzie:

Ω - współczynnik przenoszenia wilgoci,

- wilgotność właściwa (x_n) w stanie nasycenia jest liniową funkcją temperatury powietrza w określonym przedziale wg zależności (2.7).

Określenie temperatury i wilgotności powietrza kopalnianego autor rozkłada na dwa etapy. Pierwszy - to rozwiązanie układu równań na średnią temperaturę i wilgotność oraz drugi etap to obliczenie sezonowych odchylek temperatury i wilgotności. Uzyskanie dobrych wyników obliczeń uzależnione jest, jak stwierdza autor [90], od właściwego rozpoznania zjawisk dotyczących:

- parowania wody w ośrodku porowatym w temperaturze 20-40°C i wyznaczenia funkcji $\varepsilon = \varepsilon(r_w,)$,
- zbadania zjawisk przejmowania ciepła i wilgoci w przypadku powierzchni chropowatych ośrodka porowatego.

W pracach Holka [11, 36] problem przenoszenia wilgoci w górotworze zostaje wzbogacony w wyniku wprowadzenia liczby Kirpiczewa dotyczącej ruchu wilgoci w górotworze. Zagęszczenie strumienia pary wodnej (\dot{m}_p) z powierzchni skał wyniesie:

$$\dot{m}_p = \beta \varrho_g (W_p - W_r) \frac{K_i}{B_i} \quad (2.20)$$

gdzie:

W_p - wilgotność pierwotna górotworu,

W_r - wilgotność równowagowa w powietrzu,

K_i - liczba Kirpiczewa jako funkcja liczb Fouriera i Biota, K_i (F_0, B_i).

W pracy Holka równania opisujące przyrost wilgotności i temperatury powietrza rozwiązuje się oddzielnie metodą iteracyjną. W najnowszych pracach Kremniewa [42, 83] problem przenoszenia ciepła i wilgoci w skałach został potraktowany w sposób kompleksowy. Dlatego też na równi z obliczaniem współczynnika wymiany ciepła został określony także współczynnik wy-

miany masy zależny od różnicy potencjału przenoszenia wilgoci między górotworem a powietrzem, równym jedności.

Przyjęto następujące przypadki przenoszenia wilgoci:

- strumień wilgoci nie zależy od różnicy temperatury między górotworem a powietrzem:

$$\text{gradient temperatury } \sigma = 0,$$

$$\text{kryterium fazowej przemiany } \varepsilon = 0,$$

$$Ku_{\tau} = Bi_c [(1+l-K_1)Ki_c + (\sigma+1)Ki_m + (K_1-\delta-1)Ki_2] \quad (2.21)$$

$$\mu_{\tau} = Bi_m Ki_m \quad (2.22)$$

- strumień przenoszonej wilgoci zależy od różnicy temperatur górotworu i powietrza, przenoszenie wilgoci odbywa się bez fazowej przemiany:

$$\sigma = 0, \quad \varepsilon = 0$$

$$Ku_{\tau} = Bi Ki_c \quad (2.23)$$

$$\mu_{\tau} = Bi_m [Ki_m - K(\psi-t)(1-Ki_m) - \frac{d(\psi-t)}{\theta_o - \theta_p} (1-Ki_c) - (d-k)(\psi-k)(1+K_3)] \quad (2.24)$$

gdzie

$$l = \frac{\beta x (1-\varepsilon) (\theta_o - \theta_p)}{\alpha (\psi-t)} \quad (2.25)$$

$$\sigma = \frac{ms(\theta_o - \theta_p)}{(1 - \frac{m}{n}) (\psi-t)} \quad (2.26)$$

$$K = \frac{a_n (d-\sigma)d}{\beta \lambda} \quad (2.27)$$

$$d = \frac{\sigma}{\frac{a_c}{a_m} - 1} \quad (2.28)$$

$$\beta' = \frac{p_2 - p_1}{\theta_o - \theta_p} \frac{\alpha D_n}{\lambda_p} \quad (2.29)$$

$$D_n = D_o \frac{\mu_m}{R_o R_o} \left(\frac{T}{T_o} \right)^2 \frac{p_o}{p_c} \quad (2.30)$$

$$m = \frac{rc'_t}{c} \quad (2.31)$$

$$Kl = \frac{Bi_m}{Bi_c} \quad (2.32)$$

- Ku_T - bezwymiarowy współczynnik nieustalonej wymiany ciepła,
- μ_T - bezwymiarowy współczynnik nieustalonej wymiany masy,
- Bi_c, Bi_m - liczby bezwymiarowe Biota dotyczące ruchu ciepła i wymiany wilgoci,
- Ki_c, Ki_m - liczby bezwymiarowe Kirpiczewa dotyczące ruchu ciepła i wymiany wilgoci,
- Kz - liczba bezwymiarowa zastępcza $Kz (Bi_c, Bi_m, Fo_c, K)$,
- Θ_o, Θ_p - potencjały wymiany masy $\Theta_o = 100$, Θ_p - określamy z wyrażenia $\varphi = 0,7 + 0,003\Theta$,
- a_m - współczynnik wyrównywania potencjału wilgoci,
- a_c - współczynnik wyrównywania temperatury,
- R_o - stała gazowa,
- p_2, p_1 - ciśnienie pary wodnej w powietrzu na końcu i początku wyrobiska,
- D_o - współczynnik dyfuzji pary wodnej w warunkach normalnych,
- c'_t - izotermiczna pojemność cieplna skał,
- T_o, T - temperatura absolutna powietrza w warunkach normalnych i w wyrobisku,
- ε - kryterium fazowej przemiany (dla ścian $0,5 < \varepsilon < 0,9$, dla wyrobisk przewietrzanych powyżej roku $0,1 < \varepsilon < 0,3$).

Współczynnik nieustalonej wymiany ciepła wyniesie:

$$k_T = Ku_T \frac{\lambda}{r_o} \quad (2.33)$$

Współczynnik nieustalonej wymiany masy wyniesie:

$$m_T = \mu_T \frac{m}{r_o} \quad (2.34)$$

gdzie:

r_o - promień wyrobiska.

Mając dane dotyczące (σ, a_m, c'_t) uzyskane na drodze badań laboratoryjnych można obliczyć temperaturę powietrza oraz potencjał wymiany wilgoci na końcu wyrobiska.

Podane metody w zasadzie obejmują wszystkie sposoby uwzględnienia wymiany wilgoci w wyrobiskach górniczych.

Jedną z nich np. Boldizsara może znaleźć zastosowanie przy obliczeniach wykonywanych dla kopalń suchych, inne zaś jak Wacławika czy Kremniowa dla kopalń wilgotnych. Ponadto metody Vosse, Holka, Wacławika wymagają zastosowania do obliczeń elektronicznych maszyn cyfrowych.

Dokładność wyników obliczeń poszczególnymi metodami jest uwarunkowana danymi wejściowymi. Dane dotyczące parametrów geometrycznych wyrobisk, dodatkowych źródeł ciepła czy własności termicznych skał cechuje dość duża dokładność. Natomiast dane ujmujące ruch wilgoci w górotworze a także w wyrobisku nie są zbyt dokładne, ze względu na trudność w określeniu:

- powierzchni zawilgocenia wyrobiska,
- współczynnika wyrównywania potencjału wilgoci,
- współczynnika fazowej przemiany,
- współczynnika przenikania ciepła,
- współczynnika wymiany masy.

Niektóre z powyższych wielkości są funkcją wielu zmiennych. Określenie ich napotyka wiele trudności, gdyż wymaga przeprowadzenia złożonych badań w warunkach naturalnych, co niejednokrotnie jest prawie niemożliwe. Dlatego w dalszej części pracy główna uwaga zostanie skupiona na określeniu czynników warunkujących zmianę podstawowych wielkości wchodzących do przedstawionych metod prognozowania temperatury powietrza ujmujących specyfikę środowiska górniczego.

Do podstawowych czynników poszukiwanych należy zaliczyć:

- przyrost wilgotności właściwej (Δx),
- przyrost wilgotności względnej ($\Delta \phi$),
- współczynnik przejmowania wilgoci (A_p),
- współczynnik wymiany masy (β).

3. RUCH WILGOCI W WYROBISKACH GÓRNICZYCH

3.1. Wyniki przeprowadzonych obserwacji zmian nawilżenia powietrza przewietrzającego wyrobiska górnicze

Problemem zmian wilgotności powietrza kopalnianego zajmowali się m.in. Batzel [3], Scott [80], Kriworuczko [46, 49, 50], Szczarbań i Kremniew [83, 84], Voss [96], Sharp [72], Ruben [53] i inni.

Poczynione obserwacje zmian wilgotności powietrza dotyczyły określenia wpływu następujących czynników:

- zewodnienia skał,
- głębokości zalegania,
- technologii urabiania,
- okresu przewietrzania.

W pracy Batzela [3] stwierdzono, że strumień wilgoci odparowujący z powierzchni otaczającego górotworu do powietrza w kopalniach głębokich może dochodzić do $15 \text{ g/m}^2\text{h}$.

Z pracy Scotta [80] wynika, że w kompletnie suchych wyrobiskach wykonanych w węglu strumień parującej wilgoci wynosi około $5 \text{ g/m}^2\text{h}$. Przeprowadzone obserwacje warunków klimatycznych przez Rubena i Sharpe [72] w trzech chodnikach na głębokości około 900 m wykazały zmianę strumienia wilgoci w czasie trwania wyrobisk. Wykonane pomiary wykazały duży wpływ wody technologicznej na nawilżenie powietrza. Autorzy podkreślają, że sugerowane wartości strumienia wilgoci podane przez Scotta i Batzela są zbyt wysokie. W pracy Vossa [96] podkreślono duży wpływ procesu urabiania węgla przez kombajn, w wyniku czego wzrasta wilgotność właściwa powietrza o 4 g/kg . Wiele prac poświęciło procesowi nawilżania powietrza Kriworuczko [45, 46, 37, 48, 49, 50]. Z prac tych wynika, że intensywność wydzielania wilgoci w Zagłębiu Donieckim wzrasta wraz z głębokością. Na poziomie 1000 m jest 1,7 razy większa niż na poziomie 750-780 m. Autor stwierdza, że największą wartość strumień wilgoci przyjmuje w wyrobisku eksploatacyjnym, np. w ścianach, gdzie $\beta_B = 31 - 89 \text{ g/m}^2\text{h}$.

W wyrobiskach transportowych $\beta_t = 1,8 - 9,6 \text{ g/m}^2\text{h}$, a więc średnio 9 razy mniej.

W pracy Kremniewa [35] proponuje się, by wartość współczynnika przejmowania masy β' przyjmować:

dla szybów $\beta' = 0,01 \text{ kg/m}^2\text{h mmHg}$,

dla wyrobisk głównych $\beta' = 0,015 \text{ mmHg}$

dla ścian $\beta' = 0,01-0,04 \text{ mmHg}$

lub określić z zależności:

$$\beta' = 0,015 \frac{\dot{m}^{0,8} B^{0,2}}{A} \frac{273 + t}{p} \quad (3.1)$$

gdzie:

- \dot{m} - wydatek masowy powietrza,
- B - obwód wyrobiska,
- A - przekrój wyrobiska,
- p - ciśnienie atmosferyczne.

Przeprowadzone przez autora pomiary w kopalniach węgla kamiennego Zagłębia Górnośląskiego wykazały, że łączny strumień wilgoci płynący z górotworu i z układu zraszania w wyrobiskach ścianowych wynosi $\beta=3-150 \text{ g/m}^2\text{h}$, w wyrobiskach chodnikowych $\beta=0,5-200 \text{ g/m}^2\text{h}$, w przekopach $\beta=0-250 \text{ g/m}^2\text{h}$.

Należy zaznaczyć, że wraz ze wzrostem głębokości zauważa się także wzrost strumienia wilgoci nawilżającej powietrze.

Podane przykłady świadczą o trudności w uchwyceniu funkcyjnym wielkości strumienia wilgoci płynącego z górotworu do powietrza.

3.2. Źródła wilgoci w wyrobiskach górniczych

- Występujące źródła wilgoci w wyrobiskach górniczych można podzielić na:
- naturalne - woda wydzielana przez otaczający górotwór i transportowany urobek,
 - sztuczne - woda dostarczana w procesie technologicznym (zraszanie, wtłaczanie wody do calizny, podsadzka hydrauliczna).

Udział poszczególnego źródła wody w nawilżaniu powietrza będzie różny w zależności od przeznaczenia wyrobiska, głębokości zalegania oraz okresu przewietrzania.

a) Górotwór jako źródło dopływu wody do wyrobiska

Dopływ wody z górotworu do wyrobiska nie jest wielkością stałą, lecz obserwuje się jej zmienność w zależności od czasu, wielkości i głębokości kopalni, sposobu kierowania stropem, metod urabiania. Woda może pochodzić z zasobów dynamicznych, tj. przesiąkania wód meteorycznych i powierzchniowych oraz z zasobów statycznych (głębinowe lub reliktowe), tj. wód nagromadzonych w naturalnych pustkach (porach i szczelinach) zawodnionych utworów lub w starych zrobach. Dopływ wody z zasobów dynamicznych ma charakter dość trwały, natomiast z zasobów statycznych cechuje stopniowy zanik związany z ich oszerpywaniem. Obserwacje dopływu wody w Zagłębiu Górnośląskim wykonane przez Wilka [98, 99] wskazują, że maksimum dopływu wody

mieści się na głębokości 150-200 m, a następnie wraz ze wzrostem głębokości dopływ wody maleje.

W złożach Zagłębia Górnośląskiego w przypadku prowadzenia eksploatacji na różnych poziomach eksploatacyjnych zauważa się, że główna masa wody przesącza się do dolnych poziomów eksploatacyjnych przez szczeliny powstałe na skutek załamania się stropu, a także przez szczeliny tektoniczne [24]. Obserwacje prowadzone przez Syrowatko [85] w Zagłębiu Donieckim potwierdziły, że zawodnienie zmienia się także z głębokością eksploatacji. Intensywny dopływ wód obserwuje się do głębokości 300 m; poniżej dopływ ten zmniejsza się aż do zaniku na głębokości 700-800 m.

Wg Malewanego [57] dopływ wody do wyrobisk Zagłębia Donieckiego opisuje równanie:

$$Q_w = a(H-50)^2 e^{-b(H-50)} \quad (3.2)$$

gdzie:

a, b - współczynniki wyznaczone empirycznie,

a = 0,007, b = 0,0057,

H - głębokość.

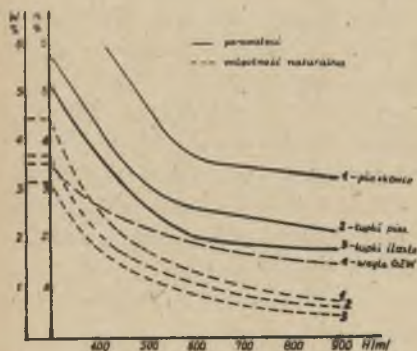
Z badań przeprowadzonych przez Holmsa [34] w kopalniach brytyjskich wynika, że wraz z głębokością dopływ wody do wyrobiska maleje, by na głębokościach 600-900 m zupełnie zaniknąć.

Przedstawione wyniki badań dopływu wody do wyrobisk górniczych wskazują, że na głębokościach 1000 m i poniżej dopływ wody z zasobów dynamicznych będzie znikomy. Główne źródło wody będzie reprezentowane przez wody reliktowe, stanowiące pozostałość z dawnych okresów geologicznych [68, 87] oraz wody związanej ze skałą. Woda zawarta w górotworze może zapełniać pory szczelinowe, międzyziarnowe i kontaktowe. Pory mogą być między sobą połączone poprzez szczeliny spękań lub mogą być zamknięte (nieczynne). Na wielkość i strukturę porów mają wpływ takie czynniki jak: skład litologiczny oraz ciśnienie. Badania [31] przeprowadzone nad zachowaniem się piaskowca ścisiskanego jednoosłowo wykazały, że wraz ze wzrostem obciążenia coraz więcej mikroszczelin zamyka się, a następnie dalszy wzrost ciśnienia powoduje, że ścianki mikroszczelin ślizgają się. Następują nowe spękania.

Ze względu na wielkość średnicy rozróżnia się pory:

- ponadkapilarne, mające średnice powyżej 0,5 mm. Ciecz przepływająca przez takie pory podlega działaniu sił ciężkości [7, 56, 68, 87];
- kapilarne pory o średnicy 0,0002-0,5 mm. Ciecz przepływająca przez takie szczeliny podlega działaniu sił powierzchniowych, które znacznie przeważają nad siłami ciężkości, tak że udział tych ostatnich jest znikomy. Ruch cieczy ma charakter dyfuzyjny;
- mikropilarne mające średnice poniżej 10^{-7} (m).

Ruch cieczy odbywa się drogą efuzji (ruch molekularny). Ciecz na skutek działania sił powierzchniowych oraz sił przyciągania międzycząsteczkowego tworzy ze skałą stan związany. Siły działające w złożu nie mogą wywołać jej przepływu.



Rys. 1. Wpływ głębokości zalegania górotworu na jego porowatość i wilgotność

Analiza wpływu głębokości na zawilgocenie pokładów węgla (wilgotność przemijająca) przeprowadzona na wynikach analiz próbek węgla (prób 1025) wykonana przez autora [24] wykazała, że zmiany wilgotności wraz z głębokością opisuje funkcja wykładnicza w postaci:

$$W_{sr} = 9 H^{-0,8} \quad (3.3)$$

gdzie:

W_{sr} - zawartość wilgoci przemijającej w węglu (%),

H - głębokość zalegania pokładu, m/100.

Podana zależność daje możliwość obliczenia średniej wartości wilgoci przemijającej dla zakresu głębokości 100-1000 m.

Na rys. 1 podano zmianę wilgotności skał obliczoną wg zależności (3.3) na tle zmian porowatości i wilgotności skał Zagłębia Donieckiego (3.7). Na rysunku zauważa się dużą zależność wilgotności przemijającej od porowatości skał. Ponadto z rysunku można wnioskować, że tylko część por i szczelin jest zapełniona wodą, resztę wolnej przestrzeni zapełnia powietrze zawierające parę wodną oraz inne gazy będące w równowadze termodynamicznej [1, 77].

b) Proces technologiczny jako źródło wilgoci

Woda zużyta w procesie technologicznym na dole kopalni stanowi zaledwie kilka procent wody dopływającej do wyrobisk górniczych, jednakże ze względu na bezpośredni kontakt z przepływającym powietrzem stanowi poważne źródło nawilżania powietrza. Ze względu na przeznaczenie oraz miejsce nawilżania można te źródła wody ująć w następujące grupy:

1. Woda zużyta do zwalczania pyłu węglowego - zraszanie urobku na środkach transportowych, podczas urabiania calizny oraz w wyniku wtłaczania wody do calizny.
2. Woda płynąca w ściekach.

3. Woda zużyta do podszadzki hydraulicznej.

4. Woda wypływająca przez nieszczelności rurociągów wodnych, przeciwpożarowych i instalacji zasilającej obudowę zmechanizowaną.

Ilościowa ocena wymienionych źródeł wilgoci jest dosyć trudna. Większość tych źródeł znajduje się w oddziałach wydobywczych, w takich wyrobiskach jak ściany i chodniki podścianowe. W przekopach, przecznicach czy w szybach udział tych źródeł jest niewielki. W wyrobiskach ścianowych poważnym źródłem nawilżenia może być także pracująca załoga.

4. MECHANIZM WYMIANY WILGOCI W WYROBISKU GÓRNICZYM

4.1. Ruch ciepła i wilgoci w wyrobisku górnicyzm

Mechanizm wymiany wilgoci w wyrobisku górnicyzm jest bardzo złożony i zależy m.in. od:

- wielkości źródeł wilgoci w wyrobisku,
- wielkości źródeł ciepła w wyrobisku,
- temperatury, wilgotności i prędkości powietrza,
- wymiarów geometrycznych wyrobiska.

Źródłem wilgoci w wyrobisku górnicyzm, zgodnie z tym, co podano w rozdziale 3.2, jest górotwór lub woda zużywana w procesie technologicznym. Natomiast miejsce odparowania wody (przemiany fazowej wody w parę lub odwrotnie) może znajdować się:

- w powietrzu (parowanie wody opadającej w szybie lub wody rozpylanej przez zraszanie),
- ze swobodnego zwierciadła wody znajdującej się na spągu wyrobiska lub na ociosach wyrobiska,
- we wnętrzu górotworu (parowanie wody wolnej znajdującej się w porach i szczelinach).

Źródłem ciepła parowania wody może być:

- ciepło pobrane z powietrza (przemiana adiabatyczna),
- ciepło pobrane z górotworu,
- ciepło pobrane z górotworu i powietrza.

Ciepło niesione przez powietrze może pochodzić z różnych źródeł. Mogą to być pracujące maszyny i urządzenia oraz kable i rurociągi zasilające te urządzenia, a także ciepło wydzielane przez transportowany urobek lub ciepło wydzielone w procesie utlenienia węgla. Znacznym źródłem ciepła uzyskanego przez powietrze jest ciepło wydzielone na drodze konwekcji z powierzchni wyrobiska.

Kierunki przepływu ciepła i wilgoci mogą być zgodne lub niezgodne. Jeżeli zachodzi warunek, że:

$$t^g > t_n > t_w \quad (4.1)$$

gdzie:

- t^g - temperatura górotworu,
- t_n - temperatura powietrza mierzona termometrem suchym,
- t_w - temperatura powietrza mierzona termometrem wilgotnym,

wtedy zgodny kierunek wymiany ciepła i wilgoci nastąpi w przypadku, gdy $W_g > W_r$ - (W_g - wilgotność górotworu, W_r - wilgotność równowagowa powietrza) lub w przypadku, gdy proces parowania zachodzi w powietrzu. Jeżeli parowanie wody odbywa się ze swobodnej powierzchni (część wyrobiska pokryta wodą), kierunki wymiany ciepła i wilgoci mogą być niezgodne.

Jeżeli spełniony jest warunek:

$$t_g > \vartheta > t_w, \quad (4.2)$$

wtedy kierunki wymiany wilgoci i ciepła mogą być przeciwne. Źródłem ciepła pobranego w procesie parowania wody może być powietrze lub górotwór. Parowanie wody odbywa się kosztem ciepła niesionego przez powietrze.

Jeżeli spełniony jest warunek

$$t_g > t_w > \vartheta \quad (4.3)$$

wtedy kierunki wymiany wilgoci i ciepła mogą być zgodne. Nastąpi ochłodzenie powietrza i kondensacja pary.

Warunki (4.2) i (4.3) mogą zachodzić w przypadku istnienia dużych lokalnych źródeł ciepła w wyrobisku (kombajny, przenośniki, pompy) lub w przypadku okresowych wahań temperatury powietrza wlotowego. Najczęściej spotykanym warunkiem w praktyce górniczej kopalń głębokich jest warunek (4.1).

W kopalniach węgla kamiennego Zagłębia Górnośląskiego mogą wystąpić wszystkie trzy warunki. Przy czym może zaistnieć w wyrobisku ścianowym następująca sytuacja:

- na początku zmiany spełniony jest warunek (4.1),
- po włączeniu maszyn do ruchu zachodzi warunek (4.2),
- w trakcie urabiania kombajnem przy intensywnym zraszaniu zachodzi warunek (4.3).

W Zagłębiu Górnośląskim większość kopalń prowadzi eksploatację na głębokości 600-700 m, gdzie temperatura skał wynosi 26-30°C. Dlatego też wykonanie właściwej prognozy temperatury powietrza dla tego przypadku będzie szczególnie trudne ze względu na złożony model wymiany ciepła i masy.

4.2. Charakterystyka procesu parowania wody w wyrobku górniczym

4.2.1. Parowanie wody rozpylonej w powietrzu.

W wyrobiskach górniczych ze względu na temperaturę powietrza (t_g, t_w) oraz temperaturę początkową rozpylonej wody (t_{pw}) mogą zachodzić przemiany - ochłodzenie powietrza wraz z jego nawilżaniem dla przypadku, gdy $t_w > t_{pw}$ (ciepło jawne przejdzie od powietrza do wody, natomiast część wody przejdzie do powietrza),

- jednoczesne ochłodzenie i nawilżenie powietrza wraz ze wzrostem entalpii właściwej, dla przypadku:

$$t_s > t_{pw} > t_w \quad (4.4)$$

- jednoczesne podniesienie temperatury oraz wzrost nawilżenia i entalpii właściwej powietrza, jeżeli temperatura początkowa wody $t_{pw} > t_s$.

Sumaryczna ilość ciepła przyjęta przez powietrze w procesie parowania wody wyniesie:

$$dQ = dQ_{jawnie} + dQ_{utajone} = mdi = [\alpha(t_s - t_{pu}) + \beta' r(p - p_n)] dA \quad (4.5)$$

gdzie:

- t_{pw} - temperatura początkowa wody, °C,
- β' - współczynnik parowania wody, s²/m,
- r - ciepło parowania wody, kJ/kg,

p, p_n - ciśnienie pary wodnej w warstwie granicznej i w powietrzu, Pa

W przypadku rozpylenia wody przez układ zraszania, mamy do czynienia z objętościowymi współczynnikami wymiany ciepła α_0 i masy β_0 [20, 70, 84], które wg Szczerbanis [83] opisują zależności:

$$\alpha_0 = C w^m B^n \quad (4.6)$$

$$\beta_0 = C w^m B^n \quad (4.7)$$

gdzie:

C, C_m, m, n - współczynniki określone doświadczalnie,

$B = \frac{m \cdot w}{p}$ - współczynnik zraszania (stosunek wydatku wody do powietrza).

Jak wynika z zależności (4.5), wymiana masy i ciepła między powietrzem a rozpyloną wodą uzależniona jest od różnicy temperatur powietrza i wody, a także różnicy ciśnień pary wodnej w temperaturze wody i w powietrzu oraz współczynników wymiany objętościowej ciepła i masy. Natomiast zmianę entalpii właściwej powietrza przepływającego w obrębie rozpylonej wody opisuje zależność:

$$di = c_p dt + c_{pp} dt dx + r dx \quad (4.8)$$

gdzie:

c_p, c_{pp} - ciepło właściwe powietrza i pary wodnej.

Człon ($c_{pp} dt dx$) ze względu na niewielką wartość w porównaniu z pozostałymi można pominąć.

Porównując człony określające zmianę ciepła jawnego i ciepła utajonego (pobranego w procesie parowania) z równań (4.5) i (4.8), można napisać:

$$\alpha_c (t_s - t_{pw}) dV = \dot{m} c_p dt \quad (4.9)$$

$$\beta_0 r (p - p_n) dV = \dot{m} r dx \quad (4.10)$$

Po przekształceniu powyższych zależności uzyska się równanie opisujące zmianę temperatury i nawilżenia powietrza po przejściu przez źródło rozpylonej wody:

$$dt = \frac{\alpha_c}{\rho c_p} (t_s - t_{pw}) \quad (4.11)$$

$$dx = \frac{\beta_0}{\rho} (p - p_n) \quad (4.12)$$

gdzie:

ρ - gęstość powietrza wilgotnego.

Korzystając z zależności (4.11) i (4.12), można obliczyć wpływ zraszania podczas urabiania i transportu węgla.

4.2.2. Parowanie wody ze swobodnej powierzchni

Proces parowania wody ze swobodnej powierzchni znamionuje jednoczesna wymiana ciepła i masy. Kierunek wymiany ciepła uzależniony jest od warunków opisanych zależnościami (4.1) - (4.3), a więc od temperatury powietrza i górotworu. Tworząca się para wodna na powierzchni cieczy dyfunduje poprzez warstwę graniczną, a następnie miesza się ze strumieniem powietrza pod wpływem jego ruchu. Dla dyfuzji pary wodnej od powierzchni lustre wody do otaczającego powietrza zachodzi przypadek jednostronnie przepuszczalnej powierzchni granicznej, którą opisuje prawo dyfuzji Stefana [6, 33, 49, 86] w postaci:

$$\dot{m}_p = \frac{\beta}{R_w T} (p - p_n) \quad (4.13)$$

gdzie:

\dot{m}_p - gęstość strumienia masy, $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$,

β - współczynnik przejmowania masy, m^2/s ,

R_w - stała gazowa pary wodnej, J/kgK ,

T - temperatura, $^{\circ}\text{K}$.

Natężenie perowania wody przy niezmienniej temperaturze i wilgotności oraz prędkości powietrza zależy wyłącznie od temperatury powierzchni oraz współczynnika przejmowania masy.

Współczynnik przejmowania masy dla ruchu burzliwego oraz dużej wilgotności można obliczyć, korzystając z prawa Levisa [6, 33, 41]:

$$\varphi = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{\lambda}{\sigma} \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{0,33} \quad (4.14)$$

gdzie:

- λ - współczynnik przewodzenia ciepła przez powietrze,
- σ - dynamiczny współczynnik dyfuzji pary wodnej w powietrzu,
- $Pr = \frac{c_p \eta}{\lambda}$ - liczba Prandtla,
- η - współczynnik lepkości dynamicznej powietrza,
- $Sc = \frac{m \eta}{\sigma}$ - liczba Schmidta,
- $m = \frac{M_{H_2O}}{\rho_{pow}}$ - stosunek mas molowych.

Przy obliczeniu dynamicznego współczynnika dyfuzji pary wodnej można skorzystać z zależności [33].

$$\sigma = 0,054 \sqrt{\frac{T}{273}} \text{ kg/mh} \quad (4.15)$$

Dla temperatury powietrza $t = 20^\circ\text{C}$ można przyjąć wg [33] następujące wartości: $\lambda = 0,02373 \text{ W/mK}$, $\sigma = 1,57 \cdot 10^{-5} \text{ kg/ms}$, $m = 0,628$, $\eta = 1,775 \text{ kg/ms}$, $c_p = 1004,8 \text{ J/kgK}$.

Zamiast dynamicznego współczynnika dyfuzji pary wodnej można posłużyć się współczynnikiem dyfuzji oznaczonym przez D . Równanie Levisa (4.14) przejmie wtedy postać:

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{\lambda}{D} \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^n = \frac{\lambda}{D} \left(\frac{D}{\sigma} \right)^n \quad (4.16)$$

gdzie:

- a - współczynnik wyrównywania temperatury w powietrzu,
- n - wykładnik, który wg Krischera [43] przyjmuje następujące wartości:
 - $n = 0$ - dla ruchu laminarnego, $n \approx 1/3$ - dla wymiany ciepła i masy przy przepływie czynnika wzdłuż powierzchni płaskich z laminarną warstwą przyścienną, $n = 1$ - ruch burzliwy.

Współczynnik wymiany ciepła α dla gładkich przewodów można obliczyć z równania:

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{śc}} \right)^{0,25} = 0,018 Re^{0,8} \quad (4.16)$$

gdzie:

- $Pr_{śc}$ - liczba Prandtla w warstwie przyściennej.

Dla gazów dwuatomowych, a do takich można zaliczyć powietrze kopalnia-
ne bez względu na ciśnienie i temperaturę, można przyjąć $Pr = 0,72$. Po-
nieważ zależność (4.16) obowiązuje tylko dla burzliwego ruchu powietrza,
lepszą dokładność obliczeń współczynnika wnikania ciepła można uzyskać
przez zastosowanie zależności uzyskanych przez Niesterenko [65] w postaci:

$$Nu = 2 + APr^{0,33}Re^nGu^m \quad (4.17)$$

Parametry A, n, m przyjmują następujące wartości w zależności od war-
tości liczby Re:

Re	A	n	m	A'	n'	m'
1-200	1,07	0,48	0,175	0,83	0,53	0,135
200-2,2 10^4	0,51	0,61	0,175	0,49	0,61	0,135
2,2 $\cdot 10^4$ -3,15 10^5	0,027	0,9	0,175	0,0248	0,9	0,135

Ze względu na istniejącą analogię wymiany ciepła i masy [19, 33, 38,
41, 56, 60], stosując powyższą zależność, można obliczyć współczynniki
wnikania ciepła i masy.

Indeksy' odnoszą się dla przypadku, gdy za pomocą równania (4.17) obli-
cza się współczynnik wymiany masy.

W wyrobiskach górniczych, gdzie odbywa się transport urobku za pomocą
przenośników taśmowych, można zaobserwować, że przy spągu ruch powietrza
jest znikomy. W związku z tym dyfuzja pary wodnej w tej warstwie odbywa
się drogą konwekcji naturalnej, a współczynnik wymiany ciepła oblicza się
z zależności [33, 75],

$$Nu = 0,5(GrPr)^{0,25} \quad (4.18)$$

gdzie:

$$Gr = \frac{g\beta_1 l^3 \Delta t}{2\nu} \quad \text{- liczba Grashofa,}$$

- g - przyspieszenie ziemskie,
- β_1 - współczynnik rozszerzalności objętościowej wody,
- Δt - różnica temperatur ośrodków,
- ν - współczynnik lepkości kinematycznej powietrza,
- l - wymiar liniowy.

Analiza zależności (4.16), (4.17) i (4.18) wskazuje, że dla średnich
warunków górniczych większą wartość przyjmuje współczynnik przejmowania
ciepła między górotworem a wodą w stosunku do współczynnika przejmowania
ciepła między powietrzem a wodą. Jeżeli założy się, że:

- istnieją dwa identyczne wyrobiska, w których następuje przyrost ental-
pii właściwej powietrza o wartości Δt , przy czym w jednym z nich cały

przyrost entalpii właściwej odbywa się w wyniku dopływu ciepła z górotworu (q_g), a w drugim wyrobisku cały przyrost entalpii w wyniku dopływu ciepła wydzielonego przez urządzenia energomechaniczne (q_m) i zachodzi zależność:

$$\Delta i = q_g = q_m \quad (4.19)$$

- temperatura (t_o) i wilgotność powietrza na wlocie do obu wyrobisk są identyczne,
- temperatura wody (t_{pw}) znajdującej się na powierzchni obu wyrobisk jest identyczna,
- w obu wyrobiskach zachodzi przemiana adiabaticzna, zgodnie z prawem Newtona, ciepło, które przejdzie do wody, wyniesie:

$$\alpha (t - t_{pw}) = q_w \quad (4.20)$$

Ponieważ współczynnik przejmowania ciepła α na granicy górotwór-woda jest większy od współczynnika na granicy powietrze - woda, więcej ciepła przepłynie z górotworu do wody niż z powietrza do wody.

Dlatego w wyrobiskach wykonanych w górotworze o wysokiej temperaturze pierwotnej obserwuje się większe przyrosty wilgotności właściwej oraz mniejsze przyrosty temperatur powietrza, przy tym samym przyroście entalpii właściwej w stosunku do wyrobisk wykonanych w skałach o niższej temperaturze ale wyposażonych w szereg urządzeń energomechanicznych.

Fakt ten potwierdzają pomiary wykonane w wyrobiskach kopalń Zagłębia Górnośląskiego. Schodzenie więc z eksploatacją na większe głębokości spowoduje dalszy wzrost wilgotności właściwej powietrza.

4.2.3. Parowanie wody z powierzchni wyrobiska

Proces odparowywania wody z powierzchni wyrobiska zachodzi w dwóch przypadkach:

- poprzez parowania wody ze swobodnej powierzchni nastąpi obniżenie lustro wody, w wyniku czego na powierzchni wyrobiska (ciała stałego) powstaną powierzchnie suche (wysepki suche),
- w wyniku procesu urabiania nastąpi odkrycie nowych powierzchni górotworu zawierającego wodę wolną, w związku z czym nastąpi odparowywanie wody znajdującej się w porach i szczelinach.

Proces odparowywania wody z powierzchni wyrobiska opisują te same równania co proces ze swobodnej powierzchni. Jednakże zmienia się powierzchnia parowania wody na skutek pojawienia się coraz to większych powierzchni suchych. Zjawisko to zachodzi, gdy ilość wody dostarczanej pod wpływem:

- działania sił kapilarnych i powierzchniowych,
- działania procesu filtracji,

nie nadaje wyrównywać ubytku wody odparowującej z powierzchni. Ruch wody wskutek działania sił kapilarnych następuje w wyniku wysysania wody z kapilar i szczelin szerszych przez kapilary węższe zgodnie z zależnością [4, 1]:

$$r_k = H \rho_c g = \frac{2\sigma \cos \theta}{r_k} \quad (4.21)$$

gdzie:

- p_k - ciśnienie kapilarne,
- H - wysokość wzniesienia menisku,
- ρ_c - gęstość cieczy,
- θ - kąt zwilżania,
- r_k - promień kapilary,
- σ - napięcie powierzchniowe.

Zjawisko kapilarne występuje nie tylko w rurkach kapilarnych o regularnych kształtach, ale także we wszystkich przekrojach między ściankami sztywnego szkieletu.

Powstała różnica ciśnień, wynikająca z różnicy promieni kapilar oraz napięcia powierzchniowego i kąta zwilżania (4.21), zostaje zużyta częściowo na pokonanie oporów przepływu.

Wielkość kąta zwilżania zależy od takich czynników jak: stopnia zaadsorbowania powietrza i innych gazów na powierzchni ciała stałego, ładunku elektrycznego, struktury powierzchni styku, składu chemicznego fazy stałej. Wielkość kąta θ wynosi:

$\theta = 0^\circ$ - gdy skała całkowicie jest zwilżona wodą,

$0 < \theta < 90^\circ$ - skała jest częściowo zwilżona wodą.

Cofanie się menisków cieczy w kapilarach w głąb materiału wystąpi najpierw w porach o większych średnicach. Wskutek cofania się menisków zmniejsza się, początkowo nieznacznie, powierzchnia zwilżona górotworu. W dalszym ciągu odparowywania wody proces cofania się menisków obejmuje również pory o mniejszych średnicach, wskutek czego wydłuża się droga dyfuzji pary wodnej do otaczającej atmosfery. Zmniejsza się szybkość odparowywania wody. Kończy się tzw. pierwszy okres suszenia.

4.2.4. Parowanie wody wewnątrz-górotworu

Proces parowania wody wewnątrz górotworu podlega innym prawom niż proces parowania ze swobodnej powierzchni zwierciadła wody. Przy rozważaniu ruchu wilgoci w górotworze należy ściśle odróżnić dwa jego rodzaje:

- przemieszczenie cieczy pod wpływem sił kapilarnych, powierzchniowych i grawitacyjnych,
- przemieszczenie pary wodnej w porach wypełnionych gazem pod wpływem działania różnicy ciśnień cząstkowych pary.

Na ruch wilgoci w górotworze mają wpływ:

- a) stopień zawilgocenia skał i wyrobiska,
- b) temperatura pierwotna skał i powietrza w wyrobisku,
- c) porowatość i szczelinowatość górotworu,
- d) ruch filtracyjny wody w masywie skalnym,
- e) właściwości powierzchniowe ośrodka kapilarno-porowatego, jakim jest górotwór.

W pracach zajmujących się problemami suszenia materiałów [7, 41, 43, 58, 86], a także prognozowaniem warunków klimatycznych w wyrobiskach górniczych uwzględniających ruch wilgoci w górotworze [36, 48, 83, 90] oraz w pracach dotyczących sorpcji i desorpcji wilgoci [7, 16, 18, 33, 39, 56, 63] przy rozwiązywaniu powyższych zagadnień przewijają się dwa zasadnicze problemy:

- określenie energii potrzebnej do oderwania określonej objętości czy masy pary wodnej od szkieletu materiału,
- określenie współczynników dyfuzji pary wodnej lub wody w ośrodku skalnym.

Ze względu na warunki termodynamiczne panujące w warstwie granicznej między sztywnym szkieletem (górotworem) a wilgocią, najważniejszą rolę przy określeniu energii oderwania wilgoci z podłoża będą odgrywały wiązania wilgoci ze skałą w postaci [7, 56, 64, 68, 86, 87]:

- fizykochemicznej typu adsorpcyjnego i osmotycznego występujące w różnych, niekoniecznie ściśle określonych, stosunkach,
- fizykomechaniczne typu strukturalnego (woda przyłączona podczas tworzenia się ciała), kapilarnego czy zwilżania (przyłączenie wody podczas bezpośredniego kontaktu z powierzchnią ciała).

W kapilarach i porach ciecz na skutek działania sił powierzchniowych oraz sił przyciągania międzycząsteczkowego tworzy ze skałą stan związany. Z sił powierzchniowych działających na ciecz w porach i kapilarach należy wyróżnić: napięcie powierzchniowe, siły kapilarne i siły przyczepności. Siły te przeciwdziałają swobodnemu ruchowi cieczy w kanałach kapilarnych. Na pokonanie ich konieczne jest przyłożenie dodatkowych sił poza siłą ciężkości.

Gazy nie podlegają kapilarnemu przyciąganiu, dlatego mogą swobodnie przepływać przez pory kapilarne. Przenoszenia ciepła i masy zawartej w kapilarno-porowatych ciałach odbywa się w wyniku różnicy potencjału przeniesienia. Dlatego określenie potencjału przeniesienia jest podstawowym zadaniem termodynamiki procesów nieodwracalnych [1, 63, 77, 78].

Na podstawie termodynamiki procesów nieodwracalnych wiadomo, że zmiana energii wilgoci dE dowolnej części układu równa się [56]:

$$dE = VdP - sdT + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n G_{ij} d^{\nu} \nu_{ij} \quad (4.22)$$

gdzie:

V - objętość,

P - ciśnienie,

s - entropia

$\Theta_{i,j}$ - pełny potencjał przenoszenia masy,

$V_{i,j}$ - ilość masy (indeksy ozn.: i - składnik, j - faza).

Pierwsze dwa człony zależności (4.22) opisują zmianę energii w dowolnej części układu zachodzącą w wyniku zmiany temperatury i ciśnienia (przy czym nie zachodzi zmiana w szkielecie ciała kapilarno-porowatego). Ostatni człon określa zmianę energii w wyniku zmiany ilości pochłoniętej wilgoci. Pełny potencjał przenoszenia wilgoci (π_c) równa się sumie potencjałów w występujących w danym polu:

$$\pi_c = \pi_g + \pi_k + \pi_t + \pi_e \quad (4.23)$$

gdzie:

π_g - potencjał grawitacyjny,

π_k - potencjał kapilarny,

π_t - potencjał dyfuzji termicznej,

π_e - potencjał elektryczny.

Pełny potencjał przenoszenia wilgoci π_c jest funkcją temperatury i wilgotności właściwej ciała. Przy czym wilgotność właściwą ciała u (kg/kg) można wyrazić analogicznie jak entalpię właściwą ciała.

Jeżeli

$$\Delta i = c_p(t_2 - t_1),$$

to

$$\Delta u = c(u_2 - u_1).$$

Potencjał absolutnie suchego ciała przyjmuje się równy zero ($\pi = 0$) tak jak wilgotność właściwą suchego ciała ($u = 0$). Dlatego skala potencjału wymiany wilgoci jest analogiczna do skali temperatury. Wymiana wilgoci między dwoma ciałami (ośrodkami) odbywa się w wyniku różnicy potencjału od ciała o wyższym potencjale do ciała o niższym potencjale. W stanie równowagi termodynamicznej ($\pi = \pi_1 = \text{const}$) wilgotność ciał jest proporcjonalna do ich wilgotności właściwych:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{e_1}{e_2} \quad (4.23a)$$

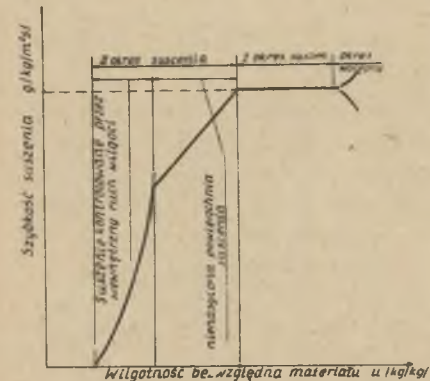
Dla tego samego ciała w stanie równowagi $c_1 = c_2$ i $u_1 = u_2$, więc rozłożenie wilgoci w ciele jest równomierne.

Wg badań Kazenskina [63] ze względu na różnice wydzielanego ciepła w procesie adsorpcji wyróżnia się trzy przedziały wilgotności ciała:

1. W przedziale wilgotności $0 < \varphi < 0,1$ adsorbpcja ma charakter monomolekularny. Przystawanie wilgoci związane jest z wydzielaniem znacznych ilości ciepła.
2. W przedziale wilgotności $0,1 < \varphi < 0,9$ adsorbpcja ma charakter polimolekularny. Adsorbpcji towarzyszy wydzielanie ciepła, ale w mniejszej ilości.
3. W przedziale wilgotności $0,9 < \varphi < 1$ - zachodzi tzw. skraplanie kapilarne. W miejsce sprężonej pary o grubości kilku warstw drobin tworzy się w tym przypadku warstwa cieczy, której grubość wzrasta w miarę wzrostu ciśnienia cząstkowego pary. W ostateczności tworzy się na dnie kapilary zwierciadło cieczy o menisku wklęsłym, przy czym ciśnienie nasycenia nad tym meniskiem maleje. W rezultacie powstają warunki sprzyjające do dalszego skraplania pary pochodzącej z powietrza pierwotnie nasyconego. Wilgoci tej nie towarzyszy wydzielanie ciepła.
4. Dalszy przyrost wilgotności ciała odbywa się w drodze kontaktu dwóch wilgotnych materiałów. W tym procesie wilgoć zapełnia makrokapilary i pory, a także na drodze osmozy przenika do zamkniętych por. Charakter tej wilgoci jest taki jak charakter wilgoci wolnej.

Proces wymiany wilgoci w wyrobisku górnym wg [86] przedstawia rysunek 2.

Oczywiście w wyrobisku górnym nie będzie zachodzić proces adsorbpcji lecz proces desorbpcji. Ciepło adsorbpcji składa się z ciepła kondensacji i energii wiązania ze szkieletem. W praktyce przyjmuje się, że ciepło adsorbpcji występuje jedynie podczas tworzenia się pierwszej monomolekularnej warstwy wilgoci. Dla pozostałych warstw przyjęto, że ciepło adsorbpcji równa się ciepłu skraplania pary. Ponadto przyjmuje się, że ciepło adsorbpcji nie zależy od temperatury. Wg Pawłowa [69] ciepło



Rys. 2. Krzywa szybkości suszenia

adsorbpcji (q_a) w zależności od ilości pochłoniętej pary wodnej określa się wzorem:

$$q_a = \frac{44 \cdot 10^3 \lg \frac{p_2}{p_1}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}, \text{ J/kmol} \quad (4.24)$$

gdzie:

f_2, p_1 - prężności równowagowe substancji adsorbcyjnych nad adsorbentem w temperaturze T_1 i T_2 .

Ciepło adsorbcji pary wodnej przez węgiel wg Pawłowa [75] w zależności od temperatury wynosi:

$$t = 10^{\circ}\text{C}, \quad q_a = 41,9 \text{ kJ/mol},$$

$$t = 40^{\circ}\text{C}, \quad q_a = 39 \text{ kJ/mol}.$$

Natomiast wg badań Kargera [39] ciepło sorbcji dla piaskowców, żupków piaszczystych, żupków ilastych wynosi około $q_a \approx 42,4 \text{ kJ/mol}$. Ponieważ wilgotność względna powietrza kopalnianego w Zagłębiu Górnos Śląskim waha się w granicach $45 < \varphi < 100\%$, należy się liczyć, że część pary wodnej przechodzącej z górotworu do powietrza przechodzi drogą desorbcji, w związku z czym w bilansie energii należałoby ten fakt uwzględnić.

Zagadnienie określenia współczynników dyfuzji pary wodnej i wody w ośrodku skalnym jest problemem znacznie trudniejszym.

Dla kapilarnego ruchu cieczy Krischer [43] ustalił następującą zależność:

$$\dot{m}_w = -Ak\varrho_s \frac{dW}{ds} \quad (4.25)$$

gdzie:

\dot{m}_k - natężenie przepływu wilgoci,

k - współczynnik przewodzenia wilgoci,

$\frac{dW}{ds}$ - gradient wilgoci,

ϱ_s - gęstość suchego materiału,

Znak minus oznacza, że ruch cieczy odbywa się w kierunku przeciwnym do gradientu wilgotności. Współczynnik przewodzenia wilgoci nie jest wielkością stałą, lecz zależy od takich czynników jak: rozmieszczenia kapilar w materiale, napięcia powierzchniowego (σ), lepkości cieczy (η) oraz wilgotności materiału (W).

Zależność tę można wyrazić wzorem:

$$k = \frac{\sigma}{\eta} f(W) \quad (4.26)$$

Osobliwością współczynnika przewodzenia wilgoci jest to, że jego wartość zmierza do zera przy zmniejszających się wilgotnościach materiału. Przy bardzo dużych zawartościach wilgoci w materiale, gdy jego pory są wypełnione cieczą, wartość współczynnika przewodzenia wilgoci dąży do nieskończoności. W kapilarach i porach wypełnionych gazem przemieszczanie wilgoci następuje w wyniku ruchu pary. Dla jednowymiarowego ruchu wilgoci

przez materiały płaskie Krischer ustalił w przypadku dyfuzji molekularnej następujący wzór:

$$m_w = - \frac{1}{g} f b_m \frac{dp_w}{ds} \quad (4.27)$$

gdzie:

- g - przyspieszenie siły ciężkości,
- f - suma pól poprzecznych przekrojów wszystkich porów,
- b_m - współczynnik ruchu masy,
- $\frac{dp_w}{ds}$ - gradient ciśnienia.

Współczynnik ruchu masy wyraża zależność:

$$b_m = 5,83 \cdot 10^{-3} d_p g \sqrt{\frac{M}{T}} \quad (4.28)$$

gdzie:

- M - masa drobinowa pary,
- d_p - średnica porów materiału.

Współczynnik ruchu b_m jest niezależny od ciśnienia cząstkowego powietrza. Jeżeli średnice porów są większe aniżeli swobodna droga cząsteczki pary ($d_p > 10^{-7}$ (m)), obowiązuje wówczas prawo dyfuzji Stefana, które opisuje zależność:

$$m_w = -fb \frac{dp_w}{ds} \quad (4.29)$$

gdzie:

$$b = \frac{D}{R_w T} \frac{p}{p - p_{wm}}$$

- D - współczynnik dyfuzji,
- p - ciśnienie całkowite,
- p_{wm} - średnie ciśnienie cząstkowe pary wodnej.

Współczynnik dyfuzji można obliczyć z zależności:

$$D = \frac{2,26}{p} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,8} \text{ m/s}, \quad (4,30)$$

W przypadku górotworu (jak wynika z rozdziału 3.2, gdzie omówiono źródła wilgoci) mamy do czynienia jednocześnie z kapilarami napełnionymi wodą i wilgotnym powietrzem; ruch wilgoci występuje w wyniku przepływu kapilarnego jak również dyfuzji pary.

Natężenie przepływu wilgoci wyrazi wówczas zależność:

$$\dot{q}_w = -\lambda(k\rho_w \frac{\partial W}{\partial s} + \frac{D}{\mu} b \frac{\partial P_w}{\partial s}) \quad (4.)$$

gdzie:

μ - współczynnik oporu dyfuzyjnego.

W wyrobiskach górniczych usytuowanych w górotworze na dużej głębokości można założyć, że dopływ wody w wyniku filtracji jest równy zero.

Do wyrobiska w momencie jego wykonania dopływa wilgoć w postaci wody oraz pary wodnej. W wyniku osuszania górotworu zmniejsza się dopływ wody, lecz wzrasta przepływ pary wodnej na skutek zwiększenia pustek zajętych przez powietrze. Zmiana czynnika ruchu (wody na parę wodną) powoduje zmianę własności termicznych oraz dyfuzyjnych ośrodka skalnego.

Zmienia się współczynnik przewodzenia ciepła [86]:

$$\lambda = (1 - \varepsilon)\lambda_1 + \varepsilon\lambda_2$$

gdzie:

ε - porowatość ośrodka,

λ_1 - współczynnik przewodzenia ciepła przez górotwór,

λ_2 - współczynnik przewodzenia ciepła przez czynnik dyfuzyjny.

Zmienia się także powierzchnia przepływu kapilarnego wody oraz współczynnik ruchu masy.

W pracach, w których skorzystano z analogii między ruchem ciepła i masy [6, 33, 36, 38, 42, 46, 83, 90, 93], formując zależności (2.10), (2.21), (2.23), niektóre współczynniki (jak wynika z powyższej analizy) zależą od wilgotności materiału (górotworu), w związku z czym zmieniają swoją wartość w szerokim zakresie. Szczególnie dużym zmianom podlegają:

- współczynnik wyrównywania potencjału wilgoci μ' - odpowiednik współczynnika wyrównywania temperatury w liczbie Fo,
- współczynnik fazowych przemian $0 < \varepsilon < 1$, przy czym $\varepsilon = 1$ - jeśli przepływ wilgoci odbywa się tylko w postaci pary, $\varepsilon = 0$ - przepływ wilgoci odbywa się w postaci wody,
- wilgotność właściwa górotworu (u).

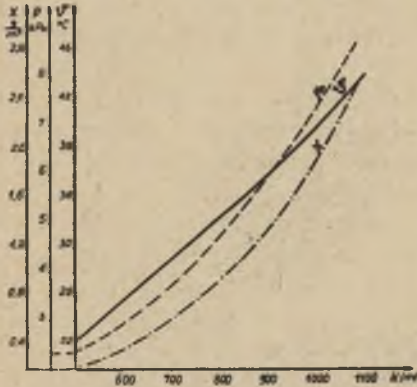
Dlatego uzyskane wyniki mogą być obarczone dużym błędem. Jeżeli do tego, że w całość wyrobiska występuje tzw. wzmożona strefa ciśnień i plastycznych, powodująca zamykanie jednych szczelin, otwieranie innych, w której dodatkowo wydzielona się ciepło powstałe w wyniku tarcia ścian oraz ciepło utleniania w przypadku wyrobisk wykonanych w węglu, to cały proces nie zachodzącego procesu parowania i ruchu wody w całości oraz przepływu ciepła jest nader skomplikowane. Przyjęte modele ruchu ciepła i masy [84, 90] przyjmują zbyt dużo uproszczeń o zachodzącym zjawisku. Przeprowadzone wstępne badania w Instytucie Techniki Eksploatacji Złóż Politecz-

ki Śląskiej pod kierunkiem autora [44], dotyczące wpływu ciśnienia na szybkość procesu parowania wody w górotworze, wykazały:

- wzrost ciśnienia przyłożonego na próbkę węgla z 2 (MPa) do 5 (MPa), powoduje zmniejszenie wymiany wilgoci między próbką a przepływającym powietrzem,
- wpływ czasu na strumień masy wilgoci płynącej z węgla do powietrza: z 0,078-0,1 g/m²s w pierwszej godzinie doświadczenia, do 0,009-0,035 g/m²s w drugiej godzinie.

Ponadto przeprowadzone badania wykazały trudności w ich przygotowaniu. Dotyczą one kłopotów związanych z wycięciem próbki węgla z pokładu węgla nienaruszonego eksploatacją.

Innym zjawiskiem towarzyszącym procesowi urabiania i rozdrabniania węgla jest dyfuzja pary wodnej zawartej w porach i szczelinach nie zapełnionych wodą.



Rys. 3. Wpływ głębokości zalegania wyrobiska na moc strumienia pary wodnej wydzielanej podczas urabiania

Ilość zawartej pary w górotworze zależy od temperatury pierwotnej górotworu, objętości wolnych pustek oraz wilgotności właściwej górotworu.

Na rys. 3 przedstawiono zmiany:

- temperatury pierwotnej skał wraz z głębokością,
- ciśnienia pary wodnej w stanie nasyconym, p_p ,
- masy pary wodnej zawartej w 1 m³ urobionej calizny węglowej x.

Przy obliczaniu zawartości masy pary wodnej w caliznie przyjęto: ciśnienie powietrza w porach i szczelinach w przybliżeniu jest bliskie ciśnieniu atmosferycznemu na danej głębokości oraz że objętość, jaką zajmuje powietrze wilgotne, wynika z różnicy między porowatością a wilgotnością pierwotną skał słuszną dla danej głębokości przedstawionej na rys.

1. Na rys. 3 przedstawiono jedynie zakres głębokości 600-1200 m wynikający z aktualnie prowadzonej eksploatacji węgla w Zagłębiu Górnos Śląskim.

W celu uzyskania danych dla wykresu przeanalizowano dane dotyczące porowatości względnej skał karbońskich podane w pracy Chmury [13].

Z pracy tej wynika, że porowatość względna wynosi dla:

piaskowców gruboziarnistych	2,9-16,6%
piaskowców drobnoziarnistych	0,19%
mułowców (łupków ilastych)	2,4-9,2%
łupków ilastych	2-10%
węgla kamiennych	3-12,9%

W większości przypadków stwierdzono, że warstwy stratygraficznie starsze posiadają mniejszą porowatość. Z rys. 3 wynika, że wraz z głębokością wzrasta ilość pary wodnej zawartej w porach i szczelinach mimo zmniejszającej się porowatości. Dlatego m.in. w procesie urabiania stwierdza się wzmożone wydzielanie pary wodnej. Dodatkowym przyczynkiem wzmożonego wydzielania pary wodnej jest desorbcja pary z mikrokapilar zniszczonych przez organ urabiający. W związku z powyższym rozwiązanie analityczne ujmujące oddzielnie poszczególne źródła ruchu wilgoci w górotworze oraz między górotworem a przepływającym powietrzem jest problemem bardzo trudnym.

Ponieważ w praktyce górniczej wymaga się określonej dokładności w ujęciu tych zjawisk, dlatego w niniejszej pracy podjęto próbę rozwiązania zagadnienia wymiany wilgoci w wyrobiskach górniczych drogą badań empirycznych ujmujących kompleksowo zjawiska towarzyszące.

5. EMPIRYCZNE WYZNACZENIE ZALEŻNOŚCI OPISUJĄCYCH PROCES NAWILŻENIA POWIETRZA W WYROBISKACH GÓRNICZYCH

5.1. Określenie czynników charakteryzujących proces nawilżania powietrza

Zasadniczy wpływ na wymianę wilgoci między otaczającym górotworem a przepływającym powietrzem mają nie tylko własności oraz warunki panujące na granicy tych ośrodków lecz także wewnątrz tych ośrodków. Jak wynika z poprzednich części niniejszej pracy, decydujący wpływ na wymianę ciepła i wilgoci w wyrobisku górniczym mają:

- wilgotność i temperatura pierwotna górotworu,
- wielkość powierzchni parowania oraz dopływ wody poprzez filtrację w górotworze,
- sposób rozmieszczenia i wielkość źródeł ciepła,
- charakter ruchu powietrza w wyrobisku,
- proces parowania wody ze swobodnego zwierciadła wody,
- proces parowania wody z powierzchni wyrobiska,
- proces parowania wody rozpylonej w wyrobisku,
- proces parowania wody wewnątrz górotworu.

W celu wykonania dobrej prognozy temperatury i wilgotności powietrza w projektowanym wyrobisku należałoby każdy z tych czynników właściwie ująć i określić. Spowodowałoby to dalsze rozbudowanie i tak już złożonych metod prognozowania warunków klimatycznych. Wydaje się więc celowe, by na obecnym etapie wiedzy, mając na uwadze dostępne metody prognozowania temperatury powietrza, w sposób prosty poprawić dane wejściowe dotyczące wymiany wilgoci. W tym celu, wykorzystując analogię wymiany ciepła i masy [19, 33, 41, 56, 60], można określić wielkość parametrów i współczynników wchodzących do następujących metod prognozowania: Szczerbiana [84], Woropajewa [101], Vossa [95], Holka [36], i Wacławika [89] w postaci:

$$Nu' = f(Re, Pr, Gu) \quad (5.1)$$

$$c = f(Re, Pr, Gu) \quad (5.2)$$

$$\Delta\varphi = f(Re, Sc, Gu) \quad (5.3)$$

$$\Delta x = f(Re, Pr, Gu) \quad (5.4)$$

gdzie:

- $\Delta\varphi$ - przyrost wilgotności względnej, %/m,
- c - współczynnik wymiany wilgoci,
- β - współczynnik przejmowania wilgoci, m/s,
- Δx - przyrost wilgotności właściwej, kg/kgm,
- Nu' - liczba Nusselta dotycząca wymiany wilgoci,
- Re - liczba Reynoldsa,
- Pr - liczba Prandtla,
- Gu - liczba Guchmana,
- Sc - liczba Schmidta.

Ponieważ proces parowania wody z powierzchni wyrobiska i wewnątrz górotworu jest także uzależniony od temperatury i wilgotności pierwotnej górotworu, a także od jego porowatości oraz ciśnienia eksploatacyjnego panującego wokół danego wyrobiska, dlatego powyższe zależności należy dodatkowo uzupełnić o parametry zawierające:

- temperaturę pierwotną górotworu i powietrza wlotowego w postaci parametru temperaturowego $K = \frac{T_B - T_A}{T_B}$,
- głębokość zalegania wyrobiska od powierzchni (H).

Ponadto wyrobiska górnicze ze względu na czas przewietrzania oraz źródła wilgoci i ciepła można zestawiać w czterech charakterystycznych grupach:

1. Szyby - wyrobiska, które charakteryzują się:
 - długim okresem przewietrzania,
 - znacznym przyrostem temperatury powietrza spowodowanym zmianą ciśnienia atmosferycznego wraz z głębokością szybu,
 - objętościowym odparowaniem wody,
 - utrudnioną wymianą ciepła i wilgoci między przepływającym powietrzem a górotworem ze względu na istniejącą dość grubą i szczelną obudowę.
2. Wyrobiska kamienne (przekopy, przecznice) - o stosunkowo długim okresie przewietrzania, cechujące się niewielką wymianą ciepła i wilgoci między powietrzem i górotworem. W wyrobiskach tych istnieje możliwość akumulacji ciepła w okresie letnim oraz wydzielanie ciepła w zimie. Wyrobiska te mogą w niekorzystnych warunkach tektonicznych cechować się znacznym dopływem wody pochodzącej z procesów filtracji.
3. Wyrobiska węglowe, wewnątrzoddziałowe charakteryzujące się krótkim okresem przewietrzania. Wyrobiska te ponadto cechuje: wzmożona wymiana ciepła i wilgoci między: przepływającym powietrzem, otaczającym górotworem oraz transportowanym urobkiem. W wyrobiskach tych w zależności od długości oraz koncentracji wydobycia w przylegających ścianach będą zabudowane lokalne źródła ciepła takie jak: napędy przenośników, kruszarek, pomp oraz transformatory. W wyrobiskach tych będzie działało szereg zraszaczy. Ponadto środki odstawy urobku rozmieszczone przy spągu skomplikują charakter ruchu powietrza oraz wymiany ciepła i wilgoci.

4. Ściany - wyrobiska o bardzo krótkim okresie przewietrzania (wychładzania) - cechujące się wzmożoną wymianą ciepła i wilgoci między górotworem a powietrzem. Wyrobiska stosunkowo krótkie, w którym pracują maszyny i urządzenia wyposażone w silniki dużej mocy. Wyrobiska, w których niezależnie od rodzaju obudowy największe prędkości powietrza obserwuje się przy urabianym ociosie węglowym. Wokół ścian panują największe ciśnienia górotworu zniekształcające typowe procesy wymiany ciepła i wilgoci. Ponadto w przypadku pokładów metanowych dodatkowo komplikuje zagadnienie wydzielający się metan.

Dokonany podział wyrobisk pozwoli na pełniejszy opis podanych zjawisk zachodzących w wyrobiskach przez przyjęte liczby kryterialne.

5.2. Analiza danych pomiarowych z kopalń węgla kamiennego GZW

W celu uzyskania zależności empirycznych służących do wyznaczenia funkcji (5.1)-(5.5) opisujących proces wymiany wilgoci w wyrobiskach górniczych wykonano w kopalniach Zagłębia Górnośląskiego pomiary:

- temperatury powietrza mierzonej termometrem suchym i wilgotnym na wlocie i wylocie z wyrobiska (t_s , t_w),
- średnicy, przekrojów i długości wyrobisk (d , A , s),
- odczytano z map pokładowych średnie głębokości zalegania wyrobisk (H),
- obliczono, zmierzono lub zebrano dane dotyczące temperatury pierwotnej skał (τ^*),
- pomierzono prędkości powietrza w wyrobisku (w),

Pomiarami objęto następujące kopalnie: Anna (1), Borynia (2), Chwałowice (3), Dymitrow (4), Jastrzębie (5), Kazimierz-Juliusz (6), Manifest Lipcowy (8), Moszczenica (9), Marcel (7), Powstańców Śl. (10), Piast (12), 1 Maja (11), Rymer (13), Staszic (14), Sołonica (15), XXX-lecia PRL (16), Zabrze (17), Ziemowit (18), Makoszowy (19), Petrowski (20), Szombierki (21).

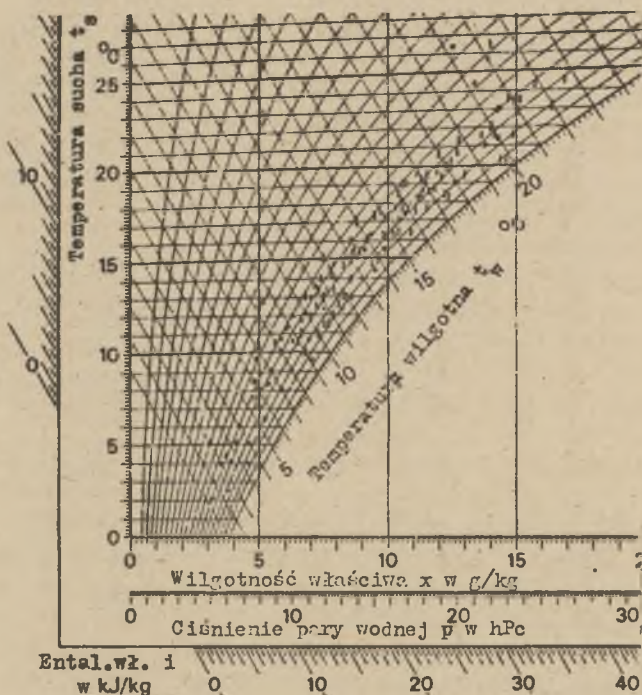
Wyniki pomiarów zestawiono w zależności od rodzaju wyrobiska w tabelkach 1-4 zamieszczonych w załączniku. Dla łatwiejszej interpretacji parametrów klimatycznych panujących w danych wyrobiskach, wyniki pomiarów zestawiono na wykresie Molliera i-x (rys. 4-7).

W przypadku szybów pomiarami objęto okres, kiedy nie podgrzewano powietrza wlotowego, natomiast w pozostałych wyrobiskach pomiary wykonano niezależnie od temperatury powietrza w okresie trzech lat.

Analiza wyników uzyskanych z pomiarów

a) S z y b y

Parametry klimatyczne powietrza w szybach w zależności od pory roku (bez okresu podgrzewania powietrza wlotowego) zawarte są w przedziałkach (rys. 4):



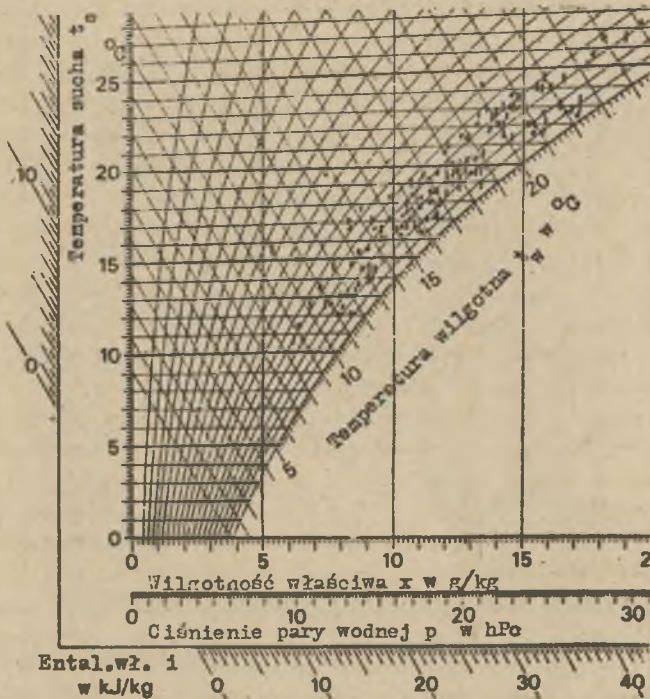
Rys. 4. Wyniki pomiarów warunków klimatycznych w szybach

- Temperatura powietrza mierzona termometrem suchym zawiera się w przedziale 2-26, 4°C, a termometrem wilgotnym w przedziale 1,2 - 24°C.
- Maksymalny przyrost temperatury powietrza $\Delta t = 14$ K stwierdzono na kop. Szombierki, natomiast maksymalny spadek temperatury $\Delta t = 6$ K stwierdzono na kop. Petrowski. Długość obserwowanych szybów wynosiła $200 < H < 930$ m.
- Wilgotność względna powietrza wlotowego wahała się w granicach $40 < \varphi < 93\%$, natomiast wilgotność powietrza na podszyciu wynosiła $64 < \varphi < 98\%$. Maksymalny przyrost wilgotności względnej stwierdzono na kop. Petrowski $\Delta\varphi = 51\%$, a maksymalny spadek wilgotności na kop. Staszic $\Delta\varphi = 15\%$. Natomiast przyrost wilgotności względnej liczonej na 100 m szybu zawarty był w przedziale - 4,1% na kop. Piast do + 9,1% na kop. Powstańców Śląskich.
- Wilgotność właściwa powietrza wlotowego wahała się w granicach $3 < x < 18$ g/kg. Wilgotność właściwa powietrza na podszyciu wynosiła $4,9 < x < 18,7$ g/kg. Maksymalny przyrost wilgotności właściwej stwierdzono na kop. Szombierki $\Delta x = 7,2$ g/kg oraz maksymalny spadek wilgotności (kondensacja pary) stwierdzono na kop. Petrowski $\Delta x = -6$ g/kg. Natomiast zmiana wilgotności właściwej liczonej na 100 m szybu zawierała się w przedziale od -0,8 g/kg na kop. Marcel do 1,7 g/kg na kop. Makoszowy.

Ogólnie można stwierdzić, że wilgotność względna powietrza w szybach zawierała się w przedziale $70 < \varphi < 90\%$, a temperatura powietrza nie przekazywała $26,4^{\circ}\text{C}$.

b) W y r o b i s k a k a m i e n n e (p r z e k o p y, p r z e c z n i c e)

Parametry klimatyczne powietrza w wyrobiskach kamiennych niezależnie od pory roku zawarte są w mniejszym przedziale niż w szybach (rys. 5):



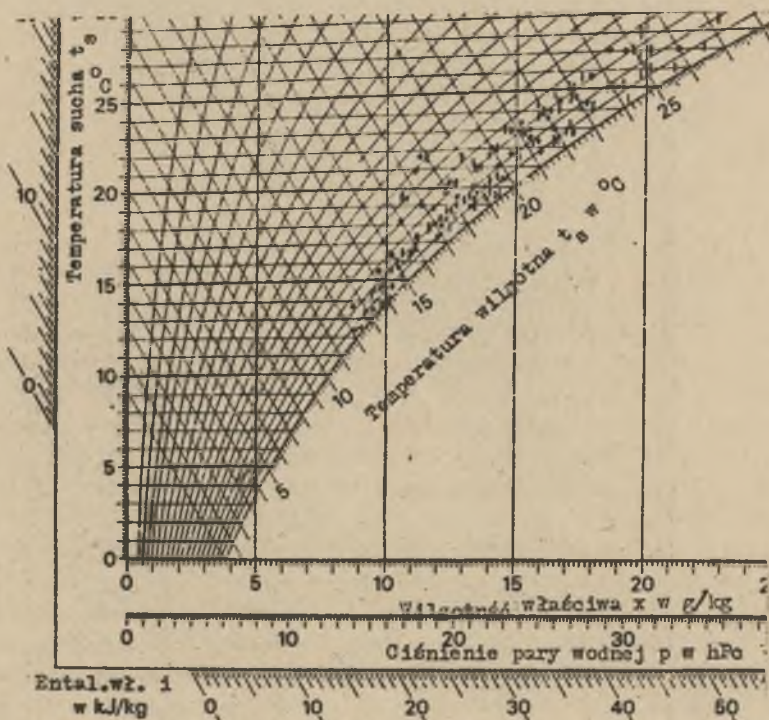
Rys. 5. Wyniki pomiarów warunków klimatycznych w wyrobiskach kamiennych

- Temperatura powietrza zmieniała się w granicach $10 < t_g < 27,1^{\circ}\text{C}$. Długość obserwowanych wyrobisk zawarta była w przedziale $100 < s < 3500 \text{ m}$.
- Wilgotność względna powietrza zawierała się w przedziale $48 < \varphi < 98\%$, przy czym przeważająca ilość wyrobisk przewietrza powietrze o wilgotności $75 < \varphi < 95\%$. Przyrost wilgotności względnej wynosi $-14 < \Delta\varphi < 11,2\% / 100$ mb wyrobiska.
- Wilgotność właściwa powietrza, jak wynika z rys. 5, zawarta jest w przedziale $5,4 < x < 19,6 \text{ g/kg}$. Przyrost wilgotności właściwej wynosi $0,4 < \Delta x < 6,3 \text{ g/kg} / 100 \text{ mb}$ wyrobiska.

Ogólnie można stwierdzić, że parametry klimatyczne powietrza przewietrzającego wyrobiska kamienne pogarszają się w wyniku przyrostu temperatury i wilgotności przy równoczesnym zawężaniu przedziału zmian parametrów. Obserwuje się także większe przyrosty wilgotności względnej i właściwej w odniesieniu do 100 mb wyrobiska.

c) Chodniki węglowe

W grupie tej zawarte są wyrobiska wykonane w węglu i przeznaczone do odstawy urobku. Parametry klimatyczne powietrza przewietrzającego te wyrobiska zestawiono na rys. 6.



Rys. 6. Wyniki pomiarów warunków klimatycznych w wyrobiskach węglowych

Z porównania rys. 4 i 5 wynika, że parametry klimatyczne powietrza uległy dalszemu pogorszeniu, przy czym obserwuje się dalsze zawężenie przedziałów ich zmian:

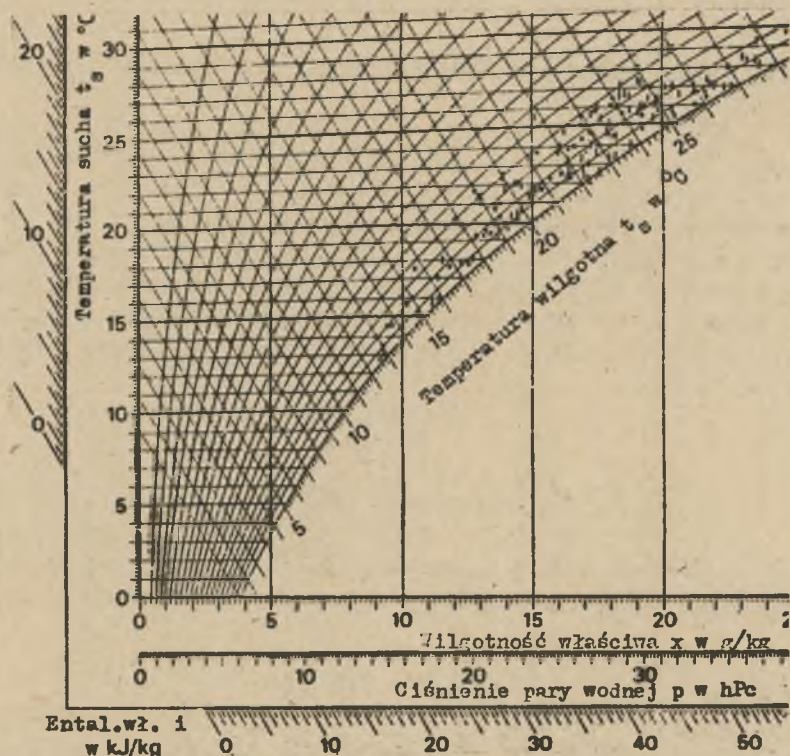
- Temperatura powietrza zmienia się w granicach $12,4 < t_s < 28,4^{\circ}\text{C}$; długość chodników wynosiła $100 < x < 1830 \text{ m}$,
- Wilgotność względna powietrza zawarta jest w granicach $68 < \varphi < 100\%$, przy czym przeważającą ilość wyrobisk przewietrza powietrze o wilgotno-

ści $80 < \varphi < 100$; przyrost wilgotności w odniesieniu do 100 mb wyrobiska zawarty jest w przedziale $- 4,3 < \Delta \varphi' < 4,7\%$.

- Wilgotność właściwa powietrza zmienia się w granicach $8,3 < x < 23,1$ g/kg. Przyrost wilgotności właściwej zawarty jest w przedziale $-1,2 < \Delta x' < 6$ g/kg/100 mg wyrobiska.

d) Wyrobiska ścianowe

Parametry klimatyczne powietrza przewietrzającego wyrobiska ścianowe przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Wyniki pomiarów warunków klimatycznych w ścianach

Należy dodać, że ze względu na trudności obiektywne nie wykonano pomiarów w szeregu ścian posiadających trudne warunki klimatyczne. Z porównania wyników parametrów klimatycznych przedstawionych na rys. 4, 5, 6 i 7 wynika, że warunki klimatyczne uległy dalszemu pogorszeniu:

- Temperatura powietrza w wyrobiskach ścianowych waha się w granicach $12,8 < t_s < 29,8^{\circ}\text{C}$, przy czym przeważająca ilość ścian posiada temperaturę powyżej 20°C . Należy dodać, że rozpatrywane ściany były położone

- na głębokości $200 < H < 950$ m, a temperatura pierwotna górotworu wynosiła $12 < t < 34^{\circ}\text{C}$. Długość wyrobisk ścianowych wynosiła $80 < s < 200$ m.
- Wilgotność względna powietrza zawarta była w przedziale $72 < \varphi < 100\%$, przy czym przy wyższych temperaturach powietrza rozrzut wilgotności był większy. Przeważająca ilość wyrobisk przewietrzało powietrze o wilgotności $80 < \varphi < 100\%$. Przyrost wilgotności względnej w odniesieniu do 100 m wyrobiska był zawarty w przedziale $-6 < \Delta\varphi' < +6\%$.
 - Wilgotność właściwa powietrza była zawarta w przedziale $9 < x < 24,8$ g/kg. Przyrost wilgotności właściwej w odniesieniu do 100 m wyrobiska wynosił $-0,7 < \Delta x' < 5$ g/kg.

5.3. Przygotowanie danych pomiarowych do analizy procesu nawilżania powietrza

W celu przeprowadzenia analizy czynników kształtujących wilgotność powietrza w wyrobiskach górniczych dane zestawione w tablicach 1-4 (zamieszczonych w dodatku) opracowano w następujący sposób:

- a) Odczytano z wykresu Molliera i - x wilgotności względne powietrza na wlocie i wylocie z wyrobiska, mając daną temperaturę powietrza mierzoną termometrem suchym i wilgotnym oraz danego ciśnienia atmosferycznego powietrza. Następnie obliczono przyrost wilgotności względnej powietrza wg zależności:

$$\Delta\varphi' = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{s} \quad \%/100 \text{ mb} \quad (5.5)$$

- b) Odczytano z wykresu i - x wilgotności właściwe powietrza i obliczono przyrosty wilgotności w wyrobisku wg zależności:

$$\Delta x = \frac{x_2 - x_1}{s} \quad \text{g/kg } 100 \text{ mb} \quad (5.6)$$

- c) Odczytano z wykresu i - x entalpię właściwą powietrza oraz obliczono współczynnik parowania wody wg zależności:

$$o = \frac{c_p(t_{s2} - t_{s1})}{i_2 - i_1} \quad (5.7)$$

- d) Zakładając, że proces nawilżenia powietrza w wyrobiskach górniczych charakteryzują parametry (w , d , H , φ , t_s , t_w , D , λ_p , ρ_p , c_p , μ_p) posia-

dające wymiary (m, J, kg, s, K), stosując analizę wymiarową [6, 12, 22, 33, 38, 74], zgodnie z twierdzeniem π ilość bezwymiarowych liczb wyniesie:

$$k = m - n = 11 - 5 = 6$$

gdzie:

m -- ilość wielkości mianowanych charakteryzujących dane zjawisko,

n -- ilość wymiarów podstawowych.

Poszukiwane wielkości (Nu' , $\Delta x'$, $\Delta \varphi'$, c) opisze zależność typu:

$$y = A Re^a Pr^b Sc^c Gu^d H^e K^f \quad (5.8)$$

Po zlogarytmowaniu powyższej zależności uzyskano zależność, która była podstawą do analizy:

$$\lg y = \lg A + a \lg Re + b \lg Pr + c \lg Sc + d \lg Gu + e \lg H + f \lg K \quad (5.9)$$

Analiza wpływu poszczególnych członów zależności (5.9) pozwoliła ustalić liczby bezwymiarowe decydujące o wielkości (Nu' , $\Delta x'$, $\Delta \varphi'$, i c).

e) Obliczono liczbę Re wg zależności:

$$Re = \frac{wd}{\nu}, \quad (5.10)$$

przy czym przyjęto $\nu = \text{const}$ dla danego przedziału temperatur. Średnicę wyrobisk (d) przejęto jako średnicę hydrauliczną zgodnie z pracami [7, 33].

f) Liczba Guchmana obliczono z zależności:

$$Gu = \frac{T_s - T_w}{T_s} \quad (5.11)$$

gdzie:

T_s , T_w -- średnie arytmetyczne temperatury powietrza mierzone na wlocie i wylocie z wyrobiska termometrem suchym (T_s) i wilgotnym (T_w).

g) Liczbę Nusselta charakteryzującą wymianę masy obliczono z zależności:

$$Nu' = \frac{B\alpha}{D} \quad (5.12)$$

Współczynnik dyfuzji D , zgodnie z badaniami przeprowadzonymi przez Schirmera [76], obliczono z zależności:

$$D = 0,083 \frac{9,81 \cdot 10^4}{p} \left(\frac{T}{273}\right)^{1,8}, \text{m}^2/\text{h} \quad (5.13)$$

Natomiast współczynnik przejmowania masy β z przekształconej zależności (4.13) do postaci:

$$\beta = \frac{\dot{m}_p R T}{p - p_n}, \text{m/s} \quad (5.14)$$

Gęstość strumienia masy obliczono z zależności:

$$\dot{m}_p = (x_2 - x_1) \dot{V} \rho \frac{1}{A}, \text{kg/m}^2\text{s}, \quad (5.15)$$

gdzie:

\dot{V} - wydatek objętościowy powietrza, m^3/s ,

ρ - gęstość powietrza, kg/m^3 ,

A - powierzchnia wyrobiska, m^2 .

h) Parametr temperaturowy K obliczono z zależności:

$$K = \frac{T_g - T_n}{T_n} \quad (5.16)$$

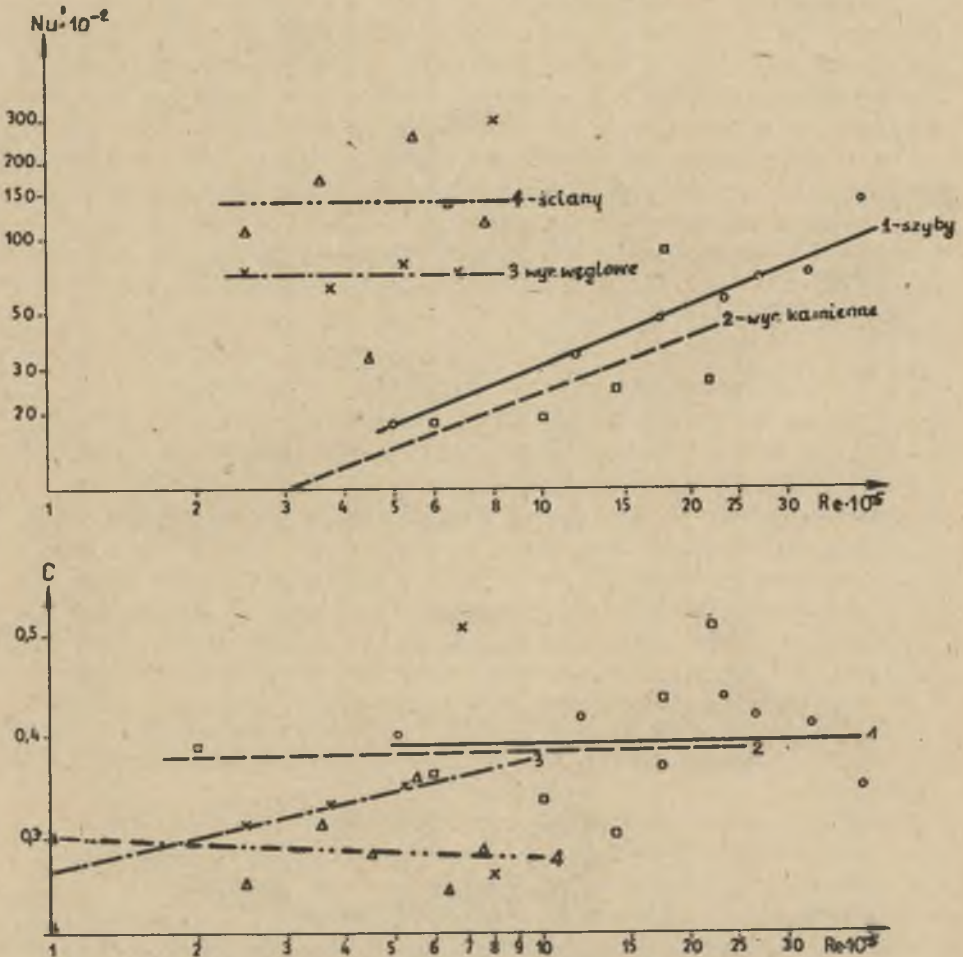
Dla wyrobisk pionowych i wyrobisk nachylonych przyjmowano jako średnią arytmetyczną temperaturę górotworu na wlocie i wylocie wyrobiska. Natomiast temperaturę powietrza T_g w każdym przypadku przyjmowano jako średnią arytmetyczną temperatur powietrza wlotowego i wylotowego [6, 33].

- 1) Przy statystycznym opracowaniu rezultatów uzyskanych po wykonaniu przeliczeń wg zależności (5.5), (5.6), (5.7), (5.10), (5.11), (5.12), (5.16), korzystano z wytycznych podanych w pracach [13, 22, 73, 75].
- 2) Wartości liczb Pr, Sc ze względu na niewielkie zmiany w badanym przedziale temperatur przyjęto jako stałe.
- 3) Uzyskane wyniki wg zależności (5.9) przedstawiono w tablicach 1-4 oraz na rys. 8-14.

5.4. Analiza wpływu parametrów bezwymiarowych na proces nawilżenia powietrza

5.4.1. Wpływ prędkości powietrza na wymianę wilgoci w wyrobiskach górniczych

W celu określenia wpływu prędkości powietrza, na wielkość Nu' , $\Delta\varphi'$, $\Delta x'$, i c zestawiono wyniki obliczeń zależności (5.12), (5.5), (5.6), (5.10) w tabl. 1 oraz przedstawiono graficznie na rys. 8. Przedziały liczby Re dobierano tak, by uzyskać minimum 5 punktów na wykresie oraz by w każdym przedziale znalazła się odpowiednia ilość danych.



Rys. 8. Wpływ liczby Reynoldse na wielkość Nu' i współczynnik c

Tablica 1

Wpływ liczby Reynoldsa na wielkość Nu' , $\Delta x'$, $\Delta \varphi'$, c

Lp.	Wyszczególn.	Zakres $Re \cdot 10^{+5}$							Zakres zmian
		0-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-40	40	
1	Zakres RE Szybły	0-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-40	40	
2	Ilość pom.	12	44	18	8	7	9	3	
3	$Nu' \cdot 10^{-3}$	1,8	3,4	4,8	5,8	6,9	7,0	15	13,2
4	$\Delta \varphi'$	0,6	0,4	1,7	0,6	0,7	1,7	1,3	1,1
5	c	0,42	0,42	0,37	0,44	0,42	0,41	0,35	0,09
6	$\Delta x'$	0,5	0,5	0,7	0,6	0,7	0,9	0,7	0,4
	Wyrobiska kamiennie								
7	Zakres Re	0-4	4-8	8-12	12-16	16-20	20	-	
8	Ilość pom.	12	41	23	20	10	4	-	
9	$Nu' \cdot 10^{-3}$	0,6	1,8	1,9	2,5	9,5	2,7	-	9,0
10	$\Delta \varphi'$	0,2	0,2	0,3	0,8	0,6	-0,3	-	1,1
11	c	0,39	0,36	0,34	0,3	0,44	0,51	-	0,21
12	$\Delta x'$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	-	0,1
	Wyrobiska węglowe								
13	Zakres Re	0-2	2-3	3-4,5	4,5-6	6-7,5	7-5	-	
14	Ilość pom.	20	23	15	9	5	4	-	
15	$Nu' \cdot 10^{-3}$	7,6	7,4	6,4	8,0	7,3	30	-	23,4
16	$\Delta \varphi'$	0	-0,1	0,5	0,6	0,4	0,4	-	0,7
17	c	0,21	0,31	0,33	0,35	0,51	0,26	-	0,30
18	$\Delta x'$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	-	0,1
	Ściany								
19	Zakres Re	0-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7	
20	Ilość pom.	21	37	11	4	6	4	2	
21	$Nu' \cdot 10^{-3}$	13	10,7	17,1	3,4	26	13,8	11,2	22,6
22	$\Delta \varphi'$	1,1	1	0,1	1,2	0,1	0,5	1,3	1,2
23	c	0,3	0,25	0,31	0,28	0,35	0,24	0,28	0,07
24	$\Delta x'$	1,5	1,5	1,5	0,3	1,5	1,1	1,2	1,2

W tabl. 1 podano także ilość wyrobisk, które obejmuje dany przedział liczby Re. Z tablicy wynika, że najczęściej wyrobisk zawartych jest w przedziale Re:

- 1000000 < Re < 1500000 - 44, w przypadku szybów,
- 400000 < Re < 800000 - 41, w przypadku wyrob. kamiennych,
- 200000 < Re < 300000 - 23, w przypadku wyrob. węglowych,
- 200000 < Re < 300000 - 37, w przypadku ścian.

Z rys. 8a wynika, że zmiana liczby Re nie powoduje zmiany liczby Nu' w przypadku chodników węglowych i ścian, natomiast powoduje wzrostu Nu' w

przypadku szybów i wyrobisk kamiennych. Świadczy to o tym, że współczynnik wymiany masy określony przez Nu' podlega różnym prawom zależności od typu wyrobiska. Ponadto wartość wykładnika przy Re dla szybów i wyrobisk kamiennych przyjmuje inną wartość niż podaje Szczerbań [83, 84], Hobler [33] czy Fiedorow [88]. Fakt ten można tłumaczyć następująco: podana zależność w większości przypadków dotyczy przewodów o małych przekrojach oraz o małej chropowatości bezwzględnej. Wyrobiska górnicze cechują się natomiast dużymi przekrojami, małymi prędkościami powietrza oraz dość grubą warstwą przysięnną, tzn., że między przepływającym powietrzem a ścianką górotworu wymieniającą ciepło i wilgoć istnieje gruba warstwa powietrza wypełniająca szczeliny i pustki w obudowie wyrobiska. Wskutek tego ruch powietrza oraz ruch pary wodnej w obrębie obudowy odbywa się na drodze konwekcji naturalnej. Ponadto w chodnikach podścianowych i w ścianach rozmieszczone środki odstawy urobku (taśmociągi) powodują częściową izolację spągu od strugi przepływającego powietrza.

W związku z tym ważną rolę odgrywają tutaj wymiana masy na drodze konwekcji naturalnej. Natomiast szyby cechują się tym, że nie ma pustek między górotworem a obudową, dlatego można traktować obudowę jako górotwór stykający się bezpośrednio z przepływającym powietrzem. Podobnie jest w wyrobiskach kamiennych, gdzie w wyniku długiego czasu istnienia wyrobiska górotwór szczelnie dotyka do obudowy. Badania nad wpływem liczby Re na opór hydrauliczny przewodu wykazały, że przy dużych liczbach Re decydujący wpływ na opór hydrauliczny ma szorstkość ścian [7, 19, 55, 71]. Wydaje się więc, że analogicznie na wymianę ciepła i masy w wyrobiskach górniczych może mieć także wpływ szorstkość ścian. Uzyskane wartości liczby Nu' są zawarte w przedziale wyników uzyskanych przez Nesterenke [65].

Na rys. 8b pokazano wpływ liczby Re na wielkość współczynnika wymiany wilgoci c [101]. Z rysunku wynika, że dla szybów oraz wyrobisk kamiennych wartość współczynnika c nie zależy od Re . Natomiast dla chodników węglowych wzrost Re powoduje wzrost współczynnika c . Z tablicy 1 wynika, że liczba Re nie ma zasadniczego wpływu na wielkość zmian wilgotności względnej $\Delta\varphi'$ i wilgotności właściwej $\Delta x'$. Zauważa się natomiast, że wielkość $\Delta\varphi'$ i $\Delta x'$ zależy od typu wyrobiska. W przypadku wilgotności względnej widać, że $\Delta\varphi'$ maleje na drodze od wlotu do kopalni do wylotu ze ściany w granicach $1,7 > \Delta\varphi' > 0,01$ %/100 mb wyrobiska.

W przypadku wilgotności właściwej najmniejszy przyrost $\Delta x'$ zachodzi w wyrobiskach kamiennych a największy w ścianach w przedziale $0,1 < \Delta x' < 1,5$ g/kg/100 mb wyrobiska.

5.4.2. Wpływ temperatury powietrza na wymianę wilgoci w wyrobiskach górniczych

Temperatura powietrza mierzona termometrem suchym i wilgotnym decyduje o wartości liczby Gu zgodnie z zależnością (5.11), której wartości zestawiono w tablicy 2 oraz na rys. 9 i 10.

Tablica 2

Wpływ liczby Guchmena na wielkość Nu' , $\Delta x'$, $\Delta \varphi'$, c

Lp.	Wyszczególn.	Przedział wartości $Gu \cdot 10^{-3}$								Zakres zmian
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-11	11	
	Szyby									
	Zakres Gu	0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-11	11	
1	Ilość pom.	1	-	13	22	41	20	4	6	
2	$Nu' \cdot 10^{-3}$	18	-	7,9	5,3	3,8	3,5	2,7	3,8	15,3
3	$\Delta \varphi'$	0,3	-	0,8	0,1	0,7	0,8	1,5	4,3	4,2
4	c	0,39	-	0,41	0,42	0,41	0,41	0,46	0,23	0,19
5	$\Delta x'$	0,6	-	0,7	0,4	0,5	0,3	0,5	0,7	0,4
	Wyrobiska kamiennie									
6	Ilość pom.	-	-	17	37	31	20	4	-	
7	$Nu' \cdot 10^{-3}$	-	-	3,4	1,3	1	0,9	5	-	4,1
8	$\Delta \varphi'$	-	-	0	0,4	0,1	0,2	1,2	-	1,2
9	c	-	-	0,33	0,32	0,3	0,32	0,23	-	0,1
10	$\Delta x'$	-	-	0,4	0,2	0,1	0,3	0,3	-	0,3
	Wyrobiska węglowe									
11	Ilość pom.	6	13	21	15	15	4	3	-	
12	$Nu' \cdot 10^{-3}$	19	16	13	8	6	4	3	-	16
13	$\Delta \varphi'$	0,2	0,2	0,5	0,2	0,2	-0,7	0,8	-	1,5
14	c	0,24	0,31	0,31	0,3	0,34	0,4	0,31	-	0,16
15	$\Delta x'$	0,2	0,6	0,6	0,4	0,3	0,3	0,7	-	0,5
	Ściany									
16	Ilość pom.	8	11	17	22	12	15	-	-	
17	$Nu' \cdot 10^{-3}$	24	16	16	9	4	2	-	-	22
18	$\Delta \varphi'$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-	-	0
19	c	0,28	0,25	0,27	0,26	0,26	0,28	-	-	0,03
20	$\Delta x'$	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,1	-	-	0,2

Z tablicy 2 wynika, że najczęściej wyrobisk przewietrza powietrze o wartości liczby Gu :

0,005 < Gu < 0,007 - 41 w przypadku szybów,

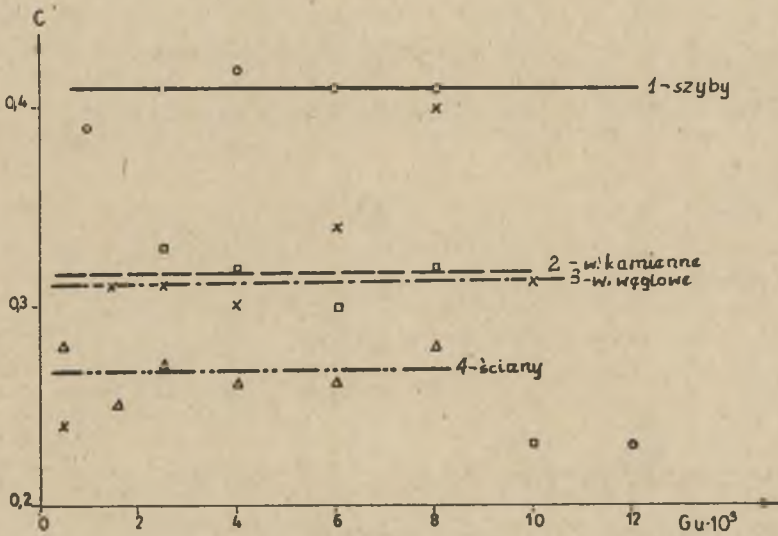
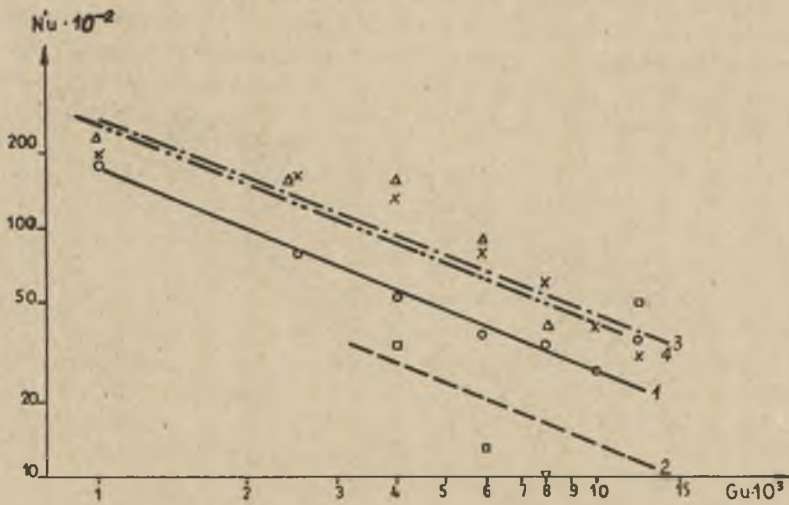
0,003 < Gu < 0,007 - 37 w przypadku wyrobisk kamiennych,

0,002 < Gu < 0,003 - 21 w przypadku wyrobisk węglowych,

0,003 < Gu < 0,005 - 22 w przypadku ścian.

Z rys. 9a wynika, że wzrost liczby Gu powoduje zmniejszenie Nu' . Stan ten można wytłumaczyć następująco: wzrost liczby Gu oznacza wzrost różnicy temperatury mierzonej termometrem suchym i wilgotnym, a więc powoduje zwiększenie różnicy prężności pary powietrza nasyconego i nienasyconego.

Większa różnica ciśnień zgodnie z zależnością (5.14) powoduje zmniejszenie β , a więc i liczby Nu' .

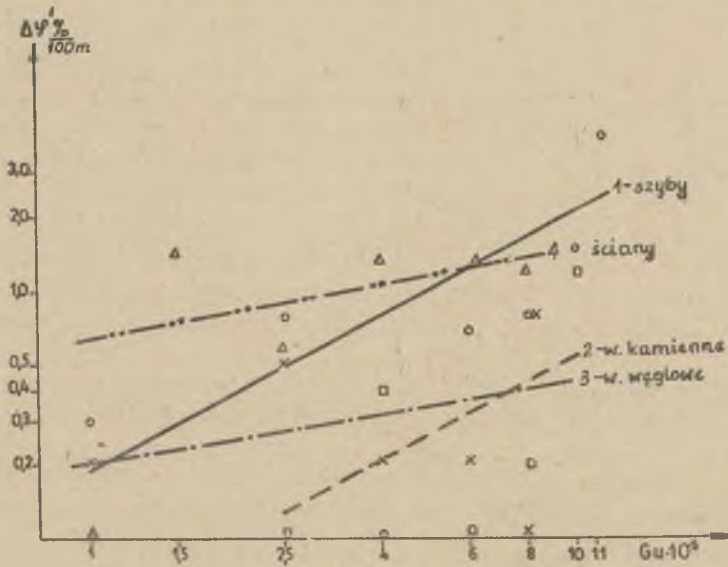
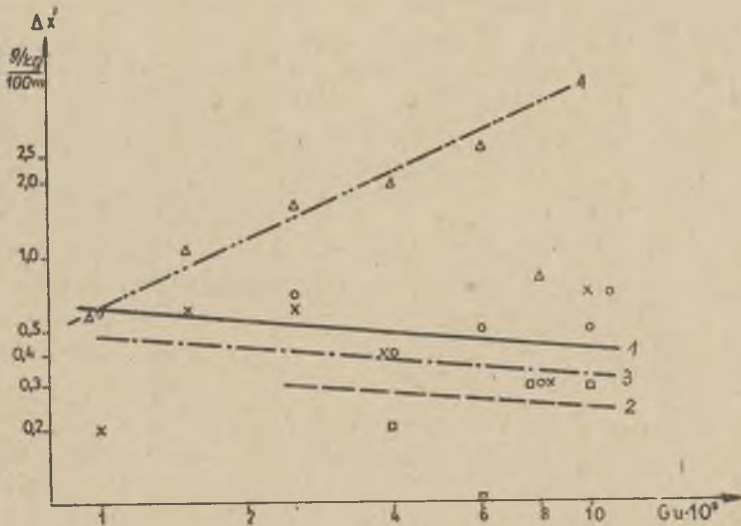


Rys. 9. Wpływ liczby Guchmana na wielkość Nu' i współczynnik c

Ponieważ w ścianach i chodnikach węglowych obserwuje się największe wilgotności względne, dlatego dla tych wyrobisk wpływ liczby Gu na wielkość Nu' jest największy.

Z rys. 9b wynika, że liczba Gu nie ma wpływu na wielkość współczynnika c . Największą wartość współczynnika c przyjmuje w szybach, a najmniejszą w

ścianach. Decydują o tym źródła ciepła. W szybach przyrost temperatury spowodowany jest wzrostem ciśnienia atmosferycznego, a więc przyrost energii wewnętrznej następuje bez udziału źródeł zewnętrznych, natomiast w ścianach mamy raczej do czynienia z rozprężaniem powietrza (powietrze płynie po wzniosie), a źródłem ciepła jest górotwór i pracujące maszyny.



Rys. 10. Wpływ liczby Guchmana na przyrost wilgotności właściwej Δx i wilgotności względnej $\Delta \varphi$

Dlatego procesowi wymiany ciepła towarzyszy bezpośrednio proces parowania wody.

Z rys. 10a wynika, że liczba G_u ma wpływ na wielkość przyrostu $\Delta x'$. Charakter zmian $\Delta x'$ zależy jednak od typu wyrobiska. W ścianach obserwuje się wzrost $\Delta x'$ wraz ze wzrostem G_u , natomiast w pozostałych wyrobiskach $\Delta x'$ maleje. Stan ten należy tłumaczyć tym, że w ścianach mamy najwyższe temperatury powietrza i wilgotności. W związku z tym niewielkim zmianom temperatury powietrza towarzyszy intensywne parowanie wody.

Ponadto w ścianach poważnym źródłem ciepła i wilgoci jest górotwór, natomiast w pozostałych wyrobiskach główne źródła ciepła to lokalne źródła rozłożone lub punktowe, które w pierwszej kolejności podnoszą energię wewnętrzną powietrza suchego, a dopiero w sposób pośredni powodują proces parowania wody. W ten sposób szybko wzrasta liczba G_u , przy stosunkowo niewielkim wzroście $\Delta x'$.

Z rys. 10b wynika, że wzrost liczby G_u powoduje wzrost $\Delta \varphi'$. Szczególnie intensywny przyrost $\Delta \varphi'$ obserwuje się w szybach. Stan taki można tłumaczyć tym, że przy małych liczbach G_u mamy do czynienia z powietrzem o dużej wilgotności względnej. Przy $G_u = 0$ $\varphi = 100\%$. W tych samych warunkach przyrost wilgotności względnej będzie mniejszy w wyrobisku, w którym powietrze charakteryzuje mniejsza liczba G_u , gdyż powietrze może przjąć mniejszą ilość wilgoci. Dlatego w okresie letnim w szybach wdechowych powietrze wlotowe o stosunkowo niewielkiej wilgotności (dużej liczbie G_u) ulega znacznemu nawilżeniu.

5.4.3. Wpływ głębokości położenia wyrobiska na proces wymiany wilgoci

Dotychczas w literaturze górniczej wpływ głębokości ujmowano tylko w celu określenia zmiany ciśnienia atmosferycznego i jej wpływu na gęstość, wilgotność właściwą i entalpię właściwą powietrza. Obserwacje wykonane w kopalniach GZW wykazały, że zmiana głębokości położenia wyrobiska ma także wpływ na wielkość $Nu', \Delta \varphi', G_u, \Delta x', c$. Przy czym wielkość zmian $Nu', \Delta \varphi', G_u, \Delta x', c$ z tytułu zmiany głębokości przewyższa kilkakrotnie zmiany spowodowane zmianą ciśnienia atmosferycznego (maksymalna różnica ciśnienia w badanych wyrobiskach wynosi 12%, a maksymalne zmiany entalpii właściwej wynoszą 6%). Wyniki obliczeń wpływu głębokości na $Nu', \Delta \varphi', \Delta x'$ i c zamieszczono w tabelicy 3 oraz przedstawiono graficznie na rys. 11, 12 i 14.

Z rys. 11a wynika, że wraz ze wzrostem głębokości maleje wartość liczby Nu' . Jest to wynik wzrostu różnicy prężności pary wodnej, przy zachowaniu tej samej wilgotności względnej oraz w wyniku podwyższenia temperatury powietrza. Na wykresie Molliera, $i-x$ (rys. 4) wyraźnie można zauważyć, że w wyniku wzrostu temperatury powietrza maleje kąt nachylenia krzywych $\varphi = \text{const}$.

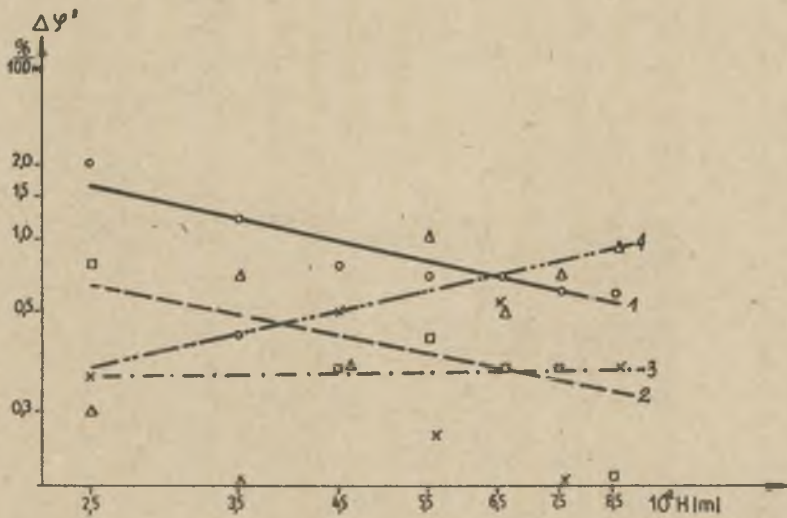
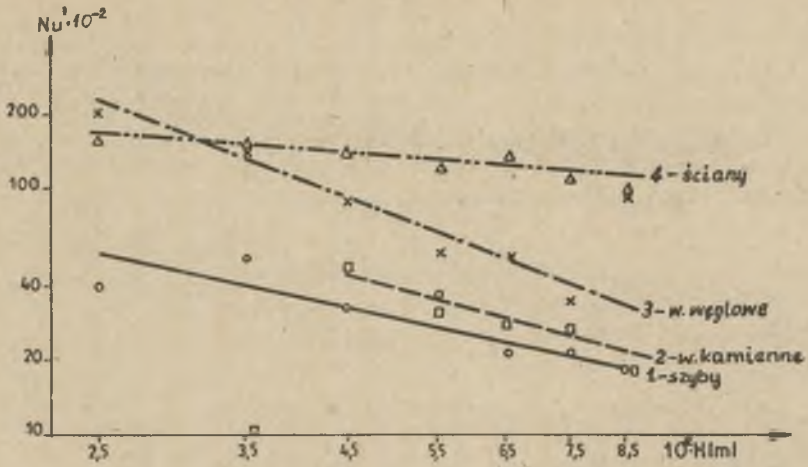
Wynika stąd, że dla takiej samej różnicy wilgotności względnej przy wyższych temperaturach powietrza wzrasta różnica prężności pary wodnej, a więc maleje współczynnik wymiany masy β .

Tablica 3

Wpływ głębokości zalegania wyrobiska na wielkość Nu' , $\Delta x'$, $\Delta\varphi'$, c

Lp.	Wyszczególn.	Głębokość $H \cdot 10^{-2}$ (m)						Zakres zmian	
		3	4	5	6	7	8		
Szyby									
1	Ilość pom.	8	11	15	28	17	24	8	
2	$Nu' \cdot 10^{-3}$	4	5,2	3,4	3,9	2,1	2,1	1,8	3,4
3	$\Delta\varphi'$	2	1,2	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	1,4
4	c	0,42	0,4	0,38	0,39	0,37	0,38	0,35	0,07
5	$\Delta x'$	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4	0,2
Wyrobiska kamienne									
6	Ilość pom.	8	5	15	35	21	8	8	
7	$Nu' \cdot 10^{-3}$	-0,3	0	7,2	3,2	2,9	2,7	1,8	7,5
8	$\Delta\varphi'$	0,8	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,1	0,7
9	c	0,42	0,35	0,34	0,31	0,29	0,29	0,28	0,14
10	$\Delta x'$	0,3	0,7	0,9	1,2	1,5	1,7	1,7	1,4
Wyrobiska węglowe									
11	Ilość pom.	9	8	9	17	15	12	7	
12	$Nu' \cdot 10^{-3}$	20	14	8,5	5,5	5,4	3,5	8,8	16,5
13	$\Delta\varphi'$	0,3	0,1	0,5	0,2	0,5	-0,1	0,3	0,6
14	c	0,31	0,37	0,29	0,31	0,3	0,32	0,25	0,12
15	$\Delta x'$	0,4	0,5	0,5	0,4	0,3	0,4	0,5	0,2
Ściany									
12	Ilość pom.	10	7	9	24	17	7	6	
13	$Nu' \cdot 10^{-3}$	16	15	14	13	13	11	9	6
14	$\Delta\varphi'$	0,2	0,7	0,3	1	0,5	0,7	0,9	0,8
15	c	0,33	0,29	0,3	0,29	0,3	0,25	0,25	0,08
16	$\Delta x'$	0,9	1	1,3	1,9	1,5	1,1	0,9	1

Z rys. 11b wynika, że wzrost głębokości powoduje zmniejszenie przyrostu $\Delta\varphi'$ w szybach i przekopach oraz wzrost $\Delta\varphi'$ w ścianach. Fakt ten można tłumaczyć tym, że w szybach na odcinku wlotowym następuje szybkie nawilgocenie powietrza przez opadającą wodę. Natomiast w przekopach mających połączenie z szybami może także w początkowym odcinku następować silne adiabacyjne nawilgocenie powietrza aż do momentu uzyskania pewnej równowagi termicznej. Natomiast w ścianach wraz z głębokością wzrasta temperatura skał, w związku z czym wzrasta intensywność parowania wody. Ponadto duży wpływ ma tutaj intensywne zraszanie urabianego urobku przez kombajn czy upływ wody z urządzeń hydraulicznych obudowy zmechanizowanej, co przy niewielkiej różnicy temperatury powietrza i górnictwa powoduje wzrost $\Delta\varphi'$.



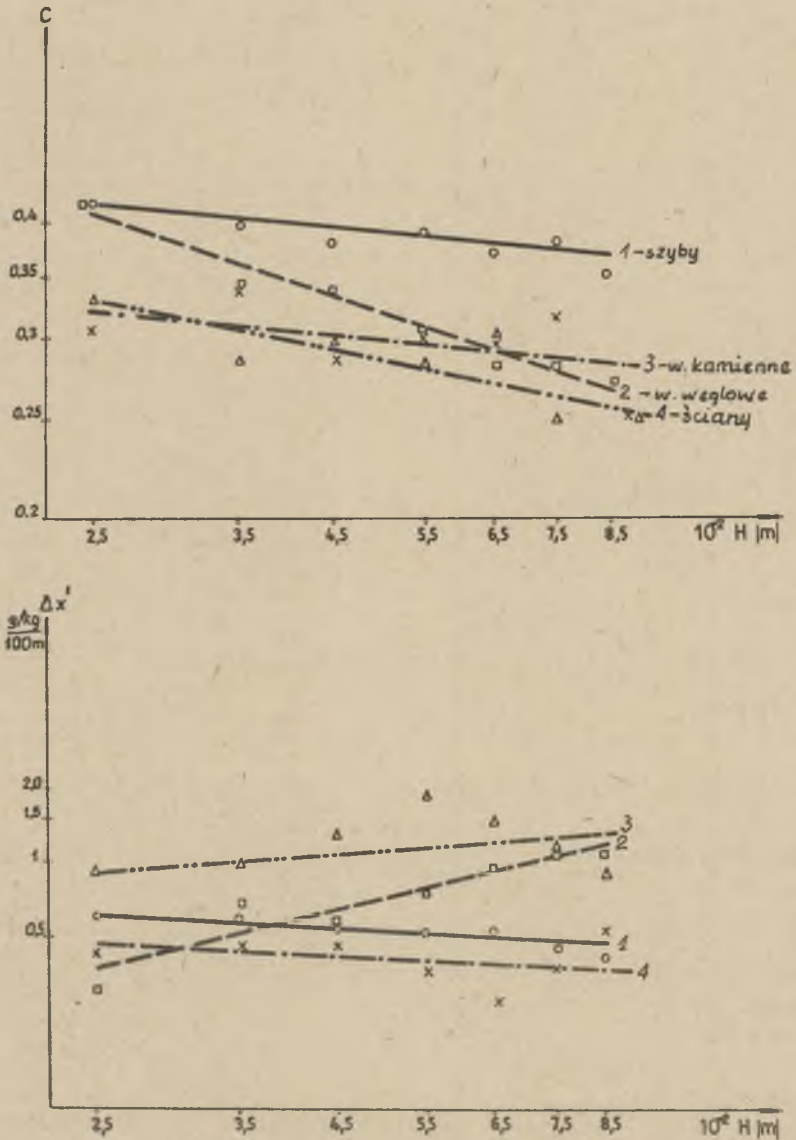
Rys. 11. Wpływ głębokości zalegania wyrobiska na wielkość liczby Nu' i przyrost wilgotności względnej $\Delta \varphi'$

Z rys. 12a wynika, że wzrost głębokości powoduje spadek współczynnika c . Najmniejsze zmiany współczynnika c obserwuje się w szybach, a więc w wyrobiskach, gdzie dopływ ciepła z górotworu jest najmniejszy, a największe zmiany obserwuje się w ścianach, gdzie zachodzi intensywny proces parowania wody technologicznej oraz wody z otaczającego górotworu i z urobionego urobku.

Natomiast z rys. 12b wynika, że zmiana głębokości ma jedynie znaczny wpływ na zmianę $\Delta x'$ w wyrobiskach kamiennych. Fakt ten można jedynie tłu-

maczyć tym, że w wyrobiskach kamiennych powietrze jest jeszcze mało zawilgocone, a temperatura ścian wyrobiska wzrasta wraz z głębokością, dlatego wzrasta intensywność parowania.

Wzrost $\Delta x'$ wraz z głębokością doskonale koreluje ze spadkiem współczynnika c przedstawionego na rys. 12a.



Rys. 12. Wpływ głębokości zalegania wyrobiska na wielkość współczynnika c i przyrost wilgotności właściwej $\Delta x'$

Reasumując, można stwierdzić, że wzrost głębokości powoduje spadek liczby Nu' oraz współczynnika c we wszystkich wyrobiskach oraz $\Delta\varphi'$ i $\Delta x'$ w szybach oraz powoduje wzrost $\Delta x'$ w ścianach i wyrobiskach kamiennych. W innych przypadkach zmiany są niewielkie.

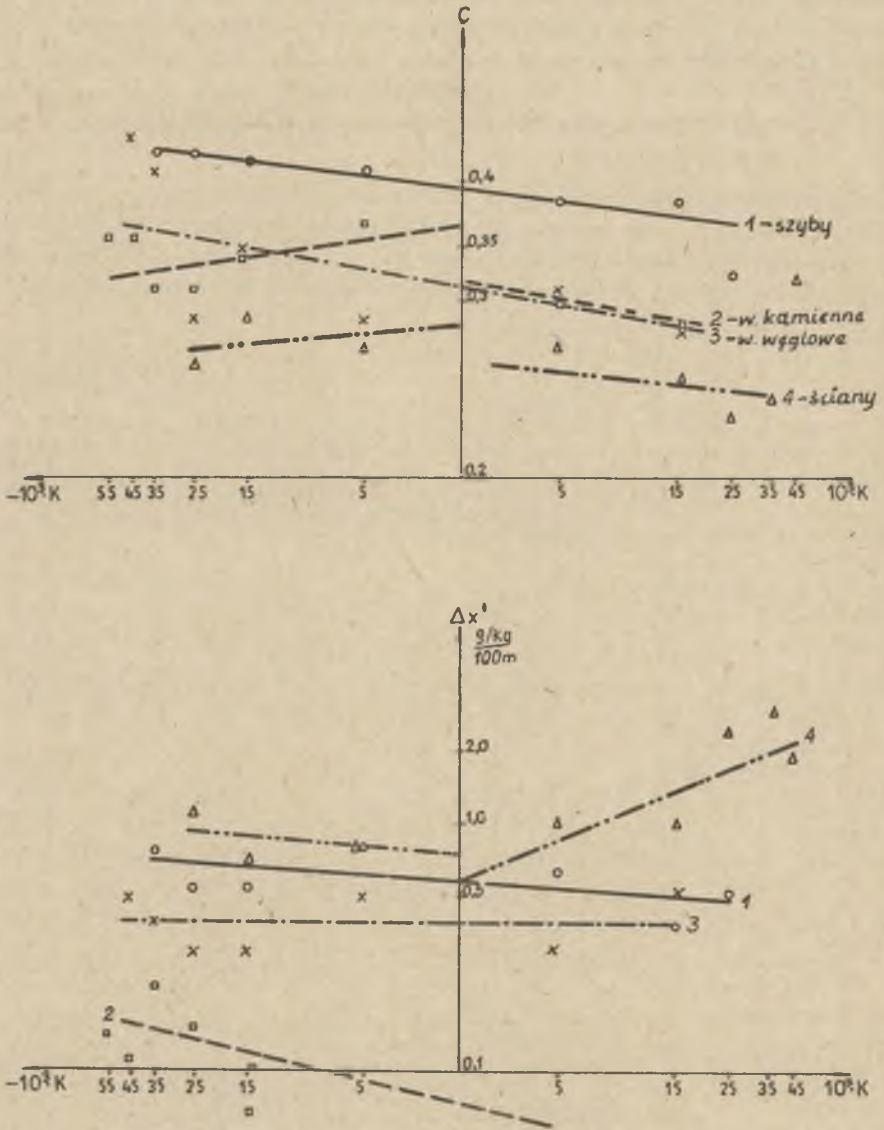
5.4.4. Wpływ temperatury górotworu na proces wymiany wilgoci w wyrobiskach górniczych

Wpływ temperatury górotworu na zmianę liczby Nu' , $\Delta\varphi'$, $\Delta x'$, c przedstawiono w tabelicy 4 oraz na rys. 13 i 14 w formie parametru temperaturowego K . Ponieważ temperatura powietrza może być wyższa, niższa lub równa temperaturze pierwotnej górotworu, dlatego parametr K przyjmuje wartości ujemne i dodatnie.

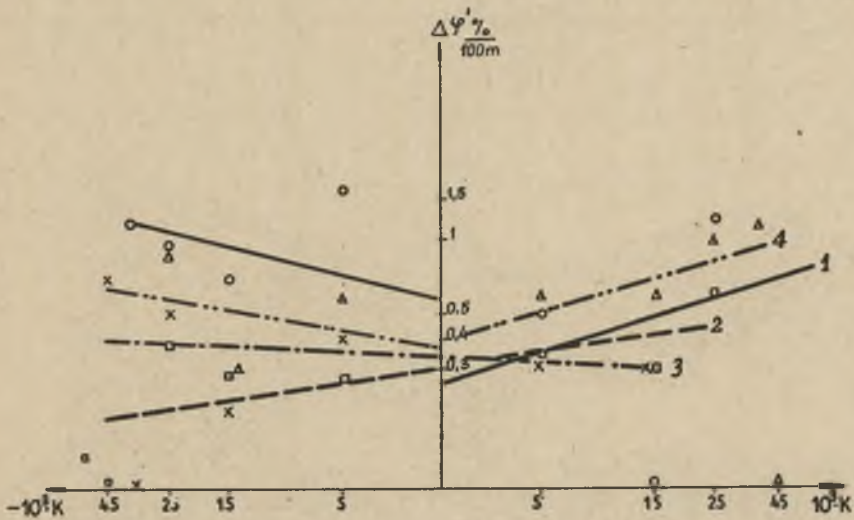
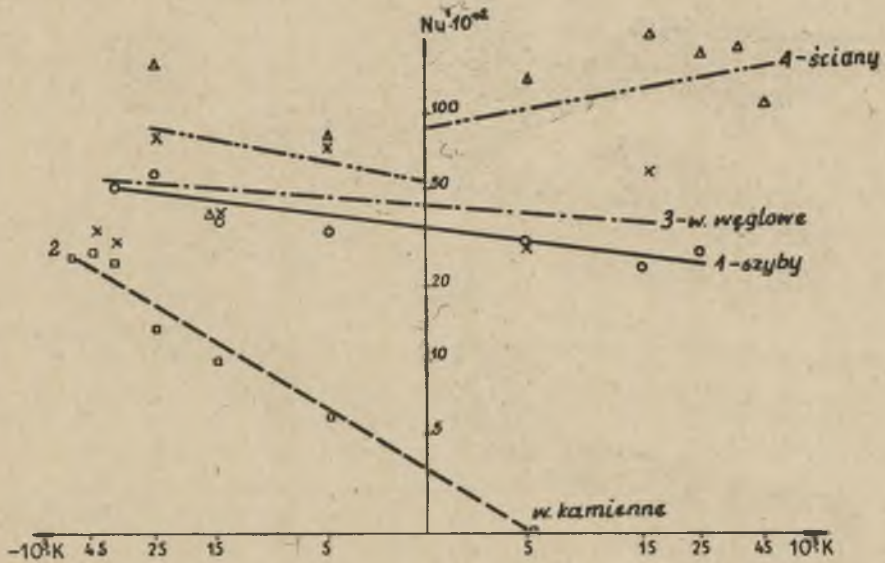
Tablica 4

Wpływ parametru temperaturowego K na wielkość Nu' , $\Delta x'$, $\Delta\varphi'$, c

Lp.	Wyszczególn.	Zakres liczby $K \cdot 10^2$									Zakres zmian	
		-5	5-4	4-3	3-2	2-1	1-0	0-1	1-2	2-3		3-
Szyby												
1	Ilość pom.	-	-	6	15	21	16	18	26	8	-	
2	$Nu' \cdot 10^{-3}$	-	-	5	6,1	3,8	3,4	3,1	2,4	2,7	-	3,7
3	$\Delta\varphi'$	-	-	1,1	0-9	0-7	1,6	0,5	0,1	1,2	-	1,5
4	c	-	-	0,43	0,43	0,42	0,41	0,38	0,38	0,32	-	0,11
5	$\Delta x'$	-	-	0,8	0,6	0,6	0,8	0,6	0,4	0,5	-	0,4
Wyrobiska kamiennie												
6	Ilość pom.	8	16	12	23	28	7	6	8	-	-	
7	$Nu' \cdot 10^{-3}$	2,6	2,7	2,5	1,4	1	0,6	0,2	0,1	-	-	2,8
3	$\Delta\varphi'$	0,1	0,1	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	-	-	0,5
9	c	0,35	0,35	0,31	0,31	0,33	0,36	0,34	0,32	-	-	0,05
10	$\Delta x'$	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0	-	-	0,2
Wyrobiska węglowe												
11	Ilość pom.	-	7	10	15	18	20	9	4	-	-	
12	$Nu' \cdot 10^{-3}$	-	3,4	2,8	8	4,8	7,3	3,1	6	-	-	5,2
13	$\Delta\varphi'$	-	0,7	0,4	0,5	0,2	0,4	0	0,4	-	-	1,1
14	c	-	0,44	0,41	0,29	0,34	0,29	0,31	0,28	-	-	0,16
15	$\Delta x'$	-	0,5	0,4	0,3	0,3	0,5	0,3	0,5	-	-	0,2
Ściany												
16	Ilość pom.	-	-	-	4	15	9	20	10	10	12	
17	$Nu' \cdot 10^{-3}$	-	-	-	16	4	8	13	21	17	18	17
18	$\Delta\varphi'$	-	-	-	0,9	0,3	0,6	0,6	0,6	1,0	1,1	0,8
19	c	-	-	-	0,26	0,29	0,27	0,27	0,25	0,23	0,24	0,03
20	$\Delta x'$	-	-	-	1,1	0,7	0,8	1	1	2,4	2,7	2



Rys. 13. Wpływ parametru temperaturowego K na zmianę współczynnika c i przyrost wilgotności właściwej $\Delta x'$

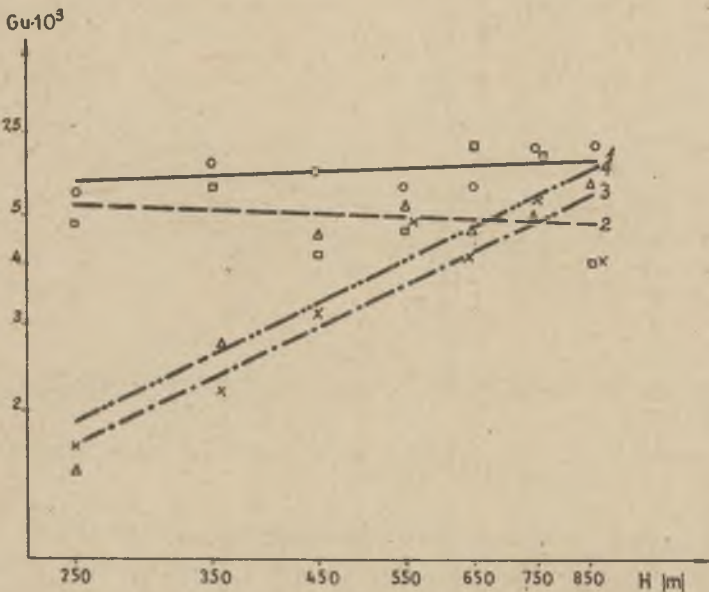
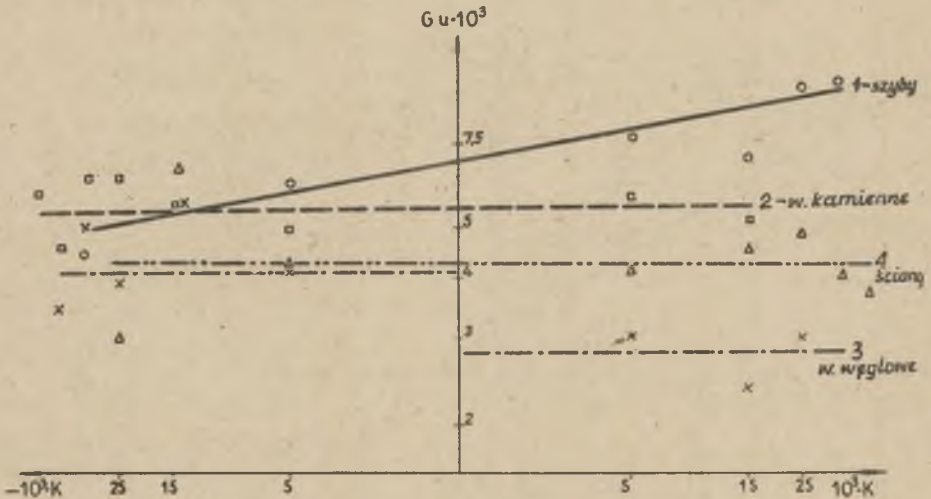


Rys. 14. Wpływ parametru temperaturowego K na wielkość Nu' oraz przyrost wilgotności względnej $\Delta\varphi'$

Z rys. 13 i 14 wynika, że wzrost parametru K do wartości $K = 0$ powoduje zmniejszenie Nu' , $\Delta x'$, $\Delta\varphi'$ we wszystkich wyrobiskach. Dalszy wzrost parametru K powoduje spadek Nu' , $\Delta x'$, $\Delta\varphi'$ w wyrobiskach kamiennych i szybach. Natomiast w ścianach wzrost $K > 0$ powoduje przyrost Nu' , $\Delta x'$, $\Delta\varphi'$.

Określenie przebiegu zmian Nu' , $\Delta\varphi'$, $\Delta x'$ i σ w pozostałych wyrobiskach jest trudne ze względu na małą ilość punktów.

Argumentacja wpływu parametru K na Nu' , $\Delta x'$, $\Delta\varphi'$ i σ jest dosyć złożona, gdyż w tym przypadku dużą rolę mogą odgrywać także dobowe a nawet sezonowe



Rys. 15. Zależność liczby Gu od głębokości zalegania wyrobiska i parametru temperaturowego K

we wahanis temperatury powietrza wlotowego. Szczegółowa analiza rozmieszczenia punktów pomiarowych wykazuje nieciągłość w przypadku, gdy parametr $K = 0$. Najwidoczniej fakt ten uwidacznia się w wyrobiskach ścianowych (częściowo stan ten można tłumaczyć zmianą lepkości powietrza na granicy ośrodków).

Ogólnie można stwierdzić, że dla parametru $K < 0$ średnia temperatura skał jest wyższa od temperatury powietrza, w związku z tym następuje przepływ ciepła i wilgoci z górotworu do powietrza. Zwiększenie parametru K (zmniejszenie różnicy temperatury powietrza i górotworu) powoduje zmniejszenie strumienia wilgoci i ciepła, a więc i zmniejszenie Nu' , $\Delta x'$ i $\Delta \varphi'$. Natomiast współczynnik c wzrasta w ścianach i przekopach, a maleje w szybach i chodnikach.

Dodatkowo na rys. 15 przedstawiono zależność między liczbą Gu a parametrem K oraz głębokością zalegania. Z rys. 15a wynika, że przy wartościach ujemnych parametru K (temperatura skał wyższa od temperatury powietrza), liczba Gu podlega niewielkim zmianom, a nawet stanowi w całym przedziale parametru K wartość stałą. Jedynie w szybach istnieje zależność funkcyjna między liczbą Gu a parametrem K .

Z rys. 15b wynika, że wyrobiska węglowe i ściany położone głębiej cechuje wyższa liczba Gu . Natomiast w szybach i wyrobiskach kamiennych zmiana głębokości nie ma wpływu na wartość Gu , a więc nie ma zależności funkcyjnej.

Poszukiwanie tych zależności funkcyjnych wynika z faktu, by w zależnościach opisujących proces zawilżania powietrza zastąpić poszukiwaną liczbę Gu znanymi wartościami K lub H .

Jak wynika z rys. 15, można to zrobić w przypadku szybu, gdzie istnieje zależność typu:

$$Gu = f(K)$$

oraz chodników węglowych i ścian gdzie istnieje zależność typu:

$$Gu = f(H).$$

5.5. Wyznaczenie zależności opisujących proces parowania wody w wyrobiskach górniczych

Przeprowadzona analiza wpływu:

- liczby Reynoldsa,
 - liczby Guchmana,
 - głębokości położenia wyrobiska H ,
 - parametru temperaturowego K ,
- na wielkość Nu' , $\Delta \varphi'$, $\Delta x'$ i c wykazała:

a) Zasadniczy wpływ na wielkość liczby Nu' w zależności od typu wyrobiska mają następujące czynniki:

w szybach $Nu' = f(Re, Gu)$,

w wyrobiskach kamiennych $Nu' = f(Re, Gu)$,

w wyrobiskach węglowych $Nu' = f(H, Gu)$,

w ścianach $Nu' = f(H, Gu)$.

Jak widać z powyższych zależności, w wyrobiskach cechujących się dużym czasem przewietrzenia i dużymi przekrojami (szyby, wyrobiska kamienne) duży wpływ na proces parowania mają prędkość powietrza i wilgotność względna (liczba Gu).

Natomiast w wyrobiskach o krótkim czasie przewietrzenia prowadzonych w węglu zasadniczy wpływ na proces parowania wody ma głębokość zalegania wyrobiska i wilgotność względna powietrza.

W wyniku matematycznego opracowania wyników pomiarów, ustalono zależności opisujące zmianę liczby Nu' w postaci:

w szybach

$$Nu' = 1 \cdot 10^{-3} Re^{0,9} Gu^{-0,5} \quad (5.17)$$

w wyrobiskach kamiennych

$$Nu' = 0,7 \cdot 10^{-3} Re^{0,9} Gu^{-0,5} \quad (5.18)$$

w wyrobiskach węglowych

$$Nu' = 7,6 \cdot 10^3 H^{-0,3} Gu^{-0,5} \quad (5.19)$$

w ścianach

$$Nu' = 8000 H^{-0,5} Gu^{-0,6} \quad (5.20)$$

b) Wpływ na wielkość zmian wilgotności względnej w wyrobiskach górniczych mają następujące czynniki:

w szybach $\Delta\varphi' = f(Gu, H)$,

w wyrobiskach kamiennych $\Delta\varphi' = f(Gu, H)$,

w wyrobiskach węglowych $\Delta\varphi' = f(Gu, H)$,

w ścianach $\Delta\varphi' = f(Gu, H)$.

Jak widać powyżej, głównymi czynnikami decydującymi o przyroście wilgotności względnej są liczba Gu oraz głębokość H . O ile w szybie wpływ głębokości wiąże się ze zmianą ciśnienia atmosferycznego, to w pozostałych wyrobiskach czynnikiem wyraźnie decydującym o tym procesie jest wysoka temperatura skał oraz powietrza powodująca wzmożony proces parowania wody mimo wysokiej wilgotności względnej.

W wyniku matematycznego opracowania wyników pomiarów ustalono następujące zależności opisujące zmianę wilgotności względnej:

w szybach

$$\Delta\varphi' = 4 \cdot 10^7 Gu^2 H^{-1,2} \quad \%/100 \text{ m} \quad (5.21)$$

w wyrobiskach kamiennych

$$\Delta\varphi' = 1,5 \cdot 10^7 \text{Gu}^2 \text{H}^{-1,2} \quad \%/100 \text{ m} \quad (5.22)$$

w wyrobiskach węglowych

$$\Delta\varphi' = 0,02 \text{Gu}^0,1 \text{H}^0,5 \quad \%/100 \text{ m} \quad (5.23)$$

w ścianach

$$\Delta\varphi' = \text{Gu}^0,2 \text{H}^0,1 \quad \%/100 \text{ m} \quad (5.24)$$

Krótszy czas przewietrzenia powoduje zmniejszenie roli głębokości i liczby Gu w kształtowaniu przyrostu $\Delta\varphi'$.

c) Wpływ na wielkość przyrostu wilgotności właściwej w wyrobiskach górniczych mają następujące czynniki:

w szybach $\Delta x' = f(\text{Gu}, \text{H}, \text{K})$,

w wyrobiskach kamiennych $\Delta x' = f(\text{K}, \text{H})$,

w wyrobiskach węglowych $\Delta x' = f(\text{H}, \text{Gu})$,

w ścianach $\Delta x' = f(\text{K}, \text{Gu})$.

Jak widać z powyższych zależności, decydującymi czynnikami regulującymi przyrost wilgotności właściwej są temperatura powietrza i temperatura skał wchodząca w skład liczby Gu i parametru K, a więc czynniki decydujące o różnicy ciśnień pary wodnej w powietrzu i na powierzchni wyrobiska.

Matematyczne opracowanie wyników pozwoliło określić zależności opisujące przyrost wilgotności właściwej w wyrobiskach górniczych:

w szybach

$$\Delta x' = 0,25 \text{K}^{-0,15} \quad \text{gd}y \quad \text{K} > 0 \quad \text{g/kg} \quad 100 \text{ m} \quad (5.25)$$

$$\Delta x' = 1,4 \text{K}^{0,15} \quad \text{gd}y \quad \text{K} < 0 \quad \text{g/kg} \quad 100 \text{ m} \quad (5.26)$$

w wyrobiskach kamiennych

$$\Delta x' = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{H} \text{G}^{0,4} \quad \text{g/kg} \quad 100 \text{ m} \quad (5.27)$$

w wyrobiskach węglowych

$$\Delta x' = 0,35 \text{H}^0,2 \text{Gu}^0,2 \quad \text{g/kg} \quad 100 \text{ m} \quad (5.28)$$

w ścianach

$$\Delta x' = 100 \text{K}^{0,5} \text{Gu}^0,4 \quad \text{K} > 0 \quad \text{g/kg} \quad 100 \text{ m} \quad (5.29)$$

$$\Delta x' = 60 \text{K}^{-0,15} \text{Gu}^0,2 \quad \text{K} < 0 \quad \text{g/kg} \quad 100 \text{ m}$$

d) Na wielkość współczynnika wymiany wilgoci "c" mają wpływ następujące czynniki:

w szybach $c = f(\text{H}, \text{K})$,

w wyrobiskach kamiennych $c = f(\text{H}, \text{Gu})$,

w wyrobiskach węglowych $c = f(\text{Re}, \text{K})$,

w ścianach $c = f(\text{H}, \text{K})$.

Jak widać, na wielkość współczynnika c mają wpływ wszystkie rozpatrywane czynniki w zależności od rodzaju wyrobiska.

Matematycznie ustalono, że wielkość współczynnika c opisują następują-
ce zależności:

w szybach

$$c = 0,85 H^{0,2} K^{-0,1} \quad \text{gdy } K > 0 \quad (5.30)$$

$$c = 2,2 H^{-0,2} K^{0,1} \quad \text{gdy } K < 0 \quad (5.31)$$

w wyrobiskach kamiennych

$$c = 1,8 H^{-0,3} K^{-0,1} \quad (5.32)$$

w wyrobiskach węglowych

$$c = 0,24 Re^{0,1} K^{-0,2} \quad \text{gdy } K > 0$$

$$c = 0,03 Re^{0,1} K^{+0,2} \quad \text{gdy } K < 0 \quad (5.33)$$

w ścianach

$$c = 1,2 H^{-0,15} K^{0,1} \quad \text{gdy } K < 0,001 \quad (5.34)$$

$$c = 0,5 H^{-0,15} K^{-0,1} \quad \text{gdy } K > 0,001 \quad (5.35)$$

Wpływ liczby Re na współczynnik c w wyrobiskach węglowych należy tłumaczyć faktem transportu urobku przeciwnie do kierunku ruchu powietrza oraz nagłymi zmianami przekroju wyrobiska, w wyniku czego zmienia się proces wymiany ciepła i masy.

Uzyskane zależności (5.17)-(5.35), ujmujące proces nawilżania powietrza w wyrobiskach górniczych, pozwalają w sposób bardziej precyzyjny określić dane wejściowe w metodach prognozowania temperatury powietrza.

Analiza uzyskanych zależności wskazuje, że w warunkach górniczych klasyczne równania opisujące wymianę masy i ciepła (4.17), (4.16) nie opisują w pełni zachodzących zjawisk w wyrobiskach górniczych. Proces parowania wody zachodzi nie tylko na granicy ośrodków powietrze - ścianka górotworu, ale i wewnątrz i zewnątrz tych ośrodków. Jeżeli uwzględnimy różnorodny, trudny niejednokrotnie do uchwycenia, sposób rozmieszczenia źródeł ciepła, przyjęty sposób rozwiązania procesu nawilżania powietrza w wyrobisku górniczym potwierdza słuszność podjętej pracy.

Analiza zależności (5.17)-(5.20) wskazuje, że uzyskane rezultaty dobrze korelują z badaniami podanymi w pracy Łykowa [56], a jednocześnie wskazuje, że jeżeli istnieje analogia między wymianą ciepła i masy, wtedy pomijając różnice współczynnika A i wykładników n , m w zależności (4.17), współczynnik wnikania ciepła należy obliczać z zależności (5.17)-(5.20).

Istnieje jeszcze jeden problem, który nie został w niniejszej pracy rozwiązany, a dotyczący procesu nawilżania powietrza w wyrobiskach górniczych stosujących wentylację odrębną. W tym przypadku mamy do czynienia z wyrobiskami o stosunkowo krótkim i zmieniającym się okresie przewietrzania oraz małymi zmieniającymi się wydatkami powietrza. Wydaje się wtedy słuszne, by w zależności (5.15) opisującej parametrycznie proces nawilżania powietrza uwzględnić liczbę Fouriera (Fo).

5.6. Uwagi dotyczące współczynnika wnikania ciepła w wyrobiskach górniczych

Przy obliczeniu wymiany ciepła między przepływającym powietrzem a ściankami wyrobiska stosuje się zależność wyprowadzoną przez Michiejewa [60], adaptowaną przez Szczerbanią [84, 82] w postaci:

$$Nu = 0,022 \varepsilon Re^{0,8} Pr^{0,4} = 0,195 \varepsilon Re^{0,8} \quad (5.36)$$

gdzie:

ε - współczynnik uzależniony od szorstkości ścian wyrobiska i rodzaju obudowy.

Współczynnik ε został ustalony na podstawie badań laboratoryjnych na modelu o wymiarach wyrobiska: $d \approx 0,1$ (m), $s = 3,1$ (m); szorstkość ścian $0 < \frac{\Delta}{d} < 0,05$ (Δ - wysokość występow na powierzchni wyrobiska); stosunek średnicy obudowy (d_o), do średnicy wyrobiska $0,06 < \frac{d_o}{d} < 0,12$; stosunek długości stojaków (s) do ich średnicy $0 < \frac{s}{d_o} < 14$.

Badania przeprowadzono w zakresie liczb $4000 < Re < 120000$ i parametru temperaturowego $0,169 < K < 0,236$, przy czym temperatura ścianki wynosiła $t \approx 100^\circ C$. Badania przeprowadzono dla 30 wariantów szorstkości ścian i sposobu obudowy, w wyniku czego ustalono wartość współczynnika szorstkości w granicach $1 < \varepsilon < 3,1$. Szczegółowa analiza przeprowadzonych badań oraz sposobu opracowania wyników pomiarów wykazała, że:

1. Warunki badań modelowych nie w pełni odpowiadają warunkom naturalnym z tytułu nieuwzględnienia podobieństwa warunków termicznych panujących w wyrobisku określonych przez liczby podobieństwa Gu lub parametru K . W rzeczywistości (w kopalni) liczba Gu przyjmuje wartość z przedziału $0 < Gu < 0,015$ lub parametr K z przedziału $-0,050 < K < 0,050$, natomiast w badaniach modelowych uzyskano $0,169 < K < 0,236$, czyli wartość pięciokrotnie większą.
2. Badania modelowe przeprowadzono w wyrobisku pozbawionym źródeł wilgoci, a więc nie uwzględnili łącznej wymiany ciepła i wilgoci opisanej przez zależność (4.17). W warunkach naturalnych nawet w wyrobiskach bardzo głębokich i wykonanych w skałach metamorficznych (kap. złota w Płd. Afryce) mamy do czynienia z parowaniem wody zużytej w procesie technologicznym.
3. Zakres badań ze względu na liczbę podobieństwa dynamicznego Re jest skąpy dla niewielkiej grupy wyrobisk węglowych i ścian cechujących się podobną liczbą Re .
4. Bez uwzględnienia liczby Gu lub parametru K autor nie mógł wykazać wpływu kształtu wyrobiska na wielkość współczynnika mimo widocznych różnic w rozkładzie prędkości oraz w rozkładzie temperatur, decydujących o charakterze wymiany ciepła (tylko konwekcja wymuszona lub konwekcja

wymuszona + konwekcja naturalna). Przeprowadzona analiza wyników badań, zamieszczonych w tablicach 20, 25, 27, 34, 35 [84], wykonana przez autora niniejszej pracy pod kątem uchwycenia zależności typu:

$$Nu = f(Re, K)$$

wykazała, że uzyskane wyniki dobrze korelują z zależnością (4.17). Zresztą sam Szczerbań w późniejszych pracach [82, 83] wprowadza poprawkę na wielkość współczynnika α liczonego w wyrobiskach wilgotnych zależnością (2.8).

Uzyskane wartości współczynnika α w tym przypadku będą zawyżone, gdyż stanowi on sumę współczynnika wnikania ciepła słuszny dla wyrobisk suchych oraz współczynnika ciepła użytego w procesie parowania wody.

Mając na uwadze ogólnie akceptowaną zasadę, że istnieje analogia między wnikaniem ciepła a wnikaniem masy [6, 19, 33, 56], można zastosować do obliczenia współczynnika wnikania ciepła zależności uzyskane w niniejszej pracy (5.17)-(5.20). Porównanie wyników obliczeń wg zależności (5.36) i (5.20) wskazuje, że mimo nieuwzględnienia w zależności (5.20) współczynnika szorstkości ścian ϵ uzyskano wyższe wartości współczynnika α w stosunku do zależności (5.36). Proponowane zależności na obliczenie współczynników wnikania ciepła i masy, opracowane na podstawie obserwacji procesu wymiany wilgoci w wyrobiskach górniczych, powinny znaleźć zastosowanie w praktyce górniczej.

Przeprowadzona analiza wpływu liczby Re na wielkość wykładnika potęgowego "m" w zależności (4.17) wykonana w pracy [28] wykazała:

- a) dla ruchu laminarnego $Re < 2300$, $m = 0,5$,
- b) dla ruchu przejściowego $2300 < Re < 10^5$, $0,5 < m < 0,8$,
- c) dla rozwiniętego ruchu burzliwego $Re > 10^5$, $m > 0,8$.

Ponadto stwierdzono, że istnieje między wykładnikiem potęgowym "m" a wielkością liczby Re następująca zależność:

$$m = 0,16 \lg Re \quad (5.37)$$

Ponieważ w większości wyrobisk górniczych stwierdza się, że $10^5 < Re < 10^6$, w związku z tym wykładnik potęgowy przyjmie wartość $m \approx 0,9$.

6, ZAKOŃCZENIE

Niniejszą pracę wykonano z myślą dalszej poprawy rezultatów uzyskanych na drodze obliczeń prognostycznych temperatury powietrza w wyrobiskach górniczych. Problem ten nabiera szczególnej wagi przy projektowaniu kopalń głębokich oraz w przypadku rozpatrywania możliwości poprawy warunków klimatycznych w istniejących kopalniach.

Na podstawie przeprowadzonej analizy metod prognozowania temperatur powietrza, stosowanych w światowym górnictwie, ustalono następujące główne parametry charakteryzujące proces nawilżania powietrza przewietrzającego wyrobiska górnicze:

- współczynnik wymiany masy, β
- przyrost wilgotności właściwej, $\Delta \varphi'$
- przyrost wilgotności względnej, $\Delta x'$
- współczynnik przejmowania wilgoci, c .

Następnie omówiono główne źródła wilgoci w wyrobiskach oraz źródła ciepła zużytego w procesie parowania wody.

Na podstawie dotychczasowych badań w zakresie wymiany ciepła i masy oraz własnych obserwacji ustalono główne czynniki charakteryzujące proces wymiany masy w wyrobiskach górniczych wchodzących w skład liczb bezwymiarowych: Re , Gu , K i H .

Opierając się na wynikach pomiarów klimatycznych wykonanych w różnych wyrobiskach kopalń węgla Górnośląskiego Zagłębia, ustalono zależności funkcyjne zachodzące między współczynnikami określającymi proces nawilżania powietrza (β , $\Delta x'$, $\Delta \varphi'$, c) a charakterystycznymi liczbami Re , Gu , K i H , a następnie ustalono istniejące między nimi empiryczne zależności funkcyjne. Analiza uzyskanych zależności wykazała, że wymianę masy oraz ciepła w wyrobiskach górniczych opisują podobne zależności, które stosuje się w innych dziedzinach techniki, jednakże wykładniki potęgowe przyjmują inne wartości. W celu uzyskania właściwej wartości współczynnika wnikania ciepła α wykazano, że stosowane dotychczas zależności nie ujmują w pełni zachodzącego zjawiska wymiany ciepła. W związku z czym proponuje się zastosować bardziej dokładną zależność podaną przez Niesterenko.

W kopalniach GZW, stosując analogię wymiany ciepła i masy, można zastosować zależności podane przez autora.

Uzyskane zależności opisujące proces zawilżenia powietrza powinny, zdaniem autora, znaleźć zastosowanie w praktyce górniczej ze względu na prostą formę oraz sposób ich opracowania.

Zagadnienie przedstawione w pracy stanowi część prac wykonywanych w Instytucie Techniki Eksploatacji Złóż Wydziału Górniczego Politechniki Śląskiej w ramach opracowania tematu resortowego P.r. 115, dotyczącego "Doboru efektywnych i ekonomicznych metod i środków przewietrzenia wyrobisk górniczych na dużych głębokościach". Niektóre wyniki przedstawionych badań znalazły już zastosowanie w opracowaniach wykonanych przez Zespół Aerologii Górniczej i Klimatyzacji kierowanego przez prof. dr hab. inż. A. Prycza, a przeznaczonych dla kopalń węgla Zagłębia Górnośląskiego.

LITERATURA

- [1] Baranowski B.: Nierównowagowa termodynamika w chemii fizycznej. PWN, Warszawa 1974.
- [2] Baratow E.J., Czerniak W.P.: Tęplowyye razzchoty i sposoby ochładzienia rudnicznego wozducha pri stroitielstwie głubokich szacht. Izdat. "Niedra", Moskwa 1968.
- [3] Batzel S.: Planung und Betrieb von Klimaanlage für Abbaubetriebe Gluckauf. 118.1959.
- [4] Boldizsar T.: The thermal field of earths crust and its influence on the ventilation of deep and hot mines. Acta Technica. Vol.XVI 1957.
- [5] Boldizsar T.: Calculation of the temperature rise of mine air flow with regard to the effect of its water vapour content. Acta Technica. Acad.Sci.Hung. Vol. XXI 1958.
- [6] Bennet C.O., Myers J.E.: Przenoszenie pędu, ciepła i masy. WNT, Warszawa 1967.
- [7] Brown G.G. i inni: Operacje jednostkowe. PWT, Warszawa 1960.
- [8] De Braef W.: L'échauffement de l'air de ventilation dans puits et les voies dentree d'air. Geol.Mij. 1951 nr 13.
- [9] Branny M.: Wpływ rozcięcia złoża na warunki klimatyczne w głębokich kopalniach. Praca doktorska. AGH, Kraków 1974.
- [10] Bystron H., Knechtel J.: Metoda prognozowania temperatury i wilgotności powietrza w wyrobiskach górniczych z wentylacją lutniową. Chłodnictwo. Z. 8-9. 1976.
- [11] Bystron H. i inni: Rozwój metod prognozowania warunków klimatycznych w kopalniach. Chłodnictwo. Z. 8-9. 1976.
- [12] Chmura K. i inni: Wpływ ciśnienia na wielkość współczynnika przewodzenia ciepła skał. Przegląd Górniczy, nr 10, 1972.
- [13] Chmura K.: Własności fizykotermiczne skał niektórych polskich zagłębi górniczych. Wydawn. "Śląsk", Katowice. 1971.
- [14] Chochołtwa N.N., Kuzin W.A.: Analiticheskiye zawisimosti dla razzchota tjeplowych uszkowii w wyrobotkach prawotriewajemych mienieje goda pri kondicjonirowanii wozducha. Wyp. 4. Izdat. MakNNI, 1974.
- [15] Chochołtwa N.N.: Prognoz tjeplernaturnych uszkowii, racjonalnyje schemy i sistemy ochładzienia rudnicznego wozducha w głubokich szachtach. Congr.Inter.Joachimicus Fod. Vent. 1968 B.12.
- [16] Dierjagin B.W., Obuchow J.: Anomalnyje swojstwa tonkich szojew zidkostiej. Kolloidnyj Żurnał. T. 1 wyp. 5. 1935.
- [17] Djadkin J.D.: Regulirowanije tjeplowego riezima szacht i rudnikow. Leningrad 1976.
- [18] Dokłady AN CCCP T 138. Nr 6, 1961.
- [19] Eckert E.R.C.: Introduction to the transfer of heat and mass. Mc-Graw Hill Book Company. Inc. New York 1950.
- [20] Ferencowicz J.: Wentylacja i klimatyzacja. Arkady, Warszawa 1960.
- [21] Frączek R.: Wpływ lokalnych źródeł ciepła na zagrożenia klimatyczne w kopalni. Bezp.Pracy w Górn, nr 1. 1978.

- [22] Frączek R.: Wymiana ciepła między górotworem a przestrzenią przodkową wyrobisk korytarzowych bez obudowy. Praca doktorska. Pol. Śląska, Gliwice 1974 (niepublikowana).
- [23] Frączek R.: Opriedielenije priraszczeniija tiempieratury wozducha w prizbojnom prostrenstwie tupikowych wyrobotok. Razr.Miesn.Poliezn. Iskop. nr 43. Izdat. "Niedra", Kijew 1976.
- [24] Frączek R.: Wpływ głębokości zalegania pokładów węgla na ich zawilgocenie. Przegląd Górniczy nr 9, 1976.
- [25] Frycz A., Frączek R.: Warunki klimatyczne w przodkach wyrobisk korytarzowych w zależności od niektórych czynności w nich wykonywanych. Symp. nt.: Bezpieczeństwa pracy w nowoczesnym górnictwie. Pol. Śląska, Gliwice 1974.
- [26] Frycz A., Frączek R.: Propozycja sposobu obliczania temperatury powietrza na projektowanych poziomach kopalń czynnych. Projekty-Problemy nr 10, 1976.
- [27] Frycz A. i inni: Całkowity bilans ciepła dla kopalń rud miedzi. Praca Inst.Tech.Ekspl. Złóż. Gliwice 1974 (niepublikowana).
- [28] Frycz A i inni: Dobór efektywnych oraz ekonomicznych metod i środków przewietrzania wyrobisk górniczych na dużych głębokościach. Inst.Tech. Ekspl. Złóż. Pol. Śląska, Gliwice 1975-1978 (niepublikowane).
- [29] Frycz A.: Klimatyzacja kopalń. Wydaw. "Śląsk", Katowice 1969.
- [30] Gielfang F.M. i inni: Nowyje sposoby borby z pyliu w ugodnych szachtach. "Niedra", Moskwa 1975.
- [31] Gustkiewicz I., Żaczek F.: Rola porów i spoiwa w natychmiastowym zachowaniu pewnego piaskowca jednoosiowo ściskanego. Archiwum Górń. Z. 2. Kraków 1976.
- [32] Glogar P.: Vliv zvlhcorani ovzdusi na zmeny tepelneho obsahu dulnich vetru. Acta Montana. nr 41. Praha 1977.
- [33] Hobler T.: Ruch ciepła i wymienniki. PWT, Warszawa 1967.
- [34] Holmes A.: Principles of Physical Geology. London 1965.
- [35] Hiromatsu Y., Amano K.: Calculation of the rate of flow temperature and humidity of air currents in a mine. Inter.J.Rock Mech.Min.Sci. Vol. 9pp 713-729. 1972.
- [36] Holec S.: Metoda prognozowania zawilżenia, strumienia entalpii, wilgotności względnej i temperatury powietrza świeżego w wilgotnych wyrobiskach górniczych. Praca doktorska. Polit. Wrocławska, 1975 (niepublikowana).
- [37] Głuszko W.T.: Projawlenija gornogo dawlenia w głubokich szachtach. Naukowa Dumka, Kijew 1071.
- [38] Kirpiczew M.W.: Teorije podobija i jego primienienii w tiepłotiechnieke. "Goseniergoizdat" Moskwa-Leningrad 1959.
- [39] Karger S., Bocksach G.: Das Sortionsverhalten der Karbongesteine sowie einiger Ausbaustoffe. Gluckauf-Forsch.Oct. 1977.
- [40] König H.: Mathematische Untersuchungen über das Grubenklima. Bergbau Archiv. 1952. H 3/4.
- [41] Kneule F.: Suszenie. Arkady, Warszawa 1970.
- [42] Kremniew O.A. i inni: Tieplo i włagoobmien swieżeobnazjonogo gornogo massiwa z wientiljeczionnoj strujej wozducha. Inż-fiz Żurnał. T.XXXII nr 4. 1977.
- [43] Krischer O.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik Berlin (Göttingen) Heidelberg 1956.
- [44] Kucz J., Sobik J.: Wpływ głębokości zalegania węgla na szybkość osuszania wyrobisk górniczych. Praca dyplomowa. Inst.Tech.Ekspl. Złóż. Pol. Śląskiej Gliwice 1976 (niepublikowane).

- [45] Kriworuczko A.M., Konowałowa A.W.: Wlijanije tiempieratury na gigroskopiczieskije swojstwa gornych parod. Sb.Raboty DonUGI nr 33, 1975.
- [46] Kriworuczko A.M. i inni: Sposób izmieniienie wżażnosti gornych parod w massiwie. Sb.Raboty DonUGI nr 33. 1975.
- [47] Kriworuczko A.M.: Woprosy tiechnologii dobyczy uгля i sowiersziestwowanija gornowo chożejstwa na szachtach Donbassa. Raboty DonUGI sb. nr 29. "Miedra" 1964.
- [48] Kriworuczko A.M. i inni: Rol gornowo massiwa w izmieniieni wżężnosti wozducha w wyrabotkach gżubokich szacht. Rab.DonUGI wyp. 11. 1964.
- [49] Kriworuczko A.M.: Opriedielienije intiensiwnosti wżęgotdaczki parod w wyrabotkach gżubokich szacht. Gorn.Żur.Izw.Wys.U.Zew. nr 1. 1965.
- [50] Kriworuczko A.M.: Wlijanije isparienija wżęgi z powierżchnosti parodnych stienok i wodootliwnoj kanawki na klimat w wyrabotkach gżubokich szacht. Gorn.Żur. I.W.U.Z. nr 3. 1964.
- [51] Kempf E.: Ein neues Verfahren zur Berechnung der Wettertemperatur in sonderbewetterten Grubenbauen. Bergakademie 21 Jg. H. 2. Febr. 1969.
- [52] Gunej A.: Equilibrium Humidities and water Isotherms in Relation to spontaneous Heating of coals. Congr.Mine Vent. Johannesburg 1975.
- [53] Jones C.T., Ruben J.T.: Face air temperatures during driveage of a deep heading. Colliery Guardian, nr 11. 1964.
- [54] Logoń A.: Wyrównywanie temperatury w skałach zagżębia miedziowego. ZN Pol. Śląskiej, Górnictwo nr 78, Gliwice 1977.
- [55] Kropsz K.: Wpływ liczb Reynoldsa i parametrów geometrycznych wyrobisk korytarzowych bez obudowy na bezwymiarowy współczynnik oporu aerodynamicznego. Praca doktorska. Pol. Śląska, Gliwice 1976 (niepublikowana).
- [56] Łykov A.W.: Tiejpo i massoobmien w processach suszki. Gosenniergoizdat., Moskwa 1956.
- [57] Malewanyj G.G.: Dwiżienije podziemnych wod w treszczinowatych parodach. Charkow 1962.
- [58] Miedwediew B.I.: Opriedielienije koefficientsa niestacjonarnowo tiejpoobmiensia dla wyrabotok prochodimych s postojannoj skorostiu. Raz. Mies.Pol.Iks.Izdat. "Tiechnika" nr 22, Kijew 1971.
- [59] Miedwediew B.I. i inni: Eksperymentalne opriedielienije koefficientow tiejpootdaczki i niestacjonarnogo tiejpoobmiensia pri požarje w gornoj wyrabotkie. Raz.Mies.Pol.Iks.Izdat. "Tiechnika" nr 22, Kijew 1971.
- [60] Michiejew M.A.: Osnovy tiejpo pieriedaczki. III wyd. Gosenniergoizdat. Moskwa-Leningrad 1956.
- [61] Mikożajczyk W.: Analiza skuteczności środków wentylacyjnych i klimatyzacyjnych dla poprawy komfortu pracy w warunkach LGOM-u. Prace doktorska. AGH, Kraków 1974 (niepublikowana).
- [62] Mucke G.: Climatic Conditions on Deep Mechanized Faces.Colliery Guardian, pp 281-288. June 1971.
- [63] Nikitina Ł.M.: Tiermodynamiczieskije parametry i koefficienty massopierienosa wo wżężnych matieriałach. "Energia", Moskwa 1968.
- [64] Nikitina Ł.M.: Tablicy koefficientow massopierienosa wżężnych matieriałów. Nauka i tiechnika, Mińsk 1964.
- [65] Niestierienko A.W.: Eksperierientalnoje issliedowanije tiejpo i massoobmiensia pri isparienii židkosti so swobodnoj powierżchnosti. Trudy M.J.I.G.S. 1953. Ž.T.F. 24r 1954.
- [66] Naszozokin W.W.: Tiechniczieskaja tiermodinamika i tiejpo pieriedacza. Moskwa 1969.
- [67] Ochęduszek S.: Termodynamika stosowana. WNT, Warszawa 1967.
- [68] Owsik W.: Fizyczne podstawy technologii wydobywania ropy i gazu.Wyd. "Śląsk", Katowice 1971.

- [69] Pawłow K.F. i inni: Przykłady i zadania z zakresu aparatury i inżynierii chemicznej. Wyd. 4. WNT, Warszawa 1971.
- [70] Praca zbiorowa: Kondycjonowanie powietrza. Sb. трудов nr 6 Gostroizdat, Moskwa 1960.
- [71] Poradnik Górnika. T. I i III. Wyd. "Śląsk", Katowice 1972.
- [72] Ruben J.T.: Temperature and humidity in headings at depth. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 4. 1967.
- [73] Rumszycki L.Z.: Matematyczne opracowanie wyników eksperymentu. WNT, Warszawa 1973.
- [74] Staniszewski B.: Wymiana ciepła. Podstawy teoretyczne. PWN, W-wa 1963.
- [75] Strzałkowski A., Sliżyński A.: Matematyczne metody opracowania wyników pomiarowych. PWN, Warszawa 1973.
- [76] Schirmer R.: Die Diffusionszahl von Wasserdampf Luftgemischen und die Verdampfungsgeschwindigkeit. VDJ - Belh Verfar. 1938.
- [77] Syczew W.W.: Termodynamika układów złożonych. PWN, Warszawa 1973.
- [78] Szarawara J.: Termodynamika chemiczna. WNT, Warszawa 1969.
- [79] Stukało W.A., Tielnoj A.P.: Matematyčeskoje opisanije tiepłoočmienne między iskopajemym na konwiejerie i woźduchom w szachtnoj wyrabotkie. Sb. Razr. Mies. Pol. Isk. Nr 22. Izdat. "Tiechnika", Kijew 1971.
- [80] Scott D.R.: The cooling of underground galleries. Tran. Inst. Min. Eng. 118. 1958-1959.
- [81] Sharp D.F.: Sources of moisture in mine air flow. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 4. 1967.
- [82] Szczerbań A.N. i inni: Sprewočnik rukowodstwa po tiepłowym razčotom szacht i projektowaniju ustanowok dlja ochłażdzenija woźducha. Gosgortiechizdat, Moskwa 1960.
- [83] Szczerbań A.N. i inni: Rukowodstwo po rieregulirowaniju tiepłowego riežima szacht. "Niedra" Moskwa 1977.
- [84] Szczerbań A.N., Kremniew O.A.: Naucznyje osnovy razčiota i regulirowania tiepłowo riežima w głubokich szachtach. Izdat. "Niedra", Kijew 1959.
- [85] Syrowatko M.W.: Gigrogieołożija i inženiernoja gieologija pri oswoženii uolnych miestoroždienii. Moskwa 1960.
- [86] Strumiłko C.: Podstawy teorii i techniki suszenia. WNT, Warszawa 1975.
- [87] Trembecki A.S.: Zagroženia wodne w górnictwie. Wyd. "Śląsk", Katowice 1973.
- [88] Fiedorow B.J.: Eksperimentalnoje issledowanije processa isparienija wody w niezotermičeskiej turbulentnoj pogranicznij słoż. Inż. Fiz. Żurnał, nr 1. 1964.
- [89] Waćławik J. i inni: Prognoza warunków klimatycznych w kopalni. Chłodnictwo nr 8-9, Warszawa 1976.
- [90] Waćławik J.: Prognoza warunków klimatycznych z uwzględnieniem wpływu wilgoci. ZN AGH nr 33, Kraków 1971.
- [91] Waćławik J.: Temperatura i wilgotność powietrza kopalnianego. Arch. Górnictwa. Z. nr 4, 1973.
- [92] Voss J.: Die Bestimmung wärmetechnischer Kenngrößen in Abbaustrecken und Streben. Glückauf nr 5. März. 1970.
- [93] Voss J.: Kenngrößen für die Klimavorberechnung. Glückauf nr 15. 1973.
- [94] Voss J.: Wärme und Wasserdampfaustausch in Wetterwegen. Congr. Int. de Pod. Vent. 1968. B. 10.
- [95] Voss J.: Ein neues Verfahren zur Klimavorberechnung in Steinkohlenbergwerken. Glückauf Fors. J. 6. 1969.

- [96] Voss J.: Klimavorausberechnung für Abbaubetriebe. Glückauf 27. 1971.
- [97] Voss J.: Beitrag zur Vorausberechnung der Wasserdampfaufnahme und der Wetter in Steinkohlenbergwerken. Glückauf Fors. H. 4. 1965.
- [98] Wilk Z.: Rozwój i zmienność zawodnienia polskich kopalń węgla kamiennego. ZN AGH nr 179. Geol. z. 9, Kraków 1964.
- [99] Wilk Z.: Zawodnienie a wielkość i głębokość kopalń we wschodniej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Wyd.Geol., Probl.Geol. z. 24, Warszawa, 1965.
- [100] Wilk Z.: Eksploatacja złóż płynnych surowców mineralnych. Wyd. "Śląsk", Katowice 1969.
- [101] Woropajew A.F.: Teorija tieploobmienu rudnicznowo wozducha i gornych porod w głubokich szachtach. Izd. "Niedra", Moskwa 1966.
- [102] Wiles G.G.: Wet-buld temperature gradients in horizontal airways. J. South African Inst.Min.Met. Febr. 1959.

DODATEK

Tablica 1

Zestawienie wyników pomiarów klimatycznych w szybach

Lp.	H m	t _{s1} °C	t _{w1} °C	t _{s2} °C	t _{w2} °C	A m ²	ϕ °C	ṽ m ³ /s	Kop. nr
1	930	10,1	8	14,8	13,6	36	34	36	4
2	410	11,2	8,8	16,2	14,6	36	20	110	11
3	610	11,2	8,8	18,6	17	36	20	80	
4	610	11,8	9,6	17,6	16	36	20	81	
5	350	14	12	17	15,4	44	18	500	9
6	350	14,8	12,2	17,8	15,6	-	-	-	
7	500	9,5	9	12,5	10,5	35	22	171	14
8	710	9,5	9	14	12	-	28	98	
9	500	9,5	9	13	11	-	22	201	
10	710	9,5	9	14	12,5	-	28	106	
11	500	8	7	13	12	-	22	171	
12	710	8	7	15	14	-	28	98	
13	500	6	4	11	10	-	22	171	
14	710	6	4	12	11	-	28	98	
15	578	10,8	10	16,4	15,6	31	31	146	2
16	578	12	9,4	16,2	15	-	-	-	
17	713	10,8	9,4	18,4	17,4	-	36	25	
18	713	10,4	9,2	18,2	17,4	-	-	-	
19	703	17,6	15,8	19,6	18,4	35	36	25	
20	703	13,1	10,4	17,2	15,2	-	-	-	
21	713	16,2	14,2	19,2	17,6	-	-	82	
22	713	15	13,2	18,2	16,6	-	-	-	
23	550	21,2	20	21,5	20,5	30	27	100	15
24	750	23	20,5	23,2	21	-	35	60	
25	550	21	19,5	21,5	20	-	27	100	
26	800	14,2	12	21,8	19,6	18	31	67	7
27	800	8,4	6	20,8	18,6	-	-	-	
28	600	13,4	11	19,2	17	-	25	143	
29	400	9,8	7,6	20,8	18,6	-	20	-	
30	900	14,4	12	19,2	17	-	34	67	
31	400	19	18	16	14	11	20	45	
32	600	15,0	12,8	19,2	17,2	-	25	-	
33	580	26,2	20,2	24,6	22,6	44	-	270	16
34	580	25,6	21	24,8	24	-	-	276	
35	580	24,2	20,2	23	22	-	-	-	
36	580	20	13,2	26,6	21,4	-	-	272	
37	705	26,2	20,2	20,4	19,8	-	29	270	
38	705	25,6	21	20,2	19,6	-	-	276	
39	705	20	13,2	20	18,2	-	-	272	

Lp.	H m	t _{s1} °C	t _{w1} °C	t _{s2} °C	t _{w2} °C	A m ²	Δ °C	V̇ m ³ /s	Kop. nr
40	705	24,2	20,2	15,8	14,6	-	-	278	
41	220	12,2	10,8	14,4	12	39	12	78	12
42	448	12,4	10,9	14	11,6	24	18	102	
43	640	12,5	10,8	14,8	12,6	44	22	50	
44	300	18,0	16,0	22,0	20,0	26	17	72	19
45	300	4	2	15	13	26	17	72	
46	400	5	2	15	12	26	20	57	
47	-	17	15	20	18	-	-	-	
48	530	4	2	17	14	-	24	85	
49	-	13	11	22	20	-	-	-	
50	400	4	2	17	15	41	20	234	
51	-	14	12	22	20	-	-	-	
52	600	3	1	15	13	-	28	8	
53	640	8	6	13,6	11	39	27	72	17
54	-	20	18	20,6	18	-	-	-	
55	780	4	2	18,4	16	44	31	200	
56	-	17	15	23,6	21	-	-	-	
57	575	10	8	18	16	12,6	22	16	20
58	-	19	17	22	20	-	-	-	
59	690	9	7	16	14	19	25	50	
60	-	19	17	22	20	-	-	-	
61	825	9	7	18	16	-	28	40	
62	-	20	18	22	20	-	-	-	
63	575	15	13	19	17	50,2	22	150	
64	-	18	16	23	21	-	-	-	
65	825	26	24	20	18	-	28	125	
66	-	12	10	18	16	-	-	-	
67	510	5	3,2	19	16,4	23,2	22	84	21
68	-	19	17	19,8	17	-	-	50	
69	790	5	4	18,2	17	-	30	75	
70	-	18	16	21,2	18,8	-	-	45	
71	630	8,2	6	15,4	13,2	33	25	183	
72	-	19	17	19,6	17,2	-	-	200	
73	790	8,4	6,6	19	17,2	-	30	140	
74	-	18	16	21	19	-	-	160	
75	218	15	13,5	16,2	14,6	35	13	89	10
76	318	15	13,5	17	15	-	16	87	
77	400	-	-	18	16,4	-	19	81	
78	500	-	-	19	16,4	-	22	65	
79	218	14,4	13,6	16,4	15,2	-	13	89	

cd. tablicy 1

Lp.	H m	t _{s1} °C	t _{w1} °C	t _{s2} °C	t _{w2} °C	A m ²	α °C	Ṡ m ³ /s	Kop. nr
80	318	-	-	16,8	15,3	-	16	87	
81	400	-	-	18,4	16,7	-	19	81	
82	500	-	-	18,8	17,2	-	22	65	
83	220	12,8	8,4	13,0	10,4	33	13	110	
84	-	10,4	8	-	11,6	-	-	114	
85	300	12,8	8,4	13,2	11,3	-	16	107	
86	-	10,4	8	-	11,8	-	-	108	
87	400	12,8	8,4	14	11,5	-	19	81	
88	-	10,4	8	13,8	11,8	-	-	75	
89	630	12,8	8,4	16	13,4	-	26	48	
90	-	10,4	8	15,2	13,5	-	-	-	
91	431	2,4	1,6	10	9	28	20	208	13
92	-	6,4	5,4	13	11,8	-	-	-	
93	631	4	3,2	13	12	-	25	93	
94	631	2,0	1,2	12,4	11,4	28	25	93	13
95	500	18,6	16,8	23,4	21,2	44	22	160	1
96	-	7,6	5,4	11,5	10,6	-	-	-	
97	-	4,2	2,4	10,2	8,2	-	-	-	
98	700	17,2	15	24,1	21,9	-	29	123	
99	-	10,8	8,2	17,2	14,6	-	-	-	
100	-	4,2	2,4	10,6	9	-	-	-	
101	280	11,2	8,8	12	10,2	-	15	122	11
102	-	10,6	8,8	11	9,2	-	-	113	
103	410	11,2	8,8	16,6	15	-	20	110	
104	580	4	2,4	11,4	10,4	48	25	90	
105	-	4	2,4	12,8	11,6	-	-	61	
106	260	15,4	13,6	17,2	15,6	41	15	280	5
107	380	15,4	-	17,6	16,2	-	19	270	
108	500	-	-	17,8	16,6	-	24	250	

Tablica 2

Zestawienie wyników pomiarów klimatycznych
w przekopach i przecznicach

Lp.	H m	s m	t _{s1} °C	t _{w1} °C	t _{s2} °C	t _{w2} °C	A m ²	α °C	Ṡ m ³ /s	Kop. nr
1	840	160	21,4	20,8	22,3	21,3	12,6	31	46	4
2	-	173	19,1	17,6	19,5	17,9	17,9	32	24	
3	860	300	19	17,5	20,5	19,1	18,1	32	26	
4	-	400	-	-	-	-	18	32	24	

cd. tablicy 2

Lp.	H m	s m	t _{B1} °C	t _{w1} °C	t _{B2} °C	t _{w2} °C	A m ²	ψ °C	V̇ m ³ /s	Kop. nr
5	500	350	17,2	15,2	16,8	16,2	12,6	23	71	10
6	-	400	19,6	18	19,4	17,8	12,7	-	22	
7	650	550	19,2	16,8	20	18,2	9,2	27	18	
8	500	500	18,6	17	18,8	18,4	12,6	23	73	
9	-	350	18,6	17	18,2	17,2	12,6	-	-	
10	630	220	15	10,8	17,6	14,2	14,9	26	62	
11	620	320	16,8	14,2	16,8	15	16,6	-	84	
12	-	300	-	13,4	17	14,4	10,6	-	-	
13	-	620	-	15	16,6	15,6	11,2	-	49	
14	-	220	18,4	17	19,2	17,6	14,9	-	24	
15	720	460	14,5	13	17	15	6,5	25	84	14
16	-	500	15	14	17	15	14	28	119	
17	-	1230	17	15	19	16,5	11,5	-	100	
18	600	1020	12	11	13	11,4	-	25	81	
19	-	414	13	11	-	11,5	-	-	63	
20	500	180	12	11,5	13	-	9,5	22	26	
21	431	1050	10,0	9,0	14,0	13,0	10,1	19	37,3	13
22	-	-	13	11,8	14,4	13,4	-	-	-	
23	425	2650	13,6	12,4	14	13	13	19	40	
24	-	-	13	11,8	14,2	13,2	-	-	-	
25	420	1500	14	13	17,6	16,6	10	-	25,3	
26	-	-	14,2	13,2	-	-	-	-	22,1	
27	-	1600	14	13	16,8	15,8	10,2	-	14,6	
28	-	-	16,2	15,2	18,4	17,4	-	-	15,1	
29	630	270	13	12	13,2	12,2	16	26	55,2	
30	-	-	12,4	11,4	13	12	-	-	-	
31	580	340	16,4	15,6	17,2	16,4	11,8	31	95	2
32	-	-	16,2	15	17,4	-	-	-	-	
33	-	720	17	15,6	-	15,8	9,6	-	57	
34	-	-	17,4	16,4	17,6	16,6	-	-	-	
35	713	730	22,4	22,2	22,6	22,2	8	36	25	
36	-	-	22,6	22	22,8	22,4	-	-	-	
37	703	1990	18,2	17,4	21,8	21,2	8,2	-	30	
38	-	-	17	15,2	21,2	20,2	-	-	-	
39	-	1590	19,6	18,4	21,8	20	6,7	-	15	
40	-	-	17	15,2	21	19	-	-	18,2	
41	713	1370	19,2	17,6	19,4	18	9,6	-	45	
42	-	-	18,2	16,6	18,6	17,2	-	-	-	
43	550	400	23	20,7	23,5	21	10	28	18	15
44	-	500	22,7	20	23	20,7	8,5	-	40	

cd. tablicy 2

Lp.	H m	s m	t _{s1} °C	t _{w1} °C	t _{s2} °C	t _{w2} °C	A m ²	α °C	∇ m ³ /s	Kop. nr
45	750	-	26,5	24	27	25	13	35	60	
46	-	1500	25,5	23,5	26,5	24,5	-	-	62	
47	-	400	23,5	21	24,5	22,5	17	-	60	
48	550	-	22	-	23	22	10	28	30	
49	800	300	21,8	19,6	22,4	20	-	31	11	7
50	-	800	22,6	20,4	24	21,6	-	-	16	
51	-	2000	21,4	19	22,8	20,2	9	-	44	
52	600	2700	19,4	17,2	20,4	18	8,5	25	23	
53	260	435	20,2	18,6	19,8	18,4	13	15	54	5
54	-	135	19,8	18,4	19	17,8	-	-	81	
55	380	100	19,2	17,8	19,4	18	12	19	24	
56	-	135	19,4	18	19,6	18,2	-	-	21	
57	260	325	19,6	-	19,4	-	-	15	72	
58	-	515	20,2	18,8	19,8	18,8	-	-	18	
59	500	670	19,6	18,4	19,7	18,6	-	24	45	
60	-	180	19,8	18,4	19,9	18,6	-	-	50	
61	705	700	18,4	15,4	21	18,2	12,2	31	13	8
62	-	360	11,4	9,2	12,6	10,2	14,5	-	60	
63	-	350	22,8	20,4	23,4	20,8	10,5	-	23	
64	-	-	12,6	11	14,8	12	11,3	-	20	
65	580	500	18,6	17,0	18,8	17,2	14,3	27	84	8
66	-	360	19	17,6	19,2	18	13	-	81	
67	705	160	24,2	20,2	24,8	24	12,4	29	64	16
68	-	-	25,6	21	-	-	-	-	-	
69	-	-	19,6	13,6	23,2	22,6	-	-	66	
70	410	1200	16,6	15,2	16,4	15	12	20	36	11
71	-	-	18,4	16,8	18	16,6	-	-	41	
72	610	1400	19	17,6	17,8	-	10	25	50	
73	-	-	22,6	21,4	22	21	-	-	24	
74	410	800	16,4	15	16,8	15,4	12	20	62	
75	-	-	17,8	16,2	18	16,4	-	-	18	
76	700	100	10,6	9	12,6	10,6	11,2	29	29	1
77	-	-	19,6	17,4	22,8	19,6	-	-	-	
78	-	120	10,6	9	10,8	8,6	12,5	-	28	
79	-	-	19,6	17,4	18,9	17,8	-	-	-	
80	390	800	17,2	15,4	18,1	16,4	8,1	16	31	3
81	-	-	17,4	15,6	18,3	-	-	-	-	
82	-	640	17,4	-	17,9	15,8	9,1	-	39	
83	-	-	17,8	15,8	18,1	16,2	-	-	-	
84	350	1000	17,6	-	18	16	15	14	83	9

od. tablicy 2

Lp.	H m	s m	t _{s1} °C	t _{w1} °C	t _{s2} °C	t _{w2} °C	A m ²	ψ °C	V̇ m ³ /s	Kop. nr
85	-	-	17,9	16	18,3	16,2	-	-	90	
86	220	500	15,2	13,2	16	14,4	10	12	26	12
87	-	400	16	14,4	16,8	15,6	-	-	24	
88	480	1100	15,6	13,6	-	15	14,2	18	79	
89	-	750	16,8	15	18	17	11,7	-	32	
90	640	400	14,8	12,6	15,2	14,4	15,8	22	38	
91	-	820	17	16,2	18,4	17,4	15,7	-	36	
92	530	3000	14	12	23	21	8,5	24	7	19
92	-	-	22	20	-	-	-	-	14	
93	660	1500	20	18	22	20	9	28	16	
94	-	-	23	21	24	22	-	-	-	
95	780	700	22	19,4	24	21,6	12,5	31	27	17
96	-	-	23,0	20,6	24,6	22	-	-	28	
97	640	3500	13,6	11	23	20,6	9	27	58	
98	-	-	20,6	18,8	-	-	-	-	-	
99	825	900	19	17	20	18	10,5	28	-	20
100	-	-	17	15	-	-	-	-	57	
101	-	160	20	18	23	21	9	-	40	
102	-	-	-	-	20	18	-	-	39	
103	825	600	23	21	22	20	10	28	16	
104	-	-	20	18	-	-	-	-	-	
105	790	1250	17	13,4	25	23,2	-	30	10	21
106	-	-	21,6	18,8	22,4	20	-	-	27	

Tablica 3

Zestawienie wyników pomiarów klimatycznych w chodnikach węglowych

Lp.	H m	s m	t _{s1} °C	t _{w1} °C	t _{s2} °C	t _{w2} °C	A m ²	ψ °C	V̇ m ³ /s	Kop. nr
1	200	740	13,0	12,8	13,1	12,9	9,2	12	7,6	18
2	-	102	15,6	15	15	14,8	5,9	-	7,4	
3	230	515	13,4	13,2	13,8	13,6	7,2	13	6	
4	270	620	14,8	14,2	21,8	19,8	7,5	-	2,5	
5	310	672	14,6	14,4	15,6	14,6	8,9	14	16,7	
6	-	100	13,4	13,4	14	14	11	12	34	
7	295	270	12,6	12,4	13	13	10,5	13	49	
8	270	600	13,8	12,6	14,2	14	9,9	-	16,8	
9	450	290	19,8	18,8	22,2	21,2	8	21	8	10
10	580	280	22,4	21,2	24,4	24,2	8,5	25	10,6	

Lp.	H m	F m	t _{g1} °C	t _{w1} °C	t _{g2} °C	t _{w2} °C	A m ²	α °C	V m ³ /s	Kop. nr
11	490	200	19,2	18,6	19,8	19,2	8,1	22	16,2	
12	620	670	17,4	16,8	20,2	19,6	11,3	26	29,4	
13	570	275	18	17	19,6	19,2	5,5	24	22	
14	-	330	19,2	19	19,6	19,4	6	-	30	
15	580	460	19	17	22	18	6,5	25	16	14
16	-	320	22	18	24,8	22,5	-	-	13	
17	710	1230	17	15	19	16,5	11,5	28	10	
18	-	270	19	16,5	21,5	19	8	-	20	
19	510	620	22	20	27	25	7	22	14	
20	470	320	18	16	20	18	-	21	11	
21	430	800	23	22	26	25	6,4	22	-	
22	-	860	15	13	24	22	8	20	19	
23	-	270	-	14	16	15	7,1	-	21	
24	670	250	19,4	18,2	19,2	18,2	7	33	12,3	2
25	-	-	18,8	17,2	18,9	17,6	-	-	-	
26	580	200	20	18,8	23	20,6	8,1	31	8,1	
27	750	550	23,6	22	27	25,4	7,6	38	8,3	
28	-	-	22,6	21,2	26,6	25	-	-	-	
29	590	250	20,2	18,4	21,2	19,2	7,5	31	8,5	
30	570	140	20	18,8	21	-	7,6	-	10,2	
31	-	-	23	21,4	23,8	21,8	-	-	-	
32	580	180	23,2	21,2	24	22,4	7,5	31	6,7	
33	670	510	20,4	19,8	22	20,2	8	-	6,6	
34	-	-	20	19,2	21,6	20,6	-	-	7,5	
35	650	250	18,8	17,2	18,8	17,6	7	33	12,3	
36	710	220	22,8	22,4	25	24	7,5	36,5	3,6	
37	-	-	-	-	24,8	24,2	-	-	4,6	
38	590	250	20,2	18,4	21,2	19,2	7,5	31	8,5	
39	-	-	19,8	18,2	21	19,4	-	-	-	
40	370	200	18,2	17,4	18,4	17,6	7,3	18	9,5	13
41	-	-	18,4	17,6	18,6	17,8	-	-	8,7	
42	360	300	16,6	15,8	19,2	18,6	6,3	-	6,3	
43	360	300	16,0	15,2	19,4	18,6	6,3	18	6,5	13
44	630	140	13,2	12,2	14,6	13,8	5,4	26	-	
45	-	-	13	12	14,4	13,6	-	-	6,3	
46	230	200	18,1	17,3	20,2	19,4	5,7	13	7,4	
47	-	-	19,1	18,3	20,6	19,8	-	-	-	
48	400	-	15	14,2	16,6	15,8	8,8	18	6,8	
49	-	-	14,8	14	16	15,2	-	-	8	
50	600	730	16,2	15	16,8	16	6,3	24	4,9	

cd. tablicy 3

Lp.	H m	s m	t _{s1} °C	t _{w1} °C	t _{s2} °C	t _{w2} °C	A m ²	ϕ ² °C	V̇ m ³ /s	Kop. nr
51	-	-	15,2	14,2	16,2	15,4	-	-	4,8	
52	-	1280	16,2	15	18,6	17,6	8,2	-	7,8	
53	-	-	15,2	14,2	17,8	16,8	-	-	6,5	
54	840	50	22,3	21,3	23	22,4	9,1	31	24	4
55	890	360	24,2	23,1	25,8	24,8	-	33	9	
56	860	460	25	24,1	26,1	25,7	7,3	32	7	
57	770	120	21,6	20,4	24,1	23	8	29	17	
58	880	310	22,3	21,3	24,2	23,1	10	33	24	
59	800	1030	21	19,9	25	24,1	12,6	30	17	
60	650	600	24,5	22,5	26	25	5	32	13	15
61	750	-	27	25	27	26,5	6,5	35	17	
62	700	700	-	26,8	28,5	27,2	7,5	33	12	
63	-	250	27,5	25	28,0	25,4	6	-	20	
64	500	350	24,5	23	25	24	-	26	5	
65	-	600	23	20,7	24,5	23	5	25	8	
66	262	250	17,2	16,1	17,8	17,4	6,6	13	4	12
67	490	825	18	17,2	18,8	18,4	9,5	19	20	
68	580	180	18,9	18,4	22,3	21,7	10,3	21	5	
68	560	1810	21,8	21,2	22,4	21,8	10	20	13	
69	780	160	26	23,6	25	23	7	31	17,5	17
70	-	-	27	24,4	25,6	23,4	-	-	24	
71	550	700	23	21	24	22	-	27	9	19
72	-	-	24	22	25	23	-	-	8	
73	600	850	22	20	23	21	-	25	7	
74	-	-	23	21	24	22	-	-	6	
75	825	500	22	20	25	23	-	28	7	20
76	825	800	-	-	-	-	-	-	-	

Tablica 4

Zestawienie wyników pomiarów klimatycznych w ścianach

Lp.	H m	s m	t _{s1} °C	t _{w1} °C	t _{s2} °C	t _{w2} °C	A m ²	ϕ ² °C	V̇ m ³ /s	Kop. nr
1	525	170	26,4	24,0	26,6	24,4	6	21	7,2	7
2	590	140	23,8	21,4	26,4	23,8	-	23	5,5	
3	830	160	26,4	24	27,4	24,8	7	30	9,7	
4	730	190	23,6	21,2	24,8	22,4	-	27	10,5	
5	670	-	21,4	20	22,4	20	-	25	15,2	
6	630	180	20,2	17,8	21,2	19	5	24	11,6	

cd. tablicy 4

Lp.	H m	s m	t _{s1} °C	t _{w1} °C	t _{s2} °C	t _{w2} °C	A m ²	ϕ [*] °C	V̇ m ³ /s	Kop. nr
7	730	170	25,8	23,4	26,8	24,4	7	27	9	
8	830	160	25,4	23	26,6	24,2	6	30	9,2	
9	780	-	26	23,8	27,2	24,8	-	29	11,2	
10	200	150	13	12,8	15,8	15,5	-	12	7,4	18
11	-	140	15	14,8	15,9	15,8	-	-	6,9	
12	220	125	13,8	13,6	16	-	-	-	3,2	
13	280	150	17,8	17,2	21,8	19,8	-	14	11,4	
14	300	-	15,6	14,6	17	16,6	-	-	6,3	
15	840	160	23	22,4	24,1	23,7	7	31	23,4	4
16	880	-	25,8	24,8	27	26,4	8	33	9	
17	710	130	26,1	25,7	28,2	27,6	6	28	8,4	
18	-	-	26,5	25,9	28,3	-	6	-	-	
19	880	160	24,1	23	26	24,8	8	33	8,3	
20	500	150	25,5	24	-	24,5	6	24	7	15
21	-	160	14,5	23	25	23,5	4,5	-	7	
22	600	200	28	27	28,2	27,4	6	27	8	
23	-	-	-	-	28,5	27,4	5	26	13	
24	550	-	26	25	27	25,5	-	-	12	
25	500	-	-	24,8	26,2	25	6	24	20	
26	263	180	17,8	17,4	18	17,6	6,1	13	4	12
27	578	160	22,3	21,7	22,4	22	6,6	21	5	
28	560	150	22,4	21,8	23,2	23	7,5	21	7,5	
29	550	120	23	21	23,1	22	7	25	7	19
30	-	-	24	22	24,1	23	-	-	-	
31	600	150	24	22	26	25	5	27	9	
32	-	-	25	23	-	24	-	-	-	
33	780	160	26	23,6	25	23	6	31	17	17.
34	-	-	27	24,4	25,6	23,4	-	-	25	
35	570	80	21,0	19,2	24,2	23,0	6,6	31	10,2	2
36	-	-	23,8	21,8	25,8	24,2	-	-	9,7	
37	-	150	-	22,2	25	23,8	6,1	-	19,3	
38	-	-	25	22,8	25,2	23,4	-	-	17,3	
39	700	160	26,6	26,2	26,8	26,6	7,1	36	7,3	
40	-	-	26,4	26,2	27	26,8	-	-	7,8	
41	710	150	25	24	27,2	26,4	6	-	3,6	
42	-	-	24,8	24,2	27,4	26,4	-	-	5	
43	600	140	22	20,2	25,6	24,4	7,5	32	8,8	
44	-	-	21,6	20,6	24,6	23,4	-	-	-	
45	570	170	25,6	24,4	25,8	25,2	6,3	30	8,6	
46	-	-	24,6	23,4	25,4	25,2	-	-	9,5	

od. tablicy 4

Lp.	H m	B m	t _{s1} °C	t _{w1} °C	t _{s2} °C	t _{w2} °C	A m ²	α °C	∇ m ³ /s	Kop. nr
47	590	110	21,2	19,2	24,8	23	6,2	31	8,3	
48	-	-	21	19,4	24,4	-	-	-	-	
49	-	100	24,8	23	26,6	25,6	8	31	6,7	
50	-	-	24,4	22,6	26,4	24,8	-	-	-	
51	580	105	24	22,4	26	24,6	7,6	30	6,7	
52	-	-	23,2	21	25	23	-	-	-	
53	690	50	22,4	21,6	24,4	23,4	8,2	36	-	
54	-	-	22,2	21,2	24	22,8	-	-	7,7	
55	620	100	19,2	18,2	22	20,4	7,2	32	12,5	
56	-	-	18,8	17,6	21,2	19,4	-	-	-	
57	730	150	27	15,4	29,8	28,6	-	36	8,8	
58	-	-	26,6	25	29,2	27,8	7,5	-	-	
59	390	250	17,6	15,6	19,2	18,8	6	19	16,2	10
60	496	40	19,8	19	21,8	20,8	-	22	9,6	
61	550	200	24,4	23,4	25,2	24,6	7	24	15,4	
62	510	100	19,2	19,0	22,6	22,2	6,5	22	22,7	
63	550	300	20,2	20,2	19,6	22,6	10	24	22	
64	530	330	19,6	19	22,2	22,2	8	20	23	
65	500	530	21,6	20,7	23,4	23,2	6	22	6	
66	400	100	22,2	21,2	22,4	22,2	-	19	12	
67	570	160	25	23	30	28	10	21	13	14
68	710	150	21,5	19	28	25	-	28	20	
69	510	200	27	25	29	26	-	22	14	
70	470	--	20	18	24	22	-	21	11	
71	430	-	26	25	29	26	-	22	-	
72	-	-	24	22	27	-	8	20	9	
73	-	-	16	15	20	18	10	20	21	
74	330	190	18,6	16,8	20,8	20,2	5,8	16	5,8	13
75	-	-	19,4	18,6	-	20	-	-	6	
76	340	210	19,2	18,4	22,4	21,6	6,1	-	7,7	
77	-	-	19,8	19	22,6	21,6	-	-	7,9	
78	210	200	21,1	20,5	23,2	22,4	6,4	13	8,3	
79	-	-	21,5	20,8	23,6	22,8	-	-	-	
80	630	160	14,6	13,8	20,6	19,8	5,1	25	6,1	
81	-	-	14,4	13,6	20,4	19,6	-	-	5,9	
82	550	-	17,7	16,8	21,4	20,6	8,2	23	8,2	
83	-	-	17	16	21,2	20,4	-	-	-	

PROCES NAWILŻANIA POWIETRZA W WYROBISKACH GÓRNICZYCH
W ŚWIETLE ROZWAŻAŃ TEORETYCZNYCH I OBSERWACJI W KOPALNIACH

S t r e s z c z e n i e

Rozprawa składa się z dwóch zasadniczych części.

W części pierwszej w świetle rozważań teoretycznych omówiono główne czynniki warunkujące proces wymiany masy w wyrobiskach górniczych. Stwierdzono, że głównymi źródłami wody nawilżającej powietrze jest górotwór oraz woda zużyta w procesie technologicznym związanym z urabianiem i transportem urobku. W dalszej części pracy omówiono mechanizm wymiany masy w wyrobisku w zależności od miejsca i źródła wody. Zwrócono uwagę na trudności w określeniu niektórych wielkości opisujących zjawisko ruchu wilgoci.

Przeprowadzona analiza metod prognozowania temperatury powietrza, pozwoliła ustalić wielkości opisujące wymianę masy:

- współczynnik wymiany masy β ,
- przyrost wilgotności względnej $\Delta\varphi$,
- przyrost wilgotności właściwej Δx ,
- współczynnik przejmowania wilgoci c .

W części drugiej omówiono warunki klimatyczne na podstawie przeprowadzonych pomiarów w 21 kopalniach Zagłębia Górnośląskiego. Następnie ustalono główne czynniki warunkujące proces nawilżania powietrza w postaci liczb bezwymiarowych: Re , Gu , K oraz głębokości H . W wyniku analizy danych ustalono zależności funkcyjne opisujące zmianę wielkości β , $\Delta\varphi'$, $\Delta x'$, c . Stwierdzono, że dotychczas stosowany sposób analityczny ujęcia wymiany ciepła opisany zależnościami (4.16), (4.17), (5.36) i wymiany masy (2.8), (2.12), (3.1) w wyrobiskach górniczych, ze względu na czas przewietrzania i przeznaczenia wyrobiska, nie zawsze właściwie i dokładnie opisuje zachodzący proces nawilżania powietrza. Ustalono, że dla wyrobisk kopalń górnośląskich proces nawilżania powietrza opisują zależności (5.17)-(5.35) oraz wymiany ciepła (4.17).

ПРОЦЕСС УВЛАЖНЕНИЯ ВОЗДУХА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАССУЖДЕНИЙ
И ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИИ. В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Р е з ю м е

Доклад составлен из двух части. В первой, по точке зрения теоретических рассуждений обсуждены главные факторы обуславливающие процесс массообмена в горных выработках. Потверждено, что главными источниками воды увлажняющей воздух является горный массив, как и вода использована в технологическим процессе выемки и транспорта полезного ископаемого. В дальнейшей части работы обсужден механизм массообмена в выработке в зависимости от места источника воды. Подчеркнуты трудности в определении некоторых величин описующих явление передвижения влажности. Переведенный анализ методов прогнозирования температуры воздуха позволил получить величины описующие массообмен:

- коэффициент массообмена β ,
- приращение относительной влажности $\Delta\varphi$,
- приращение удельной влажности Δx ,
- тепловой коэффициент влагообмена c .

Во второй части обсуждены климатические условия на основе проведенных измерений в 21 шахтах Верхисилезского бассейна. В дальнейшем получены главные факторы обуславливающие процесс увлажнения воздуха как безразмерные числа: Re , Gr , K и глубина H . В результате анализа данных получены функциональные зависимости описующие смены величин: β , $\Delta\varphi$, Δx , c .

Потверждено, что до сих пор использован аналитический метод расчета теплообмена описан зависимостями (4.16, 4.17, 5.36) и массообмена (2.8, 2.12, 3.1) в горных выработках, принимая во внимание время вентиляции и предназначения выработки не всегда правильно и точно описует существующий процесс увлажнения воздуха. Получено, что для выработок верхисилезских шахт процесс увлажнения воздуха и массообмена описан относительно зависимостями (5.17 - 5.35 и 4.17).

HUMIDIFYING OF AIR IN MINING HEADINGS IN THE LIGHT
OF THEORETICAL CONSIDERATIONS AND PRACTICAL OBSERVATIONS

S u m m a r y

The work consists of two parts. In the first part main factors determining the problems of mass exchange in headings have been discussed. It has been stated that main humidifying sources are the oxygen and the water as used in the technological process of drawing and transport. In the further part mass exchange mechanism in a heading has been presented as according to place and the water source. Attention has been drawn to the difficulties in the determination of some values describing humidity motion.

An analysis of air temperatures forecasting allowed for the stating of quantities describing mass exchange:

- mass exchange coefficient β ,
- relative humidity growth $\Delta\varphi$,
- specific humidity growth Δx ,
- humidity up-take coefficient c .

The second part discusses climatic conditions on the basis of measurements carried out in 21 coalmines in Upper Silesia. Consequently the main factors conditioning air humidifying have been stated in the form of nondimensional numerals Re , Gu , K and depth H . Resulting from the analysis function dependencies have been determined describing changes of quantities β , $\Delta\varphi$, Δx , c . It has been stated that the up to now used analytical comprehension of heat exchange represented by dependencies (4.16), (4.17), (5.36) and mass exchange (2.8), (2.12), (3.1) in headings and mining works because of the time needed for ventilation and the character of the working is not adequate and precise. For Upper Silesian collieries air humidifying processes dependencies (5.17)-(5.35) and for heat exchange (4.17) are more adequate.

Cena zł 13,—

**WYDAWNICTWA NAUKOWE I DYDAKTYCZNE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ MOŻ-
NA NABYC W NASTĘPUJĄCYCH PLACÓWKACH:**

Gliwice — Księgarnia Techniczna, ul. Konstytucji 14b;

Gliwice — Punkt sprzedaży Studenckiej Spółdzielni Pracy, ul. Wrocławska 4/6;

Katowice — Księgarnia nr 004, ul. Warszawska 11;

Katowice — Księgarnia nr 015, ul. Żwirki i Wigury 33;

Chorzów — Księgarnia nr 063, ul. Wolności 22;

Dąbrowa Górnicza — Księgarnia nr 081, ul. ZBoWiD-u 2;

Rybnik — Księgarnia nr 126, Rynek 1;

Warszawa — Ośrodek Rozpowszechniania Wydawnictw PAN, Pałac Kultury i Nauki.

Wszystkie wydawnictwa naukowe i dydaktyczne zamawiać można poprzez Składnicę Księgarską w Warszawie, ul. Mazowiecka 9.