

Bernard Nowak, Krzysztof Filek*, Bogusław Ptaszyński**

WPŁYW ŹRÓDEŁ CIEPŁA I WILGOCI NA STAN ZAMGLONEGO POWIETRZA W PODZIEMNYCH GÓRNICZYCH WYROBISKACH KORYTARZOWYCH**

1. Wstęp

Ważną klasę przepływów powietrza w wyrobiskach górniczych stanowią przepływy dwufazowe, w tym przepływy powietrza z rozproszoną w nim fazą stałą lub ciekłą (cząstki stałe bądź kropelki cieczy). Z pierwszym z tych przypadków spotykamy się najczęściej przy rozpatrywaniu zagadnień związanych z pyłowymi zanieczyszczeniami powietrza, z drugim – przy rozpatrywaniu zagadnień dotyczących mgły wodnej w powietrzu, powstałej wskutek np. kondensacji pary wodnej w chłodnicach przeponowych lub rozpylania wody przy bezprzeponowym chłodzeniu powietrza.

Drugi z tych przypadków stanowi temat niniejszej pracy. Analizie poddano zmiany temperatury (v) i stanu zawilgocenia powietrza podczas jego ustalonego przepływu przez korytarzowe wyrobisko górnicze.

Przyjęto, że powietrze może zawierać wodę zarówno w postaci pary wodnej, jak i w postaci mgły oraz, że ilościowo zawilgocenie powietrza określone jest za pomocą wilgotności właściwej (masa pary wodnej przypadająca na jednostkę masy powietrza suchego – x) i zawartości mgły (masa kropelek mgły przypadająca na jednostkę masy powietrza suchego – w). Przyjęto ponadto, że wymienione parametry powietrza nie zmieniają się lokalnie w czasie, natomiast zmieniać się mogą wzdłuż wyrobiska (procesy jednowymiarowe przestrzennie). Wyrazić to można następująco:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial t} = 0; \quad v = v(s); \quad x = x(s); \quad w = w(s) \quad (1)$$

gdzie:

- s — współrzędna bieżąca równoległa do osi wyrobiska, skierowana zgodnie z kierunkiem przepływu powietrza [m],
- t — czas [s].

* Katedra Górnictwa Podziemnego, Wydz. Górnictwa i Geoinżynierii AGH Kraków

** Artykuł powstał w ramach pracy statutowej nr 11.11.100.193

2. Źródła ciepła

W wyrobisku kopalnianym zachodzą różne procesy, które z uwagi na ciepłe oddziaływanie na powietrze mogą być uznane za źródła ciepła. Można tu wyróżnić źródła dodatnie i ujemne, rozłożone i skupione, źródła ciepła jawnego i utajonego. Wydajności źródeł ciepła (ciepło przypadające na jednostkę czasu i jednostkę długości wyrobiska) oznaczono dalej przez ξ .

W równaniach uwzględniono:

- dopływ ciepła z górotworu (ξ_1),
- dopływ ciepła od utleniającego się węgla (ξ_2),
- dopływ ciepła od maszyn i urządzeń (ξ_3),
- dopływ ciepła wraz z parą wodną z górotworu (ξ_4),
- odpływ ciepła od powietrza na skutek odparowania wody z kropelek mgły (ξ_5).

Dopływ ciepła z górotworu oraz dopływ ciepła od utleniającego się węgla (ξ_1 i ξ_2) są dodatnimi, rozłożonymi wzdłuż wyrobiska źródłami ciepła jawnego. Maszyny i urządzenia (ξ_3) stanowią lokalne, skupione tylko w pewnych przekrojach wyrobiska, źródła ciepła jawnego. Źródła (ξ_4) i (ξ_5) są rozłożonymi źródłami ciepła utajonego. Poniżej podano zależności, z których wyznaczyć można wydajności źródeł ciepła w wyrobisku [1–3].

Dopływ ciepła z górotworu

$$\xi_1 = q^* \lambda (T_0 - v) = K_\tau B (T_0 - v) \quad (2)$$

gdzie:

- ξ_1 — wydajność dopływu ciepła z górotworu do powietrza w wyrobisku [W/m],
- q^* — bezwymiarowy strumień ciepła z górotworu [–],
- λ — współczynnik przewodnictwa cieplnego górotworu [W/(m·K)],
- K_τ — współczynnik nieustalonej wymiany ciepła [W/(m²·K)],
- B — obwód poprzecznego przekroju wyrobiska [m],
- T_0 — temperatura pierwotna górotworu [°C],
- v — temperatura powietrza w wyrobisku [°C].

Dopływ ciepła od utleniającego się węgla

$$\xi_2 = \pi D q_0 k_w \quad (3)$$

gdzie:

- ξ_2 — wydajność dopływu ciepła z procesu utleniania się węgla do powietrza w wyrobisku [W/m],
- D — średnica hydrauliczna poprzecznego przekroju wyrobiska [m],
- q_0 — ciepło z procesu utleniania się węgla przypadające na jednostkę powierzchni i jednostkę czasu [W/m²],
- k_w — udział części obwodu wyrobiska zajętej przez węgiel w całym obwodzie [–].

Dopływ ciepła od lokalnych źródeł (maszyn i urządzeń)

$$\xi_3 = \sum_{j=1}^m \xi_{3j} \cdot \delta(s-s_j) \quad (4)$$

gdzie:

- ξ_3 — wydajność dopływu ciepła od maszyn i urządzeń do powietrza w wyrobisku [W/m],
- ξ_{3j} — moc j -tego lokalnego źródła ciepła [W],
- j — kolejny wskaźnik lokalnego źródła ciepła w wyrobisku [-],
- m — liczba lokalnych źródeł ciepła w wyrobisku [-],
- s_j — współrzędna lokalizacji j -tego lokalnego źródła ciepła w wyrobisku [m].

Dopływ utajonego ciepła wraz z parą wodną z górotworu

$$\xi_4 = \pi D r_p \Omega (x_n - x) \quad (5)$$

gdzie:

- ξ_4 — wydajność dopływu z górotworu utajonego ciepła wraz z parą wodną do powietrza w wyrobisku [W/m],
- r_p — utajone ciepło parowania wody [J/kg],
- Ω — współczynnik przejmowania wilgoci przez powietrze z górotworu [kg/(m²·s)],
- x — wilgotność właściwa powietrza w wyrobisku [kg/kg],
- x_n — wilgotność właściwa powietrza w stanie nasycenia w temperaturze panującej w wyrobisku [kg/kg].

Odpływ utajonego ciepła z powietrza na skutek parowania wody z kropelek mgły

$$\xi_5 = Q_m r_p \frac{dw}{ds} \quad (6)$$

gdzie:

- ξ_5 — wydajność odbioru ciepła z powietrza na skutek parowania mgły [W/m],
- Q_m — masowy wydatek przepływu powietrza w wyrobisku (odniesiony do powietrza suchego) [kg/s].

3. Źródła wilgoci

Podobnie jak w przypadku źródeł ciepła można mówić o zachodzeniu w wyrobisku pewnych procesów, będących dla powietrza źródłami wilgoci. Można wśród nich wyróżnić źródła pary wodnej i źródła mgły. Wydajności źródeł pary wodnej i źródeł mgły (masa pary lub cieczy przypadająca na jednostkę czasu i jednostkę długości wyrobiska) oznaczono dalej przez η i przez ζ .

W równaniach uwzględniono następujące źródła pary wodnej:

- dopływ pary wodnej z górotworu (η_1),
- dopływ pary wodnej na skutek parowania z otwartych powierzchni w wyrobisku (η_2);
- dopływ pary wodnej związany z przemianami fazowymi wody zawartej w kropelkach mgły (η_3).

Uwzględniono również źródło mgły:

- zmiana masy mgły związana z przemianami fazowymi zawartej w kropelkach wody (ζ_1).

Źródła pary wodnej (η_1 i η_2) są dodatnimi rozłożonymi źródłami wilgoci. Z uwagi na to, że woda z kropelki mgły może parować, zwiększając wilgotność właściwą powietrza i zmniejszając masę mgły, lub przeciwnie – para może się w powietrzu kondensować, zwiększając masę mgły i zmniejszając wilgotność właściwą, źródła (η_3) i (ζ_1) tworzą ściśle związaną ze sobą parę źródeł wilgoci. Proces parowania wody z kropelki stanowi dodatnie źródło pary i identyczne co do wartości ujemne źródło mgły, a kondensacja zawartej w powietrzu pary jest ujemnym źródłem pary i identycznym dodatnim źródłem mgły. Źródła te nie zmieniają więc całkowitej zawartości wilgoci w powietrzu, lecz jedynie jej stan skupienia. Poniżej podano zależności, z których wyznaczyć można wydajności źródeł wilgoci w wyrobisku [1–3].

Dopływ pary wodnej z górotworu

$$\eta_1 = \pi D \Omega (x_n - x) \quad (7)$$

gdzie η_1 — wydajność dopływu pary wodnej z górotworu do powietrza w wyrobisku [kg/(m·s)].

Dopływ pary wodnej na skutek parowania z otwartych powierzchni w wyrobisku

$$\eta_2 = \pi D \varepsilon_m \beta (x_n - x) \quad (8)$$

gdzie:

- η_2 — wydajność dopływu pary wodnej z otwartych powierzchni do powietrza w wyrobisku [kg/(m·s)],
- ε_m — udział mokrej powierzchni ścian wyrobiska w całej powierzchni ścian [-],
- β — współczynnik przejmowania wilgoci przez powietrze z mokrych powierzchni [kg/(m²·s)].

Dopływ pary wodnej związany z przemianami fazowymi wody zawartej w kropelkach mgły

$$\eta_3 = \begin{cases} Q_m \Phi \frac{d\nu}{ds} & \text{gdy } w > 0 \quad \text{lub} \quad \left(w = 0, x = x_n, \frac{d\nu}{ds} < 0 \right) \\ 0 & \text{gdy } x < x_n \quad \text{lub} \quad \left(w = 0, x = x_n, \frac{d\nu}{ds} \geq 0 \right) \end{cases} \quad (9)$$

gdzie:

- η_3 — wydajność dopływu pary wodnej do powietrza z parowania mgły [kg/(m·s)],
 b — ciśnienie bezwzględne powietrza w wyrobisku [Pa].

$$\Phi = \frac{dx_n}{dv} = \frac{1556365 \cdot b \cdot 10^u}{(v + 237,29)^2 (b - 610,6 \cdot 10^u)^2} \quad \text{gdzie } u = \frac{7,5v}{v + 237,29} \quad (10)$$

Zmiana masy mgły związana z przemianami fazowymi kropelek wody

$$\zeta_1 = -\eta_3 \quad (11)$$

gdzie:

- ζ_1 — wydajność procesu parowania ($\zeta_1 < 0$) wody z kropelek mgły lub kondensacji ($\zeta_1 > 0$) pary [kg/(m·s)].

4. Model matematyczny zmian temperatury i zawilgocenia powietrza w wyrobisku

Warunki klimatyczne są określone za pomocą trzech wielkości: temperatury $v(s)$, wilgotności właściwej $x(s)$, która ujmuje zawartość wilgoci w postaci pary wodnej, oraz zawartości mgły $w(s)$. Wielkości te zmieniają się na skutek istnienia w wyrobisku źródeł ciepła i wilgoci.

Oprócz podanych we wstępie przyjęto następujące założenia:

- mgła istnieje tylko w powietrzu nasyconym, tzn. że

$$\begin{cases} \text{dla } [x < x_n \quad (\varphi < 1)] & w = 0 \\ \text{dla } [x = x_n \quad (\varphi = 1)] & w \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

gdzie φ – wilgotność względna powietrza;

- kropelki mgły są na tyle małe, że nie opadają na spąg wyrobiska, lecz unoszą się w powietrzu aż do ich całkowitego wyparowania;
- przy wzroście temperatury powietrza zamglonego wzrost jego wilgotności właściwej (do stanu nasycenia) następuje tylko poprzez parowanie kropelek mgły;
- powietrze jest idealnie wymieszane w każdym poprzecznym przekroju wyrobiska;
- oś wyrobiska przebiega poziomo.

Stosowny układ równań można utworzyć w oparciu o bilans entalpii płynącego powietrza oraz o bilanse masy pary wodnej i kropelek mgły.

Bilans entalpii powietrza

Dla ustalonego przepływu powietrza przez poziome wyrobisko, przy występujących w nim pięciu rodzajach źródeł ciepła ($\xi_1 + \xi_5$).

Bilans ten, korzystając z [3], można zapisać w postaci

$$Q_m \frac{d}{ds} [c_p v(s) + c_w (v(s)x(s)) + r_p x(s) + c_c (v(s)w(s))] = \sum_{i=1}^5 \xi_i(s) \quad (13)$$

gdzie:

- c_p — ciepło właściwe suchego powietrza przy stałym ciśnieniu [J/(kg·K)],
- c_w — ciepło właściwe pary wodnej przy stałym ciśnieniu [J/(kg·K)],
- r_p — utajone ciepło parowania wody [J/kg],
- c_c — ciepło właściwe wody [J/(kg·K)],
- i — (wskaźnik sumowania) kolejny wskaźnik rodzaju źródła ciepła w wyrobisku [-].

Bilans masy pary wodnej

Dla wymienionych wcześniej trzech rodzajów źródeł pary ($\eta_1 \div \eta_3$), bilans ten za [3] daje się zapisać

$$Q_m \frac{dx(s)}{ds} = \sum_{k=1}^3 \eta_k(s) \quad (14)$$

gdzie: k – (wskaźnik sumowania) kolejny wskaźnik rodzaju źródła pary w wyrobisku [-].

Bilans masy kropelek mgły

Dla wymienionego wcześniej źródła mgły (ζ_1), bilans ten przyjmuje postać równania

$$Q_m \frac{dw(s)}{ds} = \zeta_1(s) \quad (15)$$

A zatem matematyczny model omawianego procesu stanowią układy równań:

— dla $w > 0$ lub $\left(w = 0, x = x_n, \frac{dv}{ds} < 0 \right)$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_m \frac{d[c_p v + c_w (vx) + r_p x + c_c (vw)]}{ds} = \\ = q^* \lambda(T_0 - v) + \pi D (q_0 k_w + r_p \Omega (\xi_v - x)) + \sum_{j=1}^m \xi_{3j} \cdot \delta(s - s_j) + Q_m r_p \frac{dw}{ds} \\ Q_m \frac{dx}{ds} = \pi D [\Omega + \varepsilon_m \beta] (x_n - x) + Q_m \Phi \frac{dv}{ds} \\ \frac{dw}{ds} = -\Phi \frac{dv}{ds} \end{array} \right. \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
 & \text{— dla } x < x_n \quad \text{lub} \quad \left(w = 0, x = x_n, \frac{dv}{ds} \geq 0 \right) \\
 & \left\{ \begin{aligned}
 & Q_m \frac{d[c_p v + c_w (vx) + r_p x]}{ds} = \\
 & = q^* \lambda(T_0 - v) + \pi D (q_0 k_w + r_p \Omega (x_n - x)) + \sum_{j=1}^m \xi_{3j} \cdot \delta(s - s_j) \\
 & Q_m \frac{dx}{ds} = \pi D [\Omega + \varepsilon_m \beta] (x_n - x) \\
 & w = 0
 \end{aligned} \right. \quad (17)
 \end{aligned}$$

Dla przejrzystości zapisu w równaniach układów (16) i (17) zrezygnowano z zaznaczenia, które wielkości są funkcjami współrzędnej s . Są to: v , x , w oraz x_n i Φ . Wilgotność właściwa powietrza nasyconego x_n wyraża się wzorem

$$x_n = \frac{379,8 \cdot 10^u}{b - 610,6 \cdot 10^u} \quad (18)$$

zaś jej pochodną po temperaturze v (czyli Φ) oraz wielkość u podano zależnością (10).

Warunki brzegowe równań różniczkowych układów (16) i (17) najczęściej mają postać

$$v(s=0) = v_p \quad x(s=0) = x_p \quad w(s=0) = w_p \quad (19)$$

5. Przykład liczbowy

Za pomocą powyższego modelu matematycznego wykonano, przy wykorzystaniu utworzonego programu komputerowego, przykładowe obliczenia numeryczne temperatury, wilgotności właściwej i zawartości ciekłej wody (mgły) w powietrzu, przy czym przyjęto, że w wyrobisku nie występują lokalne źródła ciepła. Rozważono cztery warianty.

Dane wspólne dla każdego z nich są następujące:

- długość wyrobiska $L = 1000 \text{ m}$;
- ciśnienie bezwzględne powietrza w wyrobisku $b = 105\,000 \text{ Pa}$;
- temperatura powietrza na wlocie wyrobiska $v_p = 20^\circ\text{C}$;
- pole powierzchni poprzecznego przekroju wyrobiska $F = 15 \text{ m}^2$;
- współczynnik przejmowania pary wodnej z górotworu $\Omega = 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;
- objętościowy wydatek przepływu powietrza $Q = 15 \text{ m}^3/\text{s}$;

- temperatura pierwotna górotworu $T_0 = 40 \text{ C};$
 - jednostkowe ciepło z procesu utleniania się węgla $q_0 = 7,5 \text{ W/m}^2;$
 - czas przewietrzania wyrobiska (2 lata) $\tau_p = 63\ 072\ 000 \text{ s};$
- Pozostałe dane, konieczne do wykonania obliczeń, wyznaczono z zależności:
- obwód poprzecznego przekroju wyrobiska $B = 4,16\sqrt{F} \text{ [m]},$
 - średnica poprzecznego przekroju wyrobiska $D = 2r_w = 0,3184B \text{ [m]},$
 - udział części obwodu wyrobiska zajętej przez węgiel $k_w = \frac{4}{B} [-],$
 - współczynnik wyrównywania temperatury $a = 0,35(3 - 2k_w) \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2/\text{s]},$
 - współczynnik przewodnictwa cieplnego górotworu $\lambda = 0,395(6 - 5k_w) \text{ [W/(mK)},$
 - liczba Fouriera $Fo = \frac{4a \cdot \tau_p}{D^2} [-],$
 - średnia prędkość przepływu powietrza $v = \frac{Q}{F} \text{ [m/s]},$
 - współczynnik przyjmowania ciepła od ociosów $\alpha = 6,3 \frac{v^{0,75}}{r_w^{0,25}} \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K)},$
 - współczynnik przyjmowania wilgoci z odkrytych powierzchni $\beta = 0,0074 \frac{v^{0,75}}{F^{0,125}} \text{ [kg/(m}^2 \cdot \text{s)},$
 - współczynnik nieustalonej wymiany ciepła $K_\tau = \frac{\lambda(1 + 4Fo^{0,25})}{0,88\sqrt{a \cdot \tau_p} + \frac{\lambda}{\alpha}} \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K)},$
 - bezwymiarowy strumień ciepła z górotworu $q^* = \frac{K_\tau B}{\lambda} [-].$

Ponadto przyjęto zawartość mgły w powietrzu na wlocie wyrobiska (w_p) oraz udział mokrej powierzchni ścian wyrobiska w całej powierzchni (ϵ_m):

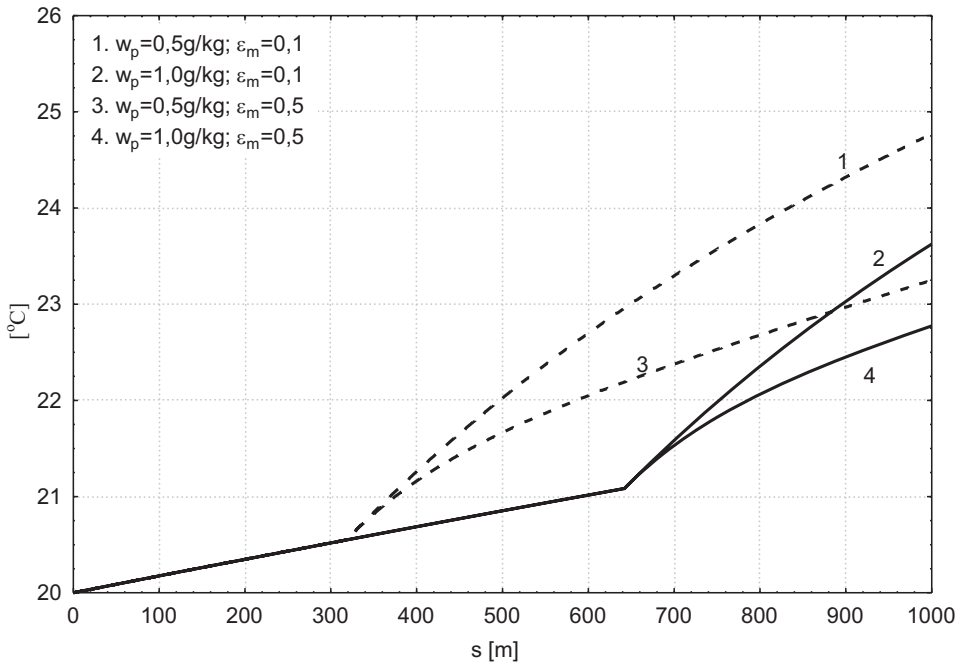
- wariant 1 $w_p = 0,5 \text{ g/kg}, \epsilon_m = 0,1;$
- wariant 2 $w_p = 1 \text{ g/kg}, \epsilon_m = 0,1;$
- wariant 3 $w_p = 0,5 \text{ g/kg}, \epsilon_m = 0,5;$
- wariant 4 $w_p = 1 \text{ g/kg}, \epsilon_m = 0,5.$

Zgodnie z wcześniejszym założeniem można napisać:

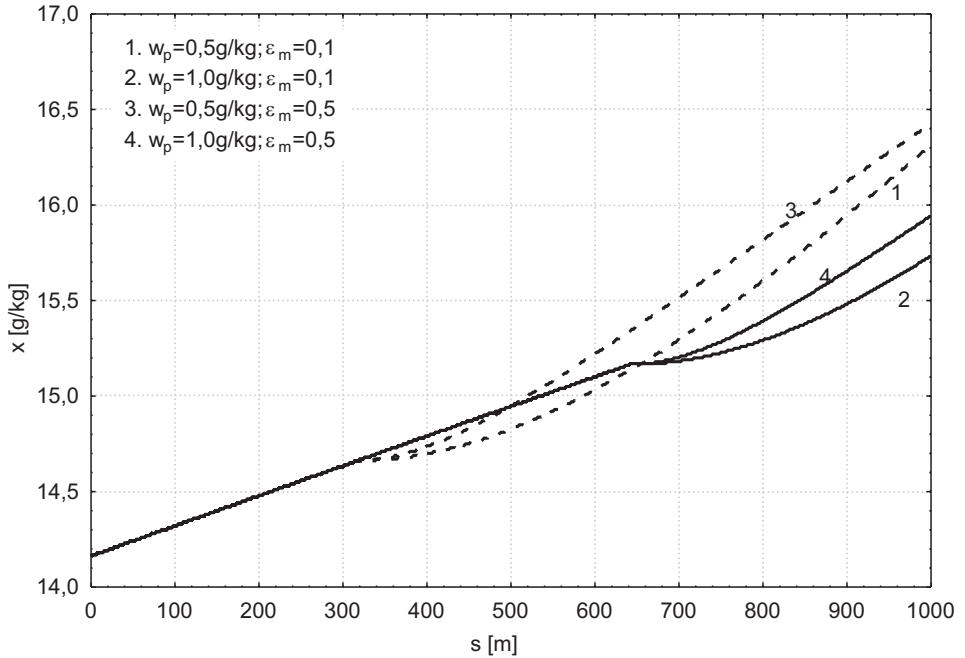
φ_p – wilgotność względna powietrza na wlocie wyrobiska $\varphi_p = 100\%;$

$x_p = x_n(v_p).$

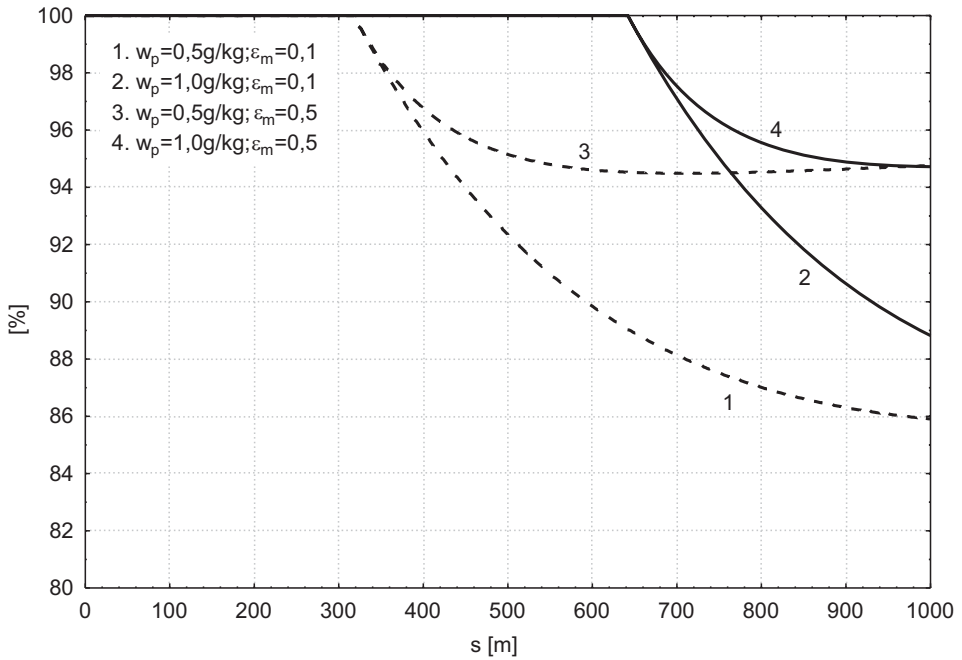
Wyniki obliczeń przedstawiono w formie wykresów $v(s)$, $x(s)$, $w(s)$ i $\varphi(s)$ (rys. 1–4).



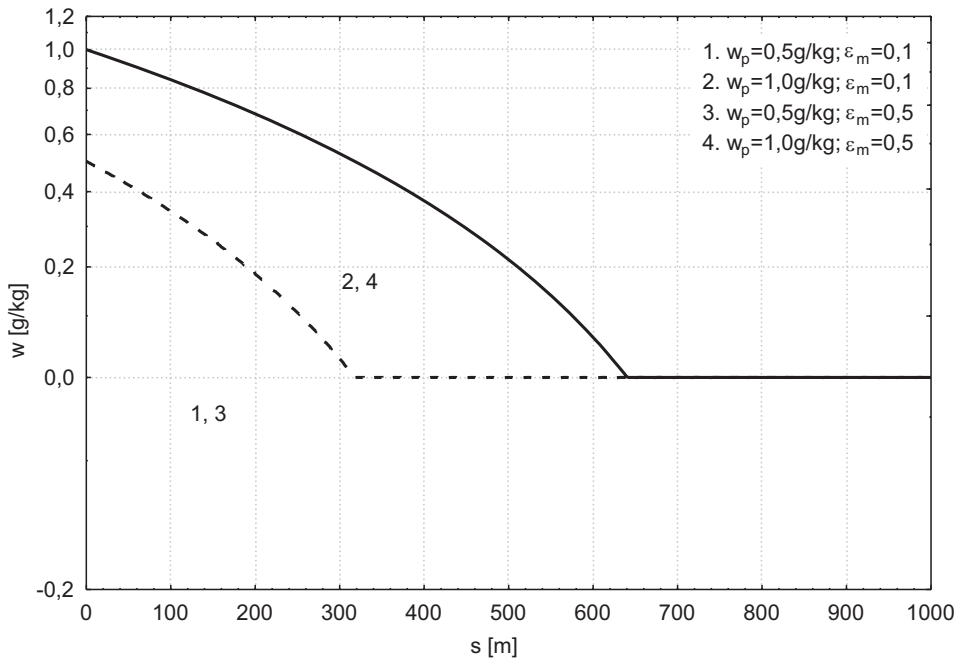
Rys. 1. Rozkłady temperatury powietrza wzdłuż wyrobiska



Rys. 2. Rozkłady wilgotności właściwej powietrza wzdłuż wyrobiska



Rys. 3. Rozkłady wilgotności względnej powietrza wzdłuż wyrobiska



Rys. 4. Rozkłady zawartości mgły w powietrzu wzdłuż wyrobiska

6. Wnioski

Poniższe wnioski opierają się na wynikach obliczeń wykonanych w ramach przykładu obliczeniowego.

Już pobieżna obserwacja wyników przeprowadzonych obliczeń pozwala wysnuć wniosek, że zawilgocenie powietrza kopalnianego kropelkami mgły ma duży wpływ na rozkład temperatury i wilgotności powietrza wzdłuż wyrobiska.

Jeżeli w powietrzu znajduje się mgła, to zarówno temperatura powietrza (v), jak i wilgotność właściwa (x) przyrastają liniowo ze współrzędną s . Po wyparowaniu mgły temperatura rośnie bardziej stromo wzdłuż krzywej o charakterze wykładniczym, zaś wilgotność właściwa zmniejsza bezpośrednio za przekrojem całkowitego zaniku mgły stromość swego wzrostu.

Zależnie od wlotowej zawartości mgły (w_p) jej zanikanie zachodzi na odcinkach wyrobiska o różnej długości – i tu także obserwuje się proporcjonalność długości odcinka z powietrzem zamglonym do w_p . Jak widać na wykresach, dwukrotne zwiększenie zawartości mgły (od 0,5 do 1 g/kg suchego powietrza) prowadzi do dwukrotnego wydłużenia tego odcinka (z 320 do 640 m).

Tam, gdzie w powietrzu istnieje mgła, zmiana współczynnika ϵ_m nie ma wpływu na przebieg pokazanych na wykresach krzywych, po zaniku mgły jego wpływ jest wyraźny – zwiększenie ϵ_m skutkuje obniżeniem temperatury i wzrostem wilgotności powietrza.

Zawartość mgły w powietrzu (w) maleje liniowo ze współrzędną s – proste spadku tej wielkości, wykreślone dla różnych w_p , są na wykresie $w(s)$ do siebie równoległe.

Na krzywych $\varphi(s)$, w zakresie współrzędnej s , w którym mgła już nie występuje, daje się zauważyć istnienie minimum (dla rozważanych przykładowych obliczeń w jednym przypadku).

LITERATURA

- [1] *Brajczewa N. A., Czerniak W. P., Szczerbań A. N.*: Metody rasczeta tiempieratury wentilacjonnoego wozducha podziemnych soorużenij. Kijew, Naukowa Dumka 1981
- [2] *Frycz A.*: Klimatyzacja kopalń. Katowice, Wydawnictwo „Śląsk” 1981
- [3] *Filek K., Nowak B.*: Temperatura i wilgotność chłodzonego powietrza w podziemnych wyrobiskach przewietrzanych wentylacją opływową. Kraków, Wydawnictwa AGH, seria Rozprawy, monografie 1996