

Marian Branny, Wiktor Filipek*, Michał Karch**

PROGNOZOWANIE TEMPERATURY POWIETRZA W PRZODKACH WYROBISK ŚLEPYCH PRZEWIETRZANYCH WENTYLACJĄ LUTNIOWĄ – 3D SYMULACJA KOMPUTEROWA**

1. Wprowadzenie

W polskich kopalniach węgla kamiennego do przewietrzania wyrobisk ślepych stosuje się ssący, tłoczący i kombinowany system wentylacji. Z prowadzonych w latach 2001–2002 badań ankietowych [12], obejmujących około 80% wszystkich czynnych wyrobisk wynika, że 43% przewietrzane było wentylacją ssącą, 41% kombinowaną i 16% systemem tłoczącym. We wszystkich tych systemach przepływ powietrza w strefie przodkowej ma charakter trójwymiarowy. Z uwagi na tworzone pole prędkości, długość takiej strefy zależy od stosowanego rodzaju wentylacji lutniowej i wyposażenia w dodatkowe urządzenia wentylacyjne, takie jak pomocniczy lutniociąg z chłodnicą powietrza lub odpylaczem. W programach komputerowych przeznaczonych do wyznaczania parametrów wentylacyjnych w wyrobiskach z wentylacją odrębną, opartych na jednowymiarowym modelu przepływu, przyrost temperatury powietrza w strefie przodka wyznacza się z ogólnych bilansów ciepła. Celem rozważań jest przedstawienie możliwości i problemów związanych z wyznaczaniem na drodze teoretycznej rozkładów prędkości przepływu oraz temperatury powietrza w strefie przodkowej wyrobiska z wentylacją lutniową. Rozwiązanie oparto na równaniach i programach symulacyjnych stosowanych w numerycznej mechanice płynów (CFD). Metody CFD polegają na numerycznym rozwiązywaniu pełnego układu równań mechaniki płynów – równania ciągłości, Naviera–Stokesa i energii – zarówno dla laminarnego, jak i turbulentnego charakteru przepływu. Do opisu przepływów turbulentnych najczęściej stosuje się modele oparte na hipotezie uśredniania Reynoldsa. Domknięcie układu równań uzyskuje się przez wprowadzenie modeli turbulencji bazujących na koncepcji lepkości turbulentnej. Opracowano wiele modeli turbulencji, przy

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Pracę wykonano w ramach prac statutowych nr 11.11.100.281

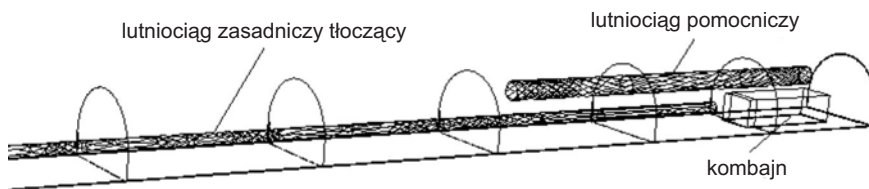
czym żaden z nich nie ma uniwersalnego charakteru. W pracy stosowano dwurównaniowy model turbulencji k-ε (kinetyczna energia turbulencji – szybkość dyssypacji kinetycznej energii turbulencji). Jest to najczęściej wykorzystywany model w różnych aplikacjach przemysłowych i stosowany przy rozwiązywaniu lokalnych zadań wentylacji [10, 6, 5, 13, 7, 1].

W warunkach zagrożenia metanowego, temperaturowego i pyłowego do przewietrzania wyrobisk drażonych kombajnami często wykorzystywany jest system wentylacji kombinowanej składający się z zasadniczego lutniociągu tłoczącego i pomocniczego lutniociągu ssącego instalacji odpylającej. W ostatnich latach odnotowuje się wzrost wykorzystania tego systemu wentylacji szczególnie w przypadku wyrobisk wykonywanych na dużych głębokościach i o znacznych długościach [8, 12]. W polach metanowych zasadniczy lutniociąg tłoczący musi być zakończony lutnią wirową i zasobnikiem lutniowym. Odpowiednio kierowany strumień powietrza wypływający z lutni wirowej ma przeciwdziałać możliwości przystropowego nagromadzenia się metanu i utrzymać obłok pyłu powstający w czasie pracy kombajnu w czole przodka. Krótki lutniociąg ssący wyposażony jest zazwyczaj w ssawę usytuowaną nad kombajnem. Z uwagi na widmo zasysania wlot do instalacji odpylania powinien znajdować się jak najbliżej czoła przodka – w odległości do 3 m od organu urabiającego. Strumień powietrza doprowadzany do przodka oprócz zapewnienia minimalnych średnich prędkości określonych przepisami powinien również być większy co najmniej o 20% w stosunku do wydajności odpylacza.

Obliczenia wykonano z wykorzystaniem programu FLUENT 6.1.

2. Obszar przepływu

Obszar przepływu, przedstawiony na rysunku 1, tworzy część wyrobiska ślepego o długości 56 m i polu przekroju $15,8 \text{ m}^2$. Zasadniczy lutniociąg tłoczący o średnicy 800 mm zakończony jest lutnią wirową o długości szczeliny 10 m. Odległość końca lutniociągu od czoła przodka wynosi 8 m. Krótki lutniociąg ssący z odpylaczem przedstawiono w postaci walca (lutni) o średnicy 1000 mm. Wlot do instalacji odpylającej znajduje się nad kombajnem w odległości 3 m od czoła przodka. Długość strefy zazębiana wynosi 5 m. Kształt kombajnu odwzorowano prostopadłością o wymiarach $2 \times 1,5 \times 6,0 \text{ m}$.



Rys. 1. Obszar przepływu

Do przodka lutniociągiem tłoczącym (rys. 1) dopływa $400 \text{ m}^3/\text{min}$ powietrza. Szczelina w lutni wirowej ma długość 10 m i szerokość 60 mm. Przez urządzenie odpylające przepływa $245 \text{ m}^3/\text{min}$ powietrza, tak więc udział strumienia powietrza w strefie zazębiana-

nia wynosi 0,39. Przez to ostatnie rozumie się iloraz strumienia objętości powietrza w strefie ząbienia lutniociągów i strumienia objętości powietrza doprowadzonego do przodka. W przodku pracuje kombajn o mocy 160 KW. Temperatura pierwotna górotworu wynosi 40°C.

3. Model matematyczny

Zakłada się, że powietrze jest gazem doskonałym i ściśliwym, a ruch mieszaniny jest ustalony. Rozważany problem opisany jest układem równań ciągłości, Naviera-Stokesa, energii i równaniami modelu turbulencji k-ε.

Warunki brzegowe

- W otworze wlotowym (szczelina lutni wirowej) przyjmowano stały w czasie strumień masy powietrza dopływający do obszaru, przy czym w szczelinie lutni wirowej uwzględniono zmienną wzdłuż szczeliny ilość dopływającego powietrza świeżego, wynikającą z publikowanych charakterystyk tego urządzenia [4]. Kinetyczną energię turbulencji i szybkość dyssypacji tej energii wyliczano przy założeniu 10% intensywności turbulencji na wlocie. Temperatura powietrza na wlocie miała stałą wartość.
- W przekroju wylotowym z wyrobiska przyjmowano stałą wartość ciśnienia oraz zerowe wartości gradientów pozostałych wielkości w kierunku przepływu.
- Przy opisie warunków przyściennych korzystano ze zmodyfikowanego modelu funkcji ściany. Eksperymenty przeprowadzone w przewodach i kanałach z chropowatymi ścianami wskazują, że w pobliżu ścian sztywnych rozkład uśrednionej w czasie prędkości wykreślony w układzie współrzędnych u/u_τ , $y_p u_\tau / \nu$ (u – składowa prędkości równoległa do ściany, u_τ – prędkość dynamiczna, ν – współczynnik lepkości kinematycznej, y_p – odległość węzła przyściennego od ściany) w skali półlogarytmicznej ma stały kąt nachylenia wynoszący $1/\kappa$ (κ – stała Karmana), natomiast różni się punktem przecięcia z osią współrzędnych. Zmodyfikowana funkcja ściany – o składnik B – ma postać

$$\frac{uu^*}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(E \frac{u^* y_p}{\nu} \right) - \Delta B \quad (1)$$

$$\Delta B = \frac{1}{\kappa} \ln(1 + C_s K_s)$$

gdzie:

$$u^* = C_\mu^{1/4} k^{1/2}$$

C_μ — stała modelu turbulencji,

k — kinetyczna energia turbulencji,

E — stała modelu funkcji ściany,

C_s i K_s — parametry modelu funkcji ściany.

Fizyczny wymiar wysokości nierówności ścian reprezentuje parametr K_s natomiast C_s jest stałą przyjmującą wartości od 0 do 1, która zależy od charakteru chropowatości.

Niestety brak tutaj pewnych przesłanek, na bazie których można dobrać wartość C_s . Formulowane są jedynie zalecenia [3], że w przypadku niejednorodnej chropowatości, C_s przyjmuje wartości z przedziału (0,5, 1). Nie są to jedyne wątpliwości dotyczące modelowania przepływu w pobliżu ścian sztywnych. Podstawowe zależności ustalono eksperymentalnie, badając tzw. chropowatość piaskową, która jest znacznie mniejsza od nierówności ścian wyrobisk górniczych. Według badań Hargreavesa [2001] w przypadku wyrobisk chodnikowych dobre wyniki uzyskano dla wysokości nierówności wynoszącej 0,05 m. Oznacza to, że odległość pierwszego rzędu węzłów od ściany sztywnej (przy stosowaniu funkcji ściany) nie powinna być mniejsza od tego wymiaru, ponieważ niefizyczne jest przyjęcie większego wymiaru chropowatości od wymiaru komórki elementarnej przylegającej do ściany. Z drugiej strony, rozmiar tych komórek powinien być taki, by spełniony był zakres ważności obowiązywania funkcji ściany, określanej przez bezwymiarową odległość $y^+ = \frac{y_p u_\tau}{\nu} \in (40, 500)$. Po-

nadto w warstwie przyściennej powinny znajdować się co najmniej cztery rzędy węzłów. W zakresie występujących w rozważanym zadaniu prędkości, górna granica przedziału, przy odległości węzłów 0,05 m w części obszaru przepływu jest znacznie przekroczona. Stąd przy generowaniu siatki numerycznej (program GAMBIT) przyjęto, że pierwszy rząd węzłów przylegający do ściany sztywnej znajduje się w odległości 0,025 m, wymiar chropowatości wynosi 0,02 m zaś stała $C_s = 1$. Spełnienie warunku dla bezwymiarowej odległości y^+ było kontrolowane w trakcie obliczeń i w razie potrzeby siatka numeryczna była zagęszczana.

Temperaturę ścian wyrobiska oblicza się, korzystając z pewnego zagadnienia pomocniczego. Jej wartość uzyskuje się z rozwiązania równania przewodnictwa cieplnego dla ośrodka skalnego z warunkiem brzegowym opisującym proces wymiany ciepła między skałami a przepływającym powietrzem oraz stałym warunkiem początkowym. Rozwiązanie wspomnianego zagadnienia opisywane jest między innymi w [14]. Wpływ parującej wody na warunki klimatyczne uwzględniono, przyjmując następujące założenia:

- parowanie odbywa się kosztem entalpii powietrza,
- proces przejmowania wilgoci od skał opisuje wzór Lewisa,
- w pobliżu ścian wyrobiska tworzy się cienka warstwa, w której powietrze znajduje się w stanie nasycenia o temperaturze równej temperaturze ściany,
- różnica pomiędzy prężnością pary wodnej w powietrzu w warstwie granicznej i prężnością pary wodnej w powietrzu w wyrobisku jest wielkością stałą.

Wyliczony przy powyższych założeniach strumień ciepła odbierany od powietrza przez parującą wilgoć uwzględniany jest w równaniu energii w postaci objętościowego źródła ciepła (ujemnego) w warstwie graniczącej ze ścianami sztywnymi.

4. Zagadnienie pomocnicze do wyznaczenia temperatury ścian wyrobiska

W metodach prognozy warunków klimatycznych temperaturę powietrza kopalnianego najczęściej oblicza się, korzystając z rozwiązania zagadnienia pomocniczego. Temperaturę

skół wokół wyrobiska wyznacza się z rozwiązania równania przewodnictwa cieplnego dla ośrodka skalnego z warunkiem brzegowym opisującym proces wymiany ciepła między skałami a przepływającym powietrzem oraz stałym warunkiem początkowym. Rozwiązanie zagadnienia brzegowo-początkowego cytowane między innymi w [14] ma postać

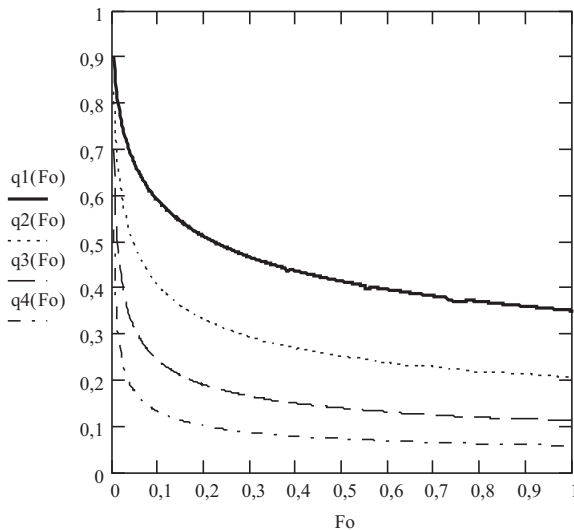
$$v(r, t) = T_s + (\vartheta_0 - T_s) \times q(Fo, Bi, R) \quad (2)$$

$$q(Fo, Bi, R) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{Y_0(Ru) \left[J_0(u) + \frac{u}{Bi} J_1(u) \right] - J_0(Ru) \left[Y_0(u) + \frac{u}{Bi} Y_1(u) \right]}{\left[J_0(u) + \frac{u}{Bi} J_1(u) \right]^2 + \left[Y_0(u) + \frac{u}{Bi} Y_1(u) \right]^2} e^{-u^2 Fo} \frac{du}{u} \quad (3)$$

gdzie:

- T_s — temperatura średnia powietrza, °C
- ϑ_0 — temperatura pierwotna górotworu, °C
- Bi — liczba Biota,
- Fo — liczba Fouriera,
- R — bezwymiarowy promień wodzący współrzędnych cylindrycznych,
- $J_0(u), J_1(u), Y_0(u), Y_1(u)$ — funkcje Bessela

Rozwiązanie całki (3) uzyskane przy pomocy programu Mathcad 2001 dla $R = 1$ (powierzchnia ociosów wyrobiska) w zakresie liczb Fouriera od 0,005 do 1 oraz wybranych liczb Biota przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Wykres bezwymiarowej temperatury $q(Fo, Bi, R) = \frac{\vartheta - T_s}{\vartheta_0 - T_s}$ dla $R = 1$ oraz liczb Biota dla $q1(Fo) - Bi = 2$; $q2(Fo) - Bi = 4$; $q3(Fo) - Bi = 8$; $q4(Fo) - Bi = 16$

Z zależności (2) i (3) przy znanych wartościach liczb Fouriera i Biota oraz wielkościach temperatury pierwotnej górotworu i temperatury powietrza można obliczyć temperaturę ścian wyrobiska. Ponieważ wielkość temperatury powietrza *a priori* nie jest znana, wynika stąd potrzeba kilkakrotnego przeliczania rozwiązywanego zadania.

5. Wpływ parowania wilgoci na temperaturę powietrza

Gęstość strumienia masy wilgoci odparowującej z mokrej powierzchni skał na obwodzie wyrobiska można obliczyć ze wzoru

$$m_w = \beta(x_n - x) \quad (4)$$

gdzie:

- β — współczynnik przejmowania wilgoci, $\text{kg/m}^2\text{s}$,
- x_n — wilgotność właściwa w stanie nasycenia powietrza w temperaturze skał, kg/kg ,
- x — wilgotność właściwa powietrza, kg/kg .

Współczynnik β dla ruchu turbulentnego i przemiany adiabatycznej można obliczyć ze wzoru Lewisa. Ponieważ niekoniecznie cała powierzchnia skał na obwodzie wyrobiska jest wilgotna do (4) wprowadza się współczynnik udziału powierzchni wilgotnej f . Gęstość strumienia ciepła odbieranego od powietrza przez parującą wilgoć wyraża się wzorem

$$q_w = r_w f \beta (x_n - x) \quad (5)$$

gdzie: r_w — ciepło parowania wody, J/kg .

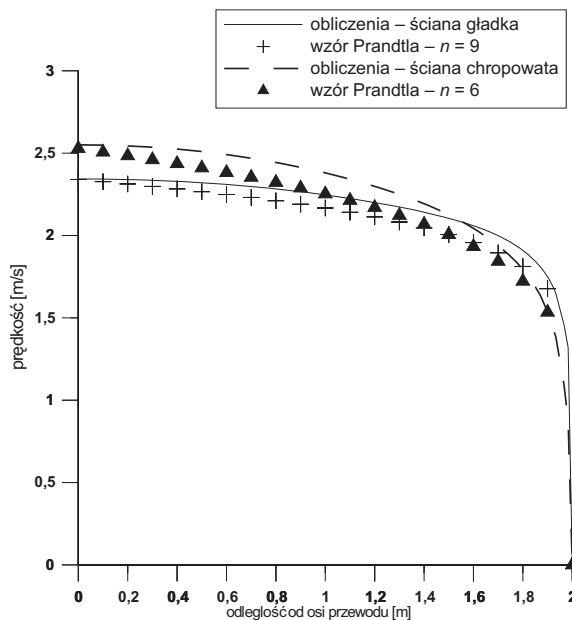
Zakłada się, że w strefie przodka wyrobiska ślepego różnica $x_n - x$ jest wielkością stałą, a w związku z tym prawa strona zależności (5) jest stała. Przyjęto, że efekty energetyczne związane z odparowaniem wilgoci można uwzględnić przez wprowadzenie do równania energii dla powietrza objętościowych źródeł ciepła (ujemnych) w cienkiej warstwie przylegającej do ściany sztywnej. Ich wartość – stałą w całej warstwie – oblicza się z zależności (5) oraz pola powierzchni odsłoniętych skał i objętości warstwy granicznej. Tę ostatnią wielkość wyliczano, przyjmując grubość warstwy równą 0,05 m.

6. Porównanie wyników symulacji 3D z wynikami modelu jednowymiarowego

W modelu jednowymiarowym przyjmuje się, że równania sformułowane dla wielkości uśrednionych po przekroju wyrobiska opisują zjawiska przepływowe z wystarczającą dokładnością. Warunek ten jest spełniony w wyrobiskach długich, o stałym przekroju, w których rozkład prędkości – poza odcinkiem początkowym – jest ustabilizowany. Obliczenia wykonano dla poziomego przewodu o średnicy 4 m i długości 100 m, przez który płynie powietrze o wydatku masowym 30,77 kg/s (prędkość średnia na wlocie 2 m/s). Temperatura pierwotna skał wynosi 40°C, współczynnik przewodnictwa cieplnego skał

2,2 W/mK, współczynnik wyrównywania temperatury $0,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Współczynnik przejmowania ciepła, dla ścian gładkich wynosi $\alpha = 3,336 \cdot 2^{0,8}/4^{0,2} = 4,4 \text{ W/m}^2\text{K}$, zaś liczba Biotta 4. Liczba Fouriera, dla czasu przewietrzania wynoszącego 30 dni wynosi 0,5832. Przy odległości najbliższego rzędu węzłów od ściany wynoszącej 0,01 m, wartości $y^+ < 80$. Na rysunku 3 przedstawiono rozkłady prędkości w funkcji promienia w przewodzie uzyskane z 3D obliczeń symulacyjnych i ze wzoru potęgowego Prandtla – dla wykładnika potęgi $\frac{1}{n(Re)} = \frac{1}{9}$ ($Re = 516129$). Przy tej liczbie Re , wynikający z doświadczeń

stosunek prędkości średniej do maksymalnej jest równy 0,853. Prędkość maksymalna (w osi przewodu) obliczona numerycznie wynosi 2,34 m/s i jest to wartość dobrze korespondująca z wynikami eksperymentów. Jak widać z rysunku 3 wyniki uzyskane przy użyciu modelu k-ε nieco przeszacowują wartości prędkości obliczone wzorem Prandtla. Krzywą przerywaną zaznaczono profil prędkości przy przepływie przez przewód szorstki. Przyjęto, że nierówności ścian mają wysokość 0,009 m, zaś odległość od ściany najbliższego rzędu węzłów wynosi 0,01 m. Maksymalna wartość bezwymiarowej długości y^+ jest równa 92. W przypadku przewodów szorstkich rozkład prędkości można wyrazić wzorem potęgowym przy $n \in (4,6)$ [9]. Rozkład prędkości dla $n = 6$ przedstawiono na rysunku 3. Wartość współczynnika n obliczono, przyjmując za [2], że stosunek prędkości maksymalnej do średniej w przewodach chropowatych wynosi 1,264, a stąd prędkość maksymalna jest równa 2,528 m/s i jest to wartość bliska tej uzyskanej drogą obliczeń symulacyjnych – 2,551 m/s. Należy nadmienić, że wzór potęgowy Prandtla traci ważność w bliskiej odległości od ścianki.



Rys. 3. Profil prędkości w funkcji promienia

Obliczona przy użyciu programu Mathcad wartość całki (3) wynosi 0,233, zaś temperatura ścian przewodu (2) jest równa 28,78°C. Uśredniona po przekroju temperatura powietrza na wylocie z przewodu wynosi 25,63°C, natomiast odpowiadająca jej wartość uzyskana z modelu jednowymiarowego [14] jest równa 25,56°C. Temperatura średnia powietrza na końcu 100-metrowego odcinka przewodu szorstkiego, wyliczona przy użyciu modelu 3D wynosi 25,85°C. Współczynnik przejmowania ciepła w przewodach chropowatych jest większy aniżeli w gładkich, stąd wyższa wartość temperatury w tym przypadku. Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych można jedynie oszacować wartość współczynnika poprawkowego, przez który mnoży się współczynnik przejmowania ciepła i z tego powodu nie przytacza się tutaj odpowiedniej wartości obliczonej przy pomocy modelu jednowymiarowego.

Powyższe rozważania z jednej strony potwierdzają przydatność modelu jednowymiarowego, z drugiej zaś stanowią częściową walidację modelu 3D. Testowany sposób zadawania warunków brzegowych stosowany będzie przy symulacji przepływu w przodkach wyrobisk ślepych. Nieuprawnione jest jednak stosowanie interpretacji rozszerzającej, polegającej na wykorzystaniu wyników powyższego porównania do uwiarygodnienia rozwiązań numerycznych dla strefy przodkowej wyrobiska ślepego, z uwagi na istotne różnice między tymi przepływami.

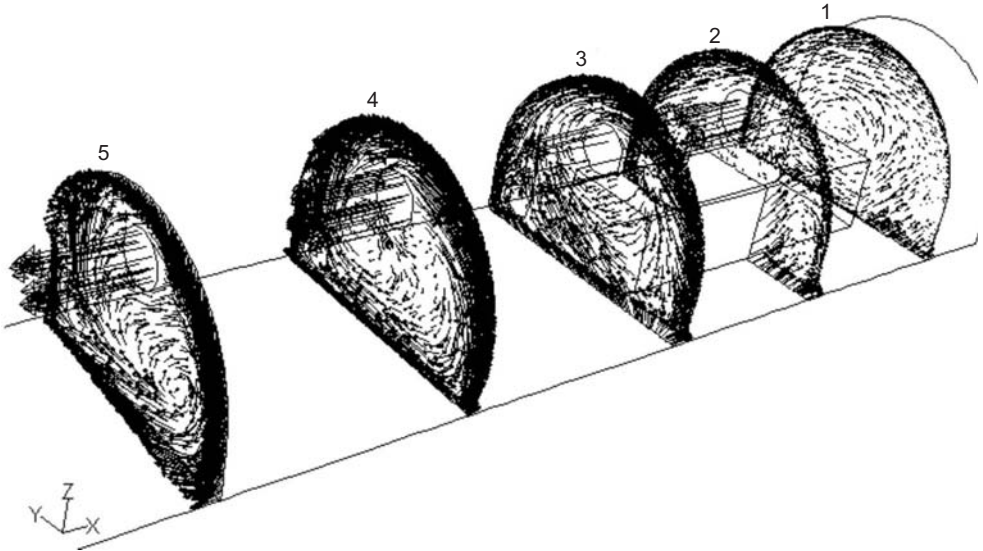
7. Rozkłady prędkości przepływu i temperatury powietrza w strefie przodkowej wyrobiska ślepego

Rezultaty obliczeń przedstawiono w postaci obrazów pól prędkości i temperatury powietrza w wybranych przekrojach. Cechą charakterystyczną wyznaczonego pola prędkości są stosunkowo duże prędkości przepływu w pobliżu ścian sztywnych – stropu, spągu i ociosów. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono obraz pola prędkości w wybranych przekrojach poprzecznych wyrobiska. Wytwarzany wir powietrzny przemieszcza się zarówno w kierunku czoła przodka, jak i wylotu z wyrobiska, a o jego ilościowym podziale decyduje wydajność odpylacza. Ze strugą powietrza wypływającą z instalacji odpylającej związana jest strefa o długości około 15 m, charakteryzująca się przepływem recyrkulacyjnym.

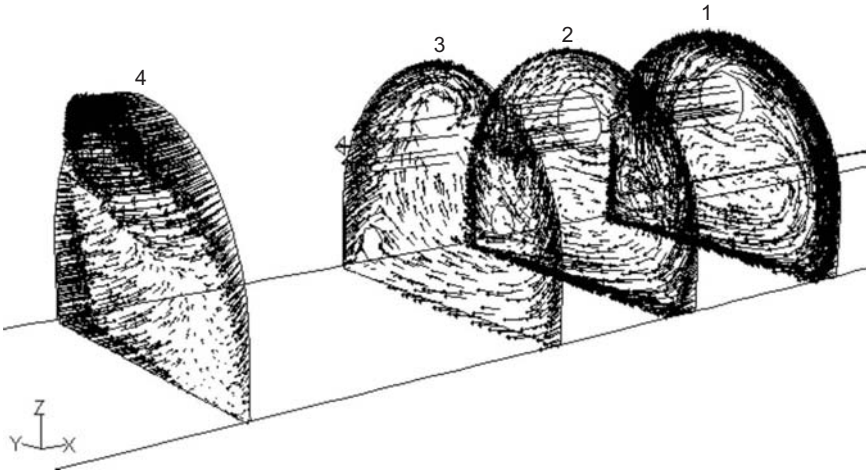
Pole temperatury powietrza przedstawiono na rysunku 6. Przyjęto tutaj, że temperatura pierwotna górotworu wynosi 40°C, średni czas przewietrzania 2 dni, współczynnik przewodnictwa cieplnego skał $\lambda = 2,2$ W/mK, współczynnik przewodnictwa temperaturowego skał $a = 0,9 \cdot 10^{-6}$ m²/s, współczynnik przewodnictwa cieplnego powietrza $\lambda_p = 2,07 \cdot 10^{-2}$ W/mK, współczynnik lepkości kinematycznej powietrza $\nu = 1,6 \cdot 10^{-6}$ m²/s, promień hydrauliczny wyrobiska $r_o = 2,05$ m. Współczynnik przejmowania ciepła jest równy:

$$\alpha = 0,023 \frac{\lambda_p}{d} \left(\frac{vd}{\nu} \right)^{0,8} Pr^{0,4} = 0,023 \frac{2,07 \cdot 10^{-2}}{4,12} \left(\frac{2 \cdot 4,1}{1,6 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} 0,701^{0,4} =$$

$$= 3,723 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{°C})$$



Rys. 4. Pole prędkości w przekrojach poprzecznych wyrobiska w odległości od czoła przodka: przekrój 1 – 1 m, przekrój 2 – 4 m, przekroje 3, 4 i 5 odpowiednio 8 m, 13 m i 18 m (wzdłuż szczeliny wirowej)



Rys. 5. Pole prędkości w przekrojach poprzecznych wyrobiska. Przekroje 1, 2 i 3 w strefie zazębiana, przekrój 4 w odległości 10 m od wylotu z instalacji odpylającej

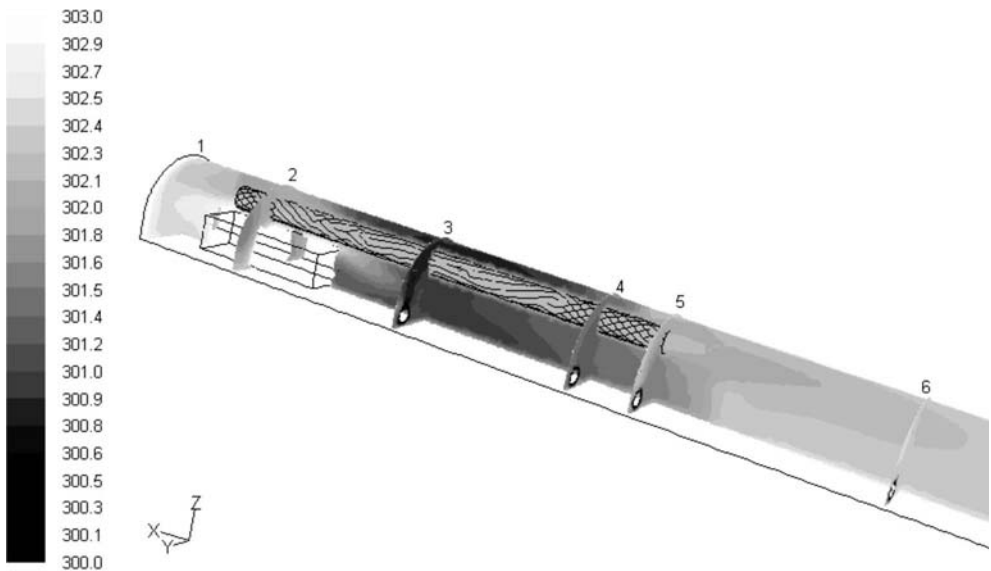
Liczby Fouriera i Biota wynoszą:

$$Fo = \frac{0,9 \cdot 10^{-6} \cdot 172800}{2,05^2} = 0,037, \quad Bi = \frac{3,723 \cdot 2,05}{2,2} = 3,452$$

Przy powyższych wartościach Fo i Bi oraz dla $R = 1$ (powierzchnia ścian wyrobiska) wyrażenie (3) ma wartość 0,779, zaś temperatura ścian wyznaczona z rozwiązania zagadnienia pomocniczego, przy przyjęciu temperatury powietrza równej $28,5^{\circ}\text{C}$ wynosi $37,46^{\circ}\text{C}$. Ciepło wytwarzane przez pracujący kombajn (160 KW) przekazywane jest do powietrza przez powierzchnię prostopadłościanu (kombajnu), a gęstość strumienia ciepła wynosi 130 W/m^2 . Przyjęto, że 3% mocy zainstalowanej przekazywane jest do powietrza w sposób jawny. Współczynnik przejmowania wilgoci jest równy $1,315 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2\text{s}$. Gęstość strumienia masy wilgoci odparowującej z powierzchni skał wynosi

$$m_w = 0,25 \cdot 1,315 \cdot 10^{-3} (0,039 - 0,016) = 7,56 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^2\text{s}$$

Wartość tę obliczono przy założonej 75-procentowej wilgotności względnej powietrza w wyrobisku oraz przy 25-procentowym udziale mokrej powierzchni skał do całej powierzchni ścian wyrobiska. Gęstość strumienia ciepła odbierana od powietrza przez parującą wilgoć wynosi $18,9 \text{ W/m}^2$ zaś odzwierciedlające ten efekt objętościowe źródło ciepła – 385 W/m^3 .



Rys. 6. Pole temperatury powietrza w płaszczyźnie przechodzącej przez środek wyrobiska oraz w przekrojach położonych w odległościach od czoła przodka wynoszących: 1 – 1 m, 2 – 5 m, 3 – 13 m (środek lutni wirowej), 4 – 20,5 m (środek strefy zazębienia), 5 – 23 m (wylot z lutni pomocniczej), 6 – 33 m (10 m od wylotu z lutni pomocniczej)

Temperatura powietrza na wylocie z lutni wirowej wynosiła 27°C . W pobliżu przodka średnia w przekroju 1 temperatura powietrza wynosi $29,5^{\circ}\text{C}$, na wlocie do ssawy $29,2^{\circ}\text{C}$, zaś w odległości 10 m od wylotu z urządzenia odpylającego (przekrój 6) $29,4^{\circ}\text{C}$. W celu porównania: jeżeli temperatura powietrza świeżego wynosi 25°C , wówczas średnia tempe-

ratura powietrza na wlocie do ssawy wynosi 27,8°C, natomiast, gdy obliczenia wykonuje się dla „suchego” górotworu (bez uwzględniania efektu związanego z parującą wodą), to temperatura w tym przekroju osiąga 30,3°C – przy temperaturze na wlocie wynoszącej 27°C. W programach komputerowych przeznaczonych do wyznaczania parametrów wentylacyjnych w wyrobiskach z wentylacją odrębną opartych na jednowymiarowym modelu przepływu, przyrost temperatury powietrza w strefie przodka wyznacza się z ogólnych bilansów ciepła. Traktując przekrój 6 jako granicę strefy przodkowej (33 m od czoła przodka), obliczony przyrost temperatury powietrza w tym obszarze w trzech przedstawionych wariantach wynosił od 2,4°C do 4,1°C.

8. Podsumowanie

Modele CFD są obecnie wykorzystywane do rozwiązywania lokalnych zadań wentylacji kopalń, szczególnie wtedy, gdy przepływ ma charakter 2D lub 3D. Rozległość zadania numerycznego, nawet w przypadku prostej sieci wentylacyjnej, stwarza wysokie wymagania dotyczące sprzętu i czasu potrzebnego do wykonania obliczeń oraz stanowi ograniczenie przy stosowaniu tej techniki obliczeń.

Zwykle dużą trudność sprawia udokumentowanie wiarygodności odwzorowania numerycznego, z uwagi na brak odpowiednich danych pomiarowych. Wynika to zarówno z trudności technicznych, jak i kosztów wykonywania pomiarów zarówno w warunkach ruchowych, jak i laboratoryjnych. W porównaniu z modelami jednowymiarowymi wymagania dotyczące danych pomiarowych są zdecydowanie wyższe, potrzebne są 3D rozkłady wielkości fizycznych charakteryzujących przepływ.

Szczególną uwagę należy poświęcić modelowaniu przepływu w pobliżu ścian i kontroli zakresów ważności modelu w trakcie obliczeń. Na ogół jest to związane z koniecznością zagęszczenia siatki numerycznej w pobliżu ścian sztywnych.

W celu zminimalizowania błędów numerycznych aproksymację przestrzenną oparto na schemacie „pod prąd” z błędem drugiego rzędu. Obliczenia wykonano przy rzadkiej siatce numerycznej o wymiarze około 550 000 węzłów, którą następnie zagęszczono do około 930 000 węzłów.

Informacja o trójwymiarowych polach prędkości przepływu i temperatury powietrza uzyskana drogą symulacji komputerowej ułatwia poznanie cech charakterystycznych przepływu oraz może być pomocna przy analizie stanu wentylacji. Uzyskane wyniki są jakościowo zgodne z informacjami literaturowymi oraz obserwacjami z praktyki, zaś ich ocena ilościowa będzie możliwa po pełnej walidacji modelu.

LITERATURA

- [1] *Branny M.*: Symulacja numeryczna przewietrzania wyrobisk ślepych systemem wentylacji kombinowanej w warunkach zagrożenia metanowego i pyłowego, *Archiwum Górnictwa* 2008, vol. 53, issue 2
- [2] *Bukowski J.*: *Mechanika płynów*, PWN, Warszawa 1959
- [3] FLUENT Inc. 2005. FLUENT 6.1 Documentation
- [4] *Frydel W., Krzykowski R.*: Lutnia wirowa WIR 630 w systemie wentylacji kombinowanej, *Miesięcznik WUG* 2003, nr 9
- [5] *Hargreaves D.M., Lowndes I.S.*: An Assessment of the Future Use of Computational Fluid Dynamics for Network Modeling. *Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress, Kraków 2001*

- [6] *Konduri I.M., McPherson M.J., Topuz E.*: Experimental and Numerical Modelling of Jet Fans for Auxiliary Ventilation in Mines. Proceedings of the 6th International Mine Ventilation Congress, Pittsburg 1997
- [7] *Krawczyk J.*: Jedno i wielowymiarowe modele niestacjonarnych przepływów powietrza i gazów w wyrobiskach kopalnianych. Przykłady zastosowań, Archiwum Górnictwa, seria Monografie, 2007, nr 2
- [8] *Krzykowski R.*: Ocena skuteczności odpylania powietrza w wyrobiskach drążonych kombajnami w warunkach zagrożenia metanowego, praca doktorska, AGH, Kraków 2005
- [9] *Orzechowski Z., Prywer J., Zarzycki R.*: Mechanika płynów w inżynierii środowiska, Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997
- [10] *Ren T.X., Edwards J.S., Jozefowicz R.R.*: CFD Modelling of Methan Flow Around Longwall Faces. Proceedings of the 6th International Mine Ventilation Congress, Pittsburg 1997
- [11] *Silvester S.A.*: The Integration of CFD and VR Methods to Assist Auxiliary Ventilation Practice, PhD Thesis, The University of Nottingham, Nottingham 2002
- [12] *Szlązak N., Szlązak J., Tor A.*: Systemy przewietrzania wyrobisk ślepych, Monografia, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2003
- [13] *Wala A.M., Stoltz J.R., Jacob J.D.*: Numerical and Experimental Study of a Mine Face Ventilation System for CFD Code Validation. Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress, Kraków 2001
- [14] *Wacławik J., Cygankiewicz J., Knechtel J.*: Warunki klimatyczne w kopalniach głębokich, Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Kraków 2005