

Marian Branny, Bernard Nowak*, Bogusław Ptaszyński*,
Zbigniew Kuczera*, Rafał Łuczak*, Piotr Życzkowski**

MODEL FAZY DYSKRETNEJ PRZEPLYWU POWIETRZA Z WYKROPLENIEM PARY WODNEJ**

1. Wstęp

W wielu zagadnieniach praktycznych różnych dziedzin techniki mamy do czynienia z przepływem powietrza, w którym występuje proces kondensacji zawartej w nim pary wodnej. Proces ten rozpoczyna się w momencie, gdy temperatura powietrza wilgotnego spada poniżej temperatury jego punktu rosy. Pojawienie się w przepływającym powietrzu fazy ciekłej w postaci kropeł wody w wielu wypadkach nie jest korzystne czy oczekiwane. Z punktu widzenia fizyki istnieje problem teoretyczny w opisie takiego przepływu, gdyż w przepływie dwu- lub wielofazowym prawa gazu doskonałego nie można stosować, a sama struktura takiego przepływu może być różna. Zależy to od wielu czynników, wśród których wymienić należy ukierunkowanie przepływu w różnie ukształtowanym przewodzie.

Celem pracy jest ocena wpływu, jaki na wydatek przepływu powietrza w szybie wydechowym ma zjawisko kondensacji pary wodnej zawartej w powietrzu. W numerycznej symulacji tego zjawiska zastosowano uproszczony sposób modelowania ustalonego, dwufazowego i trójwymiarowego przepływu, wykorzystując tzw. model Eulera-Lagrange'a. Model ten formalnie nie ujmuje zjawiska wykrapłania się pary wodnej w strumieniu powietrza po osiągnięciu (przekroczeniu) punktu rosy, natomiast danymi wejściowymi są tutaj między innymi strumień masy wykroplonej wody i miejsce wykroplenia. Dzięki temu można stosunkowo małymi nakładami ponoszonymi na badania numeryczne symulować przebieg zjawiska przepływu powietrza i kropeł wody w przewodzie.

2. Opis badanego zagadnienia fizycznego i jego model

Temperatura powietrza płynącego w szybie wydechowym, w którym zachodzi wymiana energii w wyniku przepływu ciepła od powietrza do otoczenia, obniża się na drodze jego przepływu. Przyjmuje się, że wymieniane z otoczeniem jest jedynie ciepło powstałe

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii

** Artykuł powstał w ramach pracy statutowej nr 11.11.100.193

w wyniku różnicy temperatur, nie ma natomiast wymiany masy między płynącym powietrzem a otoczeniem. Powietrze wilgotne zawiera w sobie parę wodną i jest mieszaniną jednofazową, do której stosuje się prawa gazu doskonałego. Jeśli jego temperatura się obniża, to mogą zachodzić dwa przypadki: pierwszy, ma miejsce wtedy, gdy temperatura powietrza jest większa od temperatury punktu rosy i wówczas zawartość pary wodnej w powietrzu nie ulega zmianie oraz drugi, występujący w przedziale temperatur mniejszych od wartości temperatury punktu rosy powietrza, wówczas na drodze przepływu powietrza występuje zjawisko kondensacji pary wodnej. Pojawienie się obok gazowej, drugiej fazy, w tym przypadku ciekłej, powoduje, że przepływ w tym obszarze staje się dwufazowy. Komplikuje to zasadniczo opis teoretyczny zjawiska. Dodatkowe trudności związane są również z faktem wystąpienia, w polu sił grawitacyjnych, rozdrobnionej fazy o gęstości o trzy rzędy większej od gęstości powietrza. Może to bowiem powodować przepływ faz w różnych kierunkach.

2.1. Uwarunkowania stosowania modelu fazy dyskretnej i zastosowane uproszczenie

Obecnie w obliczeniach numerycznych przepływów dwufazowych stosowane są dwie metody, znane pod nazwami Eulera–Lagrange’a i Eulera–Eulera [1], [2], [5].

W metodzie Eulera–Lagrange’a fazę ciągłą opisuje się za pomocą czasowo uśrednionych równań ciągłości, Naviera–Stokesa i domykających ten układ równań odpowiedniego modelu turbulencji, natomiast faza rozproszona rozwiązywana jest przez wyznaczenie torów, po których poruszają się poszczególne cząstki w polu prędkości uformowanym przez fazę ciągłą. Pomiędzy fazami może zachodzić wymiana masy, pędu i energii. Zasadnicze ograniczenie w stosowaniu tej metody dotyczy wielkości udziału objętościowego fazy rozproszonej. Wynika to z nieuwzględnienia w opisie dla fazy ciągłej objętości zajmowanej przez cząstki fazy rozproszonej. Przyjmuje się, że udział objętościowy fazy rozproszonej nie powinien przekraczać 10%, natomiast większy od przytoczonego udział masowy fazy rozproszonej nie stanowi ograniczenia w stosowaniu tego modelu [5].

W opisie modelem Eulera–Eulera dwie fazy traktowane są jako *continua* wzajemnie się przenikające, dla których buduje się układy równań wielkości zachowawczych, wraz z domykającymi je równaniami. Wśród modeli, które oparte są na tym podejściu wyróżnić można: model VOF, model mieszaniny, model Eulera. Modele te wymagają znacznych nakładów na badania numeryczne i nie będą w niniejszym artykule stosowane.

Przy wyborze do konkretnego zagadnienia odpowiedniego modelu matematycznego pomocne mogą być wielkości $\frac{L}{d_a}$ i liczba Stokesa (St), które poniżej zostaną omówione.

Jak wiadomo stopień wypełnienia obszaru przez fazę rozproszoną decyduje o oddziaływaniach międzyfazowych. Stopień wypełnienia rozumie się jako stosunek udziału masowego fazy rozproszonej oznaczonej indeksem d do udziału masowego fazy nośnej ciągłej, oznaczonej indeksem c . Wyraża to zależność:

$$\beta = \frac{\alpha_d \rho_d}{\alpha_c \rho_c} \quad (1)$$

gdzie: ρ to gęstość materii rozproszonej (d) lub ciągłej (c), a odpowiadające im wielkości są koncentracjami objętościowymi.

Wyróżnia się również wielkość określoną stosunkiem gęstości:

$$\gamma = \frac{\rho_d}{\rho_c} \quad (2)$$

Wartość powyższego stosunku gęstości γ może być dla konkretnego przepływu dwufazowego zróżnicowana. Gdyby rozważyć przepływ wody jako fazy rozproszonej w powietrzu tworzącym fazę ciągłą, to stosunek ten miałby wartość około 1000, natomiast gdyby fazą ciągłą była woda, a fazą rozproszoną powietrze, to wielkość ta miałaby wartość około 0,001. Używając tych wielkości, Crowe i inni [1] oszacowali średnią odległość pomiędzy cząstkami fazy rozproszonej. Wyrazili ją poprzez wielkość $\frac{L}{d_d}$ określoną poniższą zależnością:

$$\frac{L}{d_d} = \left(\frac{\pi}{6} + \frac{1+k}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

We wzorze tym wielkość k jest równa:

$$k = \frac{\beta}{\gamma} \quad (4)$$

Wartość wielkości $\frac{L}{d_d}$ umożliwia oszacowanie wielkości wypełnienia obszaru przepływu cząstkami fazy rozproszonej. Jeśli jest ona $\gg 1$, to można przyjąć, że cząstki fazy rozproszonej nie oddziałują ze sobą, a wielkość wypełnienia obszaru przepływu tą fazą jest bardzo mała.

W przypadku małego wypełnienia fazą rozproszoną oddziaływanie między fazą ciągłą i fazą rozproszoną odbywa się jednokierunkowo, tj. faza ciągła oddziałuje na rozproszone cząstki drugiej fazy przez tarcie i turbulencje, natomiast uznaje się, że faza rozproszona nie ma wpływu na fazę ciągłą. W takim przypadku stosowanie modeli: fazy rozproszonej, mieszaniny i Eulera daje dobre wyniki, z tym że ten ostatni model wiąże się z największymi kosztami poniesionymi na badania numeryczne.

W przypadku gdy wielkość $\frac{L}{d_d}$ przyjmuje wartość ≈ 1 , uznaje się, że wypełnienie fazą rozproszoną jest średnie i wtedy oddziaływania między fazami są dwukierunkowe. Faza ciągła oddziałuje na poszczególne cząstki fazy rozproszonej przez tarcie i turbulencje, ale jednocześnie rozproszone cząstki wpływają na fazę ciągłą przez zmniejszanie jej średniego pędu i turbulencji. Wprawdzie do takiego przypadku również stosować można trzy, wcześniej już wymienione, modele matematyczne przepływu dwufazowego, ale do tego, by wskazać, który z nich będzie najwłaściwszy, pomocna jest liczba Stokesa.

Jeśli natomiast wypełnienie fazą rozproszoną przepływu dwufazowego jest wysokie, wtedy w mechanizmach ich wzajemnego oddziaływania należy uwzględnić wpływ cząstek na ciśnienie oraz naprężenia lepkie występujące na rozproszonych cząstkach. W tym przypadku zaleca się stosować model Eulera, gdyż tylko on może dać poprawne wyniki obliczeń.

Liczba Stokesa, wykorzystywana przy średnich wypełnieniach, określona jest wzorem:

$$St = \frac{\tau_d}{t_s} \quad (5)$$

gdzie:

$$\tau_d = \frac{\rho_d d_d^2}{18\mu_c} \quad (6)$$

$$t_s = \frac{L_s}{v_s} \quad (7)$$

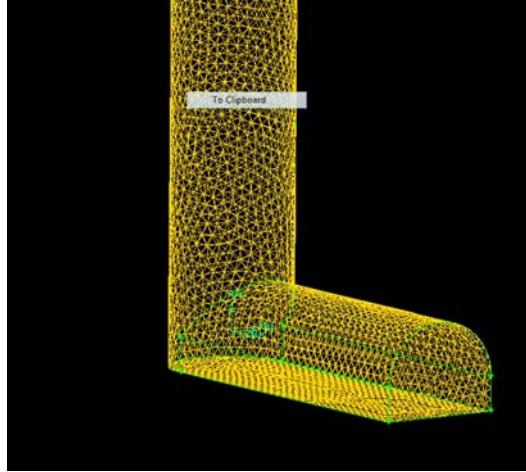
Należy zaznaczyć, że podobnie jak we wcześniejszych rozważaniach, indeks d oznacza fazę rozproszoną, zaś c fazę ciągłą. Wielkość d jest średnicą cząstek rozproszonych, μ_c jest lepkością fazy ciągłej, L_s jest długością charakterystyczną, która w przypadku badanego zagadnienia jest długością przewodu, wielkość v_s jest średnią prędkością fazy ciągłej w przewodzie.

Uznaje się, że jeśli $St \ll 1,0$, to cząstki rozproszone poruszają się zgodnie z fazą ciągłą i zjawisko opisywane jest każdym z modeli, a więc modelem fazy dyskretnej, modelem mieszaniny, modelem Eulera. Wybór może być podyktowany innymi czynnikami, np. kosztem wykonania badań numerycznych i wtedy model Eulera jest odrzucany jako najdroższy. Jeśli $St > 1,0$, to cząstki fazy rozproszonej poruszają się niezależnie od fazy ciągłej i wtedy odpowiednimi są modele: model fazy dyskretnej i model Eulera. Dla wartości liczby Stokesa $St \approx 1,0$, można stosować ponownie wszystkie trzy wymienione modele, a wyboru spośród nich dokonuje się według innego kryterium.

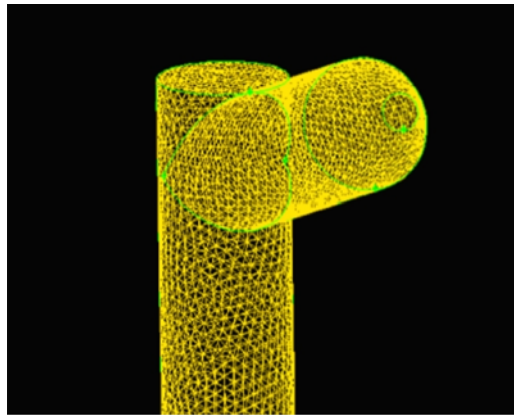
Wykorzystanie do analizowanego przepływu modelu Eulera–Lagrange’a wymaga sprawdzenia, czy powyższe kryteria są spełnione.

3. Obszar badanego przepływu

Badany układ składał się z pionowego szybu o średnicy 7 m i długości 500 m. Podszybie stanowi odcinek poziomego przekroju o długości 30 m i sklepieniu łukowym (rys. 1). Kanał wentylacyjny nachylony do poziomu pod kątem 15° i przekroju kołowym o długości 20 m połączony jest ze stożkowym zwężeniem, na którego końcu znajduje się wentylator (rys. 2). Na rysunkach przedstawiono również obraz niestrukturalnej sieci numerycznej używanej w obliczeniach.



Rys. 1. Element geometrii badanego obiektu – podszybie szybu wentylacyjnego



Rys. 2. Element geometrii badanego obiektu – kanał wentylacyjny szybu wentylacyjnego

Przyjęto, że przepływ powietrza w przewodzie wymuszony jest pracą wentylatora o zadanej charakterystyce spiętrzenia. Charakterystyka wentylatora została aproksymowana wielomianem:

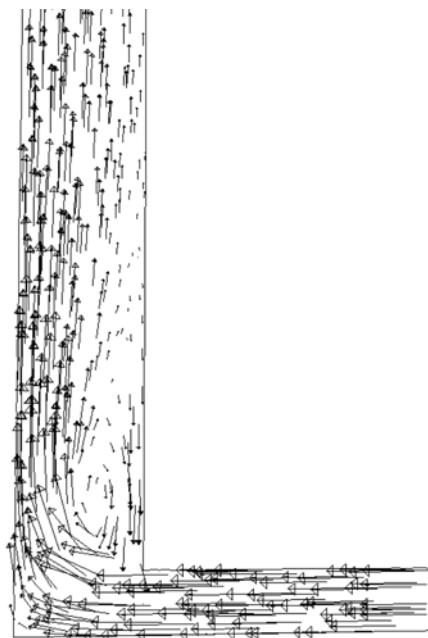
$$\Delta p = -0,0426 \cdot Q^2 + 20,671 \cdot Q + 2545 \text{ [Pa]}$$

gdzie: Q jest strumieniem objętości powietrza dopływającego do wentylatora [m^3/s].

Na wlocie do przewodu (na podszybiu) temperatura powietrza na termometrze suchym wynosi $t_s = 29,0^\circ\text{C}$, zaś na wilgotnym $t_w = 28,8^\circ\text{C}$. Wariantowo przyjmowano, że na długości 500 m temperatura powietrza obniży się do wartości $t_s = t_w = 25,0^\circ\text{C} \div 22,0^\circ\text{C}$.

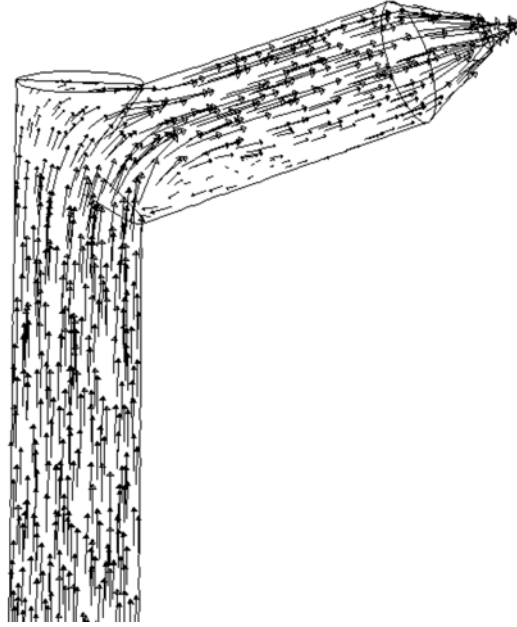
4. Wyniki obliczeń

Obliczenia numeryczne wykonano przy użyciu programu FLUENT. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono pole prędkości powietrza wyznaczone dla warunków przepływu jednofazowego, czyli bez uwzględnienia zjawiska kondensacji pary wodnej. Uwidoczniono tutaj charakterystyczne obszary przepływu związane z oderwaniem strugi powietrza na wlocie do szybu i kanału wentylacyjnego.



Rys. 3. Pole prędkości w rzucie na płaszczyznę przechodzącą przez osie szybu i wyrobiska podszybia

Obliczony wydatek objętościowy przepływu, bez uwzględnienia zjawiska kondensacji pary wodnej, wynosi $357,2 \text{ m}^3/\text{s}$ przy średniej po przekroju prędkości powietrza równej $9,29 \text{ m/s}$. Przy założonej temperaturze i wilgotności powietrza na wlocie do szybu oraz przyjętym spadku temperatury na drodze przepływu wynoszącym 4°C , 5°C i 7°C oraz wyznaczonym wydatku objętościowym powietrza strumień masy wykropionej wody wynosi odpowiednio $2,16 \text{ kg/s}$, $2,64 \text{ kg/s}$ i $3,50 \text{ kg/s}$. W celu uwzględnienia wpływu, jaki na wydatek przepływu powietrza w szybie wydechowym ma zjawisko kondensacji pary wodnej zawartej w powietrzu, przyjęto, że źródła masy wykropionej wody umiejscowione są w rozmieszczonych co 50 m płaszczyznach przekroju poprzecznego szybu. Założono, że krople wody mają kształt kulisty o średnicy 1 mm lub 2 mm [3], [4]. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 1 i na rysunku 5.

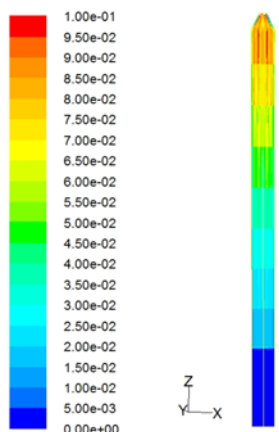


Rys. 4. Pole prędkości w rzucie na płaszczyznę przechodzącą przez osie szybu i wlot do kanału wentylacyjnego

TABELA 1

Parametry przepływu w zależności od strumienia masowego wykropłonej wody w szybie

Strumień masowy wykropłonej wody kg/s	Średnica kropli 1 mm		Średnica kropli 2 mm	
	Wydatek przepływu powietrza [m ³ /s]	Średnia prędkość przepływu powietrza [m/s]	Wydatek przepływu powietrza [m ³ /s]	Średnia prędkość przepływu powietrza [m/s]
2,16	353,3	9,19	348,3	9,05
2,64	352,5	9,16	346,4	9,00
3,50	350,8	9,12	341,8	8,88



Contours of DPM Concentration (kg/m3)

Jan 24, 2010
FLUENT 6.2 (3d, segregated, ske)

Rys. 5. Rozkład koncentracji kroplel wody w szybie w płaszczyźnie pionowej, przechodzącej przez oś szybu; średnica kroplel 1 mm, strumień masowy wykroplonej wody 2,16 kg/s (skala geometryczna w kierunku poprzecznym wynosi 4:1, przy zachowaniu skali wzdłuż osi szybu 1:1)

Z obliczeń wynika, że:

- kroplel wody o przyjętych średnicach transportowane są zgodnie z kierunkiem przepływu powietrza, o czym świadczy zerowa wartość ich koncentracji w dolnym odcinku pionowego przewodu;
- ze wzrostem strumienia masowego wykraplanej z powietrza wody zmniejsza się wydatek przepływu powietrza, przy czym jego wielkość zależy również od średnicy powstałych kroplel;
- dla przyjętych warunków przepływu – spotykanych w kopalniach – strumień objętości powietrza płynący szybem wydechowym zmniejsza się wskutek kondensacji pary wodnej o 1,1÷4,3%;
- maksymalna koncentracja kroplel wody pochodzących z kondensacji pary występuje na końcowym odcinku pionowego przewodu i wynosi około $1,5 \cdot 10^{-1} \text{ kg/m}^3$ (średnica kroplel 2 mm, strumień masowy kroplel wody 3,50 kg/s).

Otrzymaną wartość maksymalnej koncentracji należy sprawdzić ze względu na ograniczenia stosowania metody Eulera–Lagrange’a. Aby to sprawdzić, należy maksymalną wartość DPM Concentration podzielić przez gęstość właściwą wody wynoszącą około $\rho_w \approx 998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Odpowiada to zatem wartości koncentracji objętościowej fazy rozproszonej równej 0,015%. Jest to wielokrotnie mniejsze niż koncentracja objętościowa równa 10%, do której można stosować wykorzystany model matematyczny przepływu dwufazowego. Wyliczona dla badanego zagadnienia wartość $\frac{L}{d_d} \approx 18,82$ (dla średnic kroplel 2 mm i wy-

datku masowego 3,50 kg/s), natomiast wartość liczby Stokesa dla tego przypadku wynosi około $St \approx 0,24$. Wyznaczone wartości mieszczą się w zakresie przyjętych kryteriów upoważniających do stosowania modelu Eulera–Lagrange’a. W badanych przypadkach wykraplająca się woda z powietrza płynącego szybem spowodowała spadek objętościowego wydatku przepływu powietrza w granicach 1,1÷4,3% oraz odpowiednio wzrost oporu zastępczego przewodu o około 7÷12,6%. Oczywiście zjawisko kondensacji pary w powietrzu płynącym szybem wentylacyjnym wywołało również przesunięcie się w lewo po charakterystyce punktu pracy działającego wentylatora.

5. Podsumowanie

Wykonana symulacja numeryczna wskazuje na niewielki ilościowy wpływ wykroploonej i transportowanej szybem wydechowym wody na wielkość wydatku przepływu powietrza. Zjawisko to powoduje zmniejszenie się strumienia objętości powietrza, którego wielkość zależy od temperatury i wilgotności powietrza na podszybiu, wydatku powietrza, spadku temperatury na drodze przepływu oraz średnicy kondensujących kropeł. Przy niekorzystnych warunkach – bliska stanowi nasycenia wilgotność powietrza na podszybiu, jego wysoka temperatura i znaczna długość szybu – wydatek objętościowy przepływu powietrza może zmniejszyć się o 3÷4,3%, przy wzroście oporu zastępczego szybu wentylacyjnego o około 7÷12,6% wartości, jaki ma szyb, gdy nie występuje zjawisko kondensacji pary wodnej.

W obliczeniach dwufazowego przepływu w badanych przypadkach stosowano model Eulera–Lagrange’a. Kryteria określające zakres stosowalności tej metody były podczas badań spełnione. Należy jednak nadmienić, że wszystkie modele oparte na uśrednianiu czasowym Reynoldsa RANS (Reynold’s Avarage Navier–Stokes) charakteryzuje brak uniwersalności i stąd wynika potrzeba ich walidacji [2]. Weryfikacja metody przez porównanie z pomiarami kopalnianymi jest niemożliwa z powodu braku realnych możliwości sterowania parametrami powietrza na podszybiu – jego temperaturą i wilgotnością. Jediną drogą walidacji są tutaj pomiary wykonane na odpowiednio wyposażonym stanowisku laboratoryjnym.

LITERATURA

- [1] Crowe C., Sommerfeld M., Tsuji Yutaka: *Multiphase Flows with Droplets and Particles*. CRC Press, 1998
- [2] Ferziger J.H., Peric M.: *Computational Methods of Fluid Dynamics*, Springer-Verlag, Heidelberg, 1996
- [3] Branny M., Filek K., Nowak B., Ptaszyński B.: Dwufazowy przepływ powietrza i wody w pionowych wyrobiskach górniczych, „Górnictwo i Geoinżynieria” (kwartalnik AGH), 2008, R. 32, z. 3, s. 9–22
- [4] Ptaszyński B.: *Strata naporu wywołana wykraplaniem pary wodnej w szybie wydechowym*, praca doktorska, Kraków, 1986
- [5] Dokumentacja oprogramowania Fluent