

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

WPŁYW PROFILU PRĘDKOŚCI POWIETRZA NA PARAMETRY PRZEPŁYWU DWUFAZOWEGO W SZYBIE WENTYLACYJNYM**

1. Wstęp i cel pracy

Szybami wentylacyjnymi odprowadzane są zwykle duże wielkości wydatku objętościowego powietrza z wyrobisk podziemnych kopalni. Najczęściej długości szybów są znaczne, osiągają nawet 1000 metrów, zazwyczaj stosowane kołowe przekroje poprzeczne mają średnice z przedziału 5,0 do 7,5 metrów. Ilość poziomów wentylacyjnych oraz ilość wyrobisk łączących się z szybem na danym poziomie wentylacyjnym może być różna, przy czym najczęściej jest to jedno lub dwa wyrobiska. W górnym odcinku szybu wentylacyjnego istnieje jego połączenie z wyrobiskiem pochyłym-wznoszącym, którego drugi koniec połączony jest z kanałem wentylacyjnym. Na końcu kanału wentylacyjnego zainstalowany jest wentylator głównego przewietrzania. Zwykle pracuje on w sieci wentylacyjnej jako wentylator ssący.

Często na długości szybu wydechowego występuje kilka dopływów wody spoza obmurza szybowego. Część z tych dopływów istnieje przez wiele lat a intensywność dopływającej wody nie zależy od warunków zewnętrznych. Dotyczy to zwykle dopływów wody z większych głębokości. Istnieć również mogą dopływy wód płytko zalegających, których wydatek zmienia się w czasie i zależy od warunków zewnętrznych. Występować też mogą dopływy wody z kanałów wentylacyjnych (którymi płyną duże strumienie powietrza) do rury szybowej, chociaż one zwykle nie dotyczą kopalń węgla kamiennego. Woda dopływająca tą drogą do szybu pochodzi z wody wynoszonej przez całkowity strumień powietrza wentylacyjnego podczas jego przepływu przez kanał wentylacyjny, gdzie znaczna część jej opada na spąg kanału, skąd jeśli warunki temu sprzyjają wyrobiskiem nachylonym spływa do rury szybowej. Obowiązkiem służb wentylacyjnych jest ujmowanie dopływającej przez obudowę szybową wody poprzez stosowanie systemu rynienek połączonych z rurami izolującymi wodę od płynącego w szybie powietrza. System taki

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, AGH, Kraków.

** Artykuł powstał w ramach pracy statutowej nr 11.11.100.193.

stosowany jest od ponad dwudziestu lat a jego skuteczność nie jest bardzo wysoka. Jego rozbudowa następuje zawsze po fakcie zauważenia nowego dopływu do rury szybowej. Dlatego w większości szybów wentylacyjnych (szczególnie szybów zawodnionych) do strumienia przepływającego przez niego powietrza dopływają pewne ilości wody z otaczającego górotworu.

Jednoczesny przepływ powietrza i wody w szybie wentylacyjnym jest przykładem przepływu dwufazowego. W artykule [3] zamieszczono wyniki badań numerycznych pionowego przepływu mieszaniny dwufazowej złożonej z powietrza i wody. W zastosowanym modelu przyjęto na wlocie do szybu wentylacyjnego stały wydatek masowy powietrza o prostokątnym profilu prędkości. W niniejszych badaniach uwzględniono pojedynczy dolot powietrza na poziomie wentylacyjnym do szybu i badano, jak kształtuje się profil prędkości powietrza w szybie przy różnym usytuowaniu płaszczyzny dopływu wody zewnętrznej.

2. Podstawowe parametry opisujące przepływ dwufazowy

Jednym z podstawowych parametrów opisujących przepływy wielofazowe jest udział objętościowy, który dla fazy rozproszonej wynosi:

$$\alpha_d = \lim_{\delta V \rightarrow V^o} \frac{\delta V_d}{\delta V} \quad (1)$$

gdzie:

δV_d — objętość fazy rozproszonej w objętości δV ,

δV^o — objętość graniczna.

Objętość δV^o jest graniczną objętością, która zapewnia ustaloną wartość średnią [2]. W przeciwieństwie do ośrodka ciągłego, udział objętościowy nie może zostać zdefiniowany w punkcie. Udział objętościowy fazy ciągłej wynosi:

$$\alpha_c = \lim_{\delta V \rightarrow V^o} \frac{\delta V_c}{\delta V} \quad (2)$$

gdzie δV_c – objętość fazy ciągłej w objętości δV .

Jest on czasami zwany porowatością. Z definicji suma udziałów objętościowych musi być jednością, tzn.:

$$\alpha_d + \alpha_c = 1 \quad (3)$$

Średnia gęstość (lub ciężar właściwy) fazy rozproszonej jest masą fazy rozproszonej na jednostkę objętości mieszaniny i jest zdefiniowany jako:

$$\rho_d = \lim_{\delta V \rightarrow V^o} \frac{\delta M_d}{\delta V} \quad (4)$$

gdzie δM_d – masa fazy rozproszonej.

Gęstość średnia jest odnoszona do gęstości materialnej ρ_d przez:

$$\bar{\rho}_d = \alpha_d \cdot \rho_d \quad (5)$$

Suma gęstości średnich dla fazy rozproszonej i ciągłej jest gęstością mieszaniny:

$$\bar{\rho}_d + \bar{\rho}_c = \rho_m \quad (6)$$

Kolejnymi parametrami opisującymi przepływy wielofazowe jest prędkość pozorna (powierzchniowa) i prędkość rzeczywista fazy. Dla przepływów wielofazowych w rurze, prędkość pozorna każdej fazy jest wielkością strumienia masowego tej fazy podzielonego przez iloczyn pola powierzchni rury A i gęstości materialnej. Prędkość powierzchniowa dla fazy rozproszonej wynosi [1]:

$$U_d = \frac{\dot{M}_d}{\rho_d \cdot A} \quad (7)$$

Innymi słowy jest to prędkość fazy, gdy faza ta zajmuje cały przekrój rury. Prędkość fazy u jest rzeczywistą prędkością fazy. Prędkość pozorna i prędkość fazy są powiązane przez udział objętościowy:

$$U_d = \alpha_d \cdot u_d \quad (8)$$

Te same zależności obowiązują dla fazy nośnej.

Dla fazy rozproszonej ważne jest również stężenie masowe fazy rozproszonej:

$$C = \frac{\bar{\rho}_d}{\bar{\rho}_c} \quad (9)$$

Jest to stosunek masy fazy rozproszonej do fazy rozproszonej mieszaniny.

Jakością mieszaniny ciecz-para, gdzie fazą rozproszoną jest ciecz, jest stosunek:

$$x = \frac{\bar{\rho}_d}{\bar{\rho}_m} \quad (10)$$

Innym wyrażeniem powszechnie używanym w przepływach wielofazowych jest obciążenie (loading), które jest stosunkiem wydatku masowego fazy rozproszonej do fazy ciągłej:

$$z = \frac{\dot{m}_d}{\dot{m}_c} \quad (11)$$

Podobną zależnością, ale odniesioną do wydatku masowego mieszaniny, jest tzw. stopień suchości.

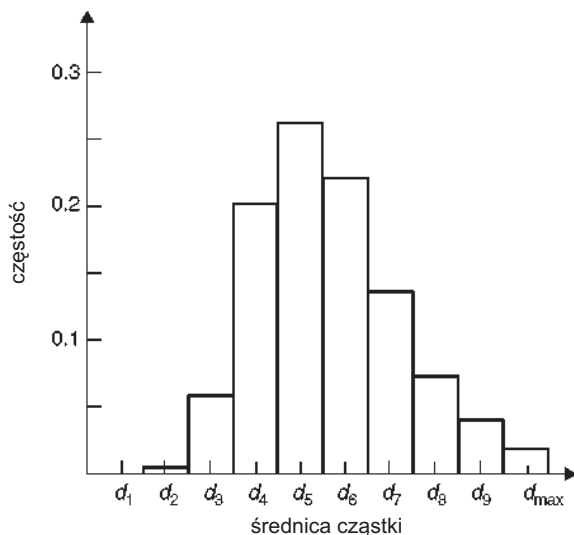
2.1. Dyskretne i ciągłe rozkłady wielkości cząstek

Ważnymi parametrami, które rządzą przepływami rozproszonej mieszaniny dwufazowej są wielkości kropelek i cząstek. Dlatego bardzo istotna jest wiedza na temat statystycznych rozkładów wielkości cząstek. Dla cząstek kulistych lub kropelek, miarą wielkości jest średnica. Natomiast dla cząstek o innych kształtach wyznacza się średnice równoważną.

Najbardziej ogólna definicja rozrzutu rozkładu wielkości cząstek dzieli rozkład na monodispersyjny lub polidispersyjny. Rozkład monodispersyjny jest to taki rozkład, w którym wielkości cząstki są bliskie pojedynczej wielkości, podczas gdy rozkład polidispersyjny sugeruje szeroki przedział wielkości cząstek. W rozkładzie monodispersyjnym odchylenie standardowe jest mniejsze niż 10% średnicy cząstki.

Rozkłady wielkości kropelek lub cząstek można podzielić na rozkłady dyskretne lub ciągłe. Rozkład ciągły wielkości wywodzi się z dyskretnego rozkładu, kiedy możliwy przedział średnicy pomiaru zbliża się do zera.

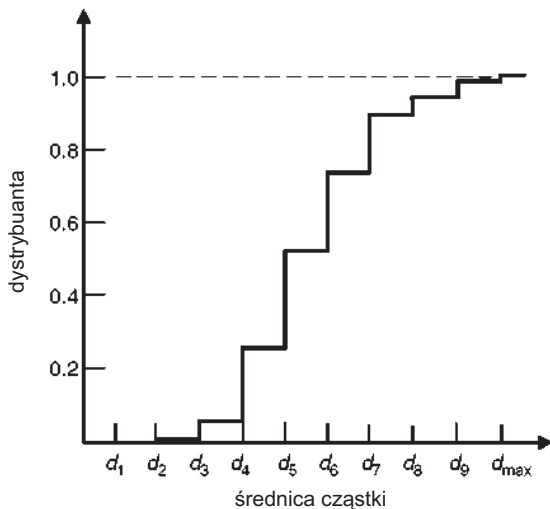
Przykładowy rozkład dyskretny opisany histogramem oraz rozkład ciągły przedstawiony za pomocą funkcji gęstości oraz dystrybuanty dla rozkładu średniego średnic cząstek przedstawiono na rysunkach 1, 2, 3, 4.



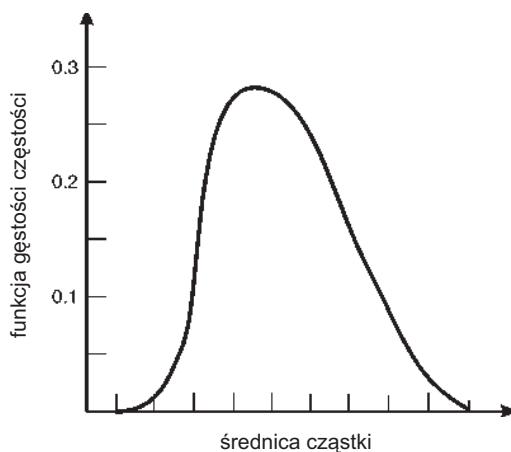
Rys. 1. Dyskretny rozkład częstości średnicy cząstki [1]

Fakt, że w rzeczywistości możemy mieć do czynienia z rozkładem średnic kropelek, powoduje, że przy ich przepływie w strumieniu powietrza w górę wyrobiska pionowego, który to przepływ charakteryzuje się profilem prędkości powietrza w przekroju poprzecznym, możemy liczyć się z tym, że przy różnych wartościach prędkości średniej powietrza zawsze jakaś część kropelek wody opadać będzie w dół, chociażby w strefie przyściennej. Sytu-

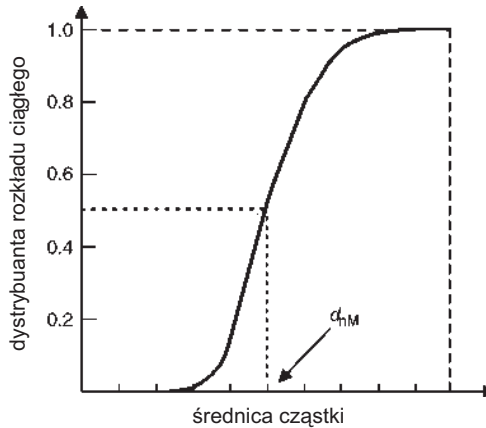
acja, kiedy woda rozproszona w strumieniu wznoszącego się powietrza płynie w obu kierunkach, tzn.: współprądowo i przeciwpładowo, powoduje utrudnienia w uwzględnieniu tego w parametrach przepływu dwufazowego, omówionych już wcześniej. Szczególnie dotyczy to pojęcia tzw. gęstości zastępczej mieszaniny dwufazowej, której dotychczasowy wzór (6) dobrze charakteryzuje jedynie sytuacje statyczne. Oznacza to, że nie uwzględnia on sytuacji przepływu współprądowego fazy ciągłej i dyskretnej, w którym część kroplek wody może płynąć współprądowo z powietrzem, ale z inną niż powietrze prędkością, tzn. przy obecności tzw. poślizgu między fazami. Tym bardziej więc nie uwzględnia on sytuacji jednoczesnego dwukierunkowego przepływu fazy dyskretnej.



Rys. 2. Dystrybuanta rozkładu ciągłego średnic cząstek [1]



Rys. 3. Rozkład ciągły średnic cząstek [1]



Rys. 4. Dystrybuanta rozkładu ciągłego średnic cząstek [1]

Aby móc taką sytuację uwzględnić, wprowadzono w pracy [4] pojęcie zastępczej gęstości mieszaniny dwufazowej.

2.2. Rozkłady używane do skorelowania pomiarów wielkości cząstek i kropeł

Do skorelowania pomiarów wielkości cząstek lub kropełek najczęściej używa się następujących funkcji rozkładów [1]:

- rozkład logarytmiczno-normalny,
- rozkład logarytmiczno-normalny z określoną górną granicą (*Upper-Limit Log-Normal Distribution*),
- pierwiastkowy rozkład normalny (*Square-Root Normal Distribution*),
- rozkład Rosina-Rammlera,
- rozkład Nukiyama-Tanasawy,
- rozkład hiperboliczno-logarytmiczny.

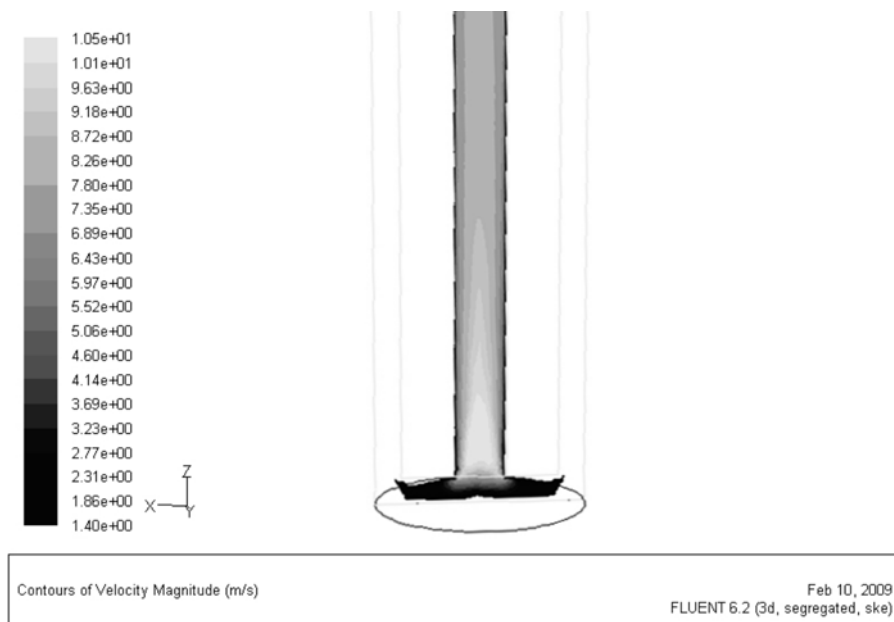
3. Wyniki badań numerycznych

Do badań wykorzystano model układu składający się z: wyrobiska doprowadzającego powietrze do szybu wentylacyjnego, odcinka 300 metrowego szybu o średnicy 5 m, na końcu którego zamodelowano pracę wentylatora o zadanej, liniowo opadającej charakterystyce. Aby uwzględnić wpływ warunków przepływu w szybie na ilość powietrza doprowadzaną do szybu wentylacyjnego, zamodelowano bocznice „zewnątrzną” zamykającą dla powietrza obwód w tzw. oczko zamknięte. Woda dopływająca do pionowego odcinka szybu wentylacyjnego opuścić może go przez oba końce odcinka bez możliwości powrotu do pozostałych modelowanych wyrobisk.

W badaniach tych przyjęto stały wydatek wody dopływającej do przyjętego przekroju poprzecznego szybu, a średnicę kropeł wody miały wartości: 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm.

Założono zatem monodispersyjny rozkład kropeł dopływający do strumienia powietrza płynącego w górę szybem wentylacyjnym. Przyjęte w badaniach wielkości wydatków masowych powietrza i wody dopływającej do takiego odcinka szybu wentylacyjnego zamieszczono na rysunkach otrzymanych z badań numerycznych wykonanych programem Fluent. Celem niniejszych badań było określenie, jak kształtuje się profil prędkości powietrza w szybie przy zbliżonych do realnych warunkach połączenia tych wyrobisk bez dopływu wody i z dopływem wody do szybu, przy różnie ukształtowanych poziomach jej dopływu.

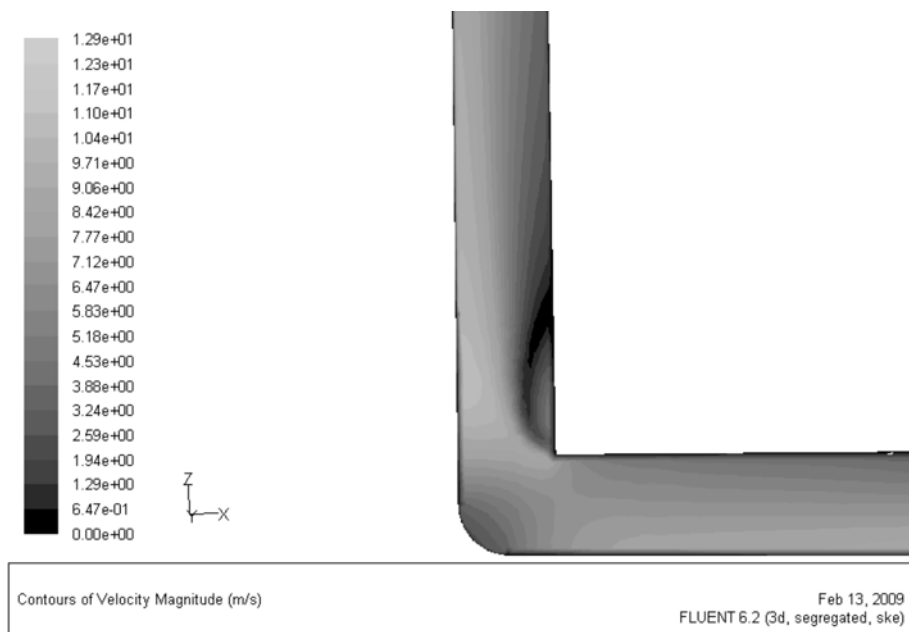
Wyniki otrzymanych badań zamieszczono w postaci graficznej w kolorach szarości z powodu wymogów edytorskich. Ich analiza pozwala odpowiedzieć na pytanie, czy zagadnienie to może być istotne przy badaniach modelowych takich przepływów dwufazowych. Jeśli tak, to upraszczanie w modelowaniu dolotów powietrza do np. symetrycznie występujących na całym obwodzie rury szybowej może być zbyt dużym uproszczeniem wnoszącym istotny wpływ na otrzymane wyniki. To samo zakładanie, że wydatek masowy dopływu powietrza jest stały w czasie lub że profil prędkości strumienia w płaszczyźnie dolotowej do szybu jest prostokątny, prowadzić może do zbyt dużych błędów. Aby tego uniknąć w badaniach tych zdecydowano się na układ zamknięty dla powietrza, gdyż dzięki temu uwzględnić można wpływ warunków przepływu dwufazowego w pionowym odcinku szybu na parametry wlotowe powietrza do badanego odcinka.



Rys. 5. Kontur profilu prędkości powietrza w szybie (przekrój pionowy) w badanym modelu 300 metrowego odcinka szybu wentylacyjnego przy dolocie powietrza na całym obwodzie szybu i przy braku dopływów wody zewnętrznej

Z analizy powyższych rozwiązań wynika, że przy symetrycznym dopływie powietrza (rys. 5) profil prędkości w szybie powyżej dolotu jest od razu symetryczny i ustala się na odcinku około 60 metrów od dolotu.

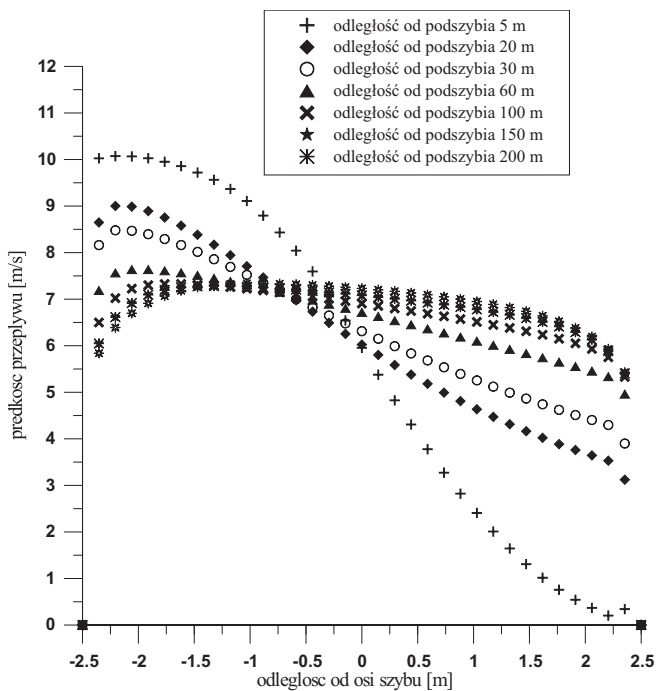
Natomiast przy niesymetrycznym dopływie długość, na której ukształtowanie się profil prędkości, jest znacznie większa i wynosi około 150–200 m (rys. 6). Zmiana profilu prędkości powietrza w szybie w funkcji odległości od wlotu przedstawiona jest na rysunku 7. W przykładach opartych o geometrię trójwymiarową nie uwzględniono dopływu wody, a więc przepływ w szybie wentylacyjnym jest jednofazowy.



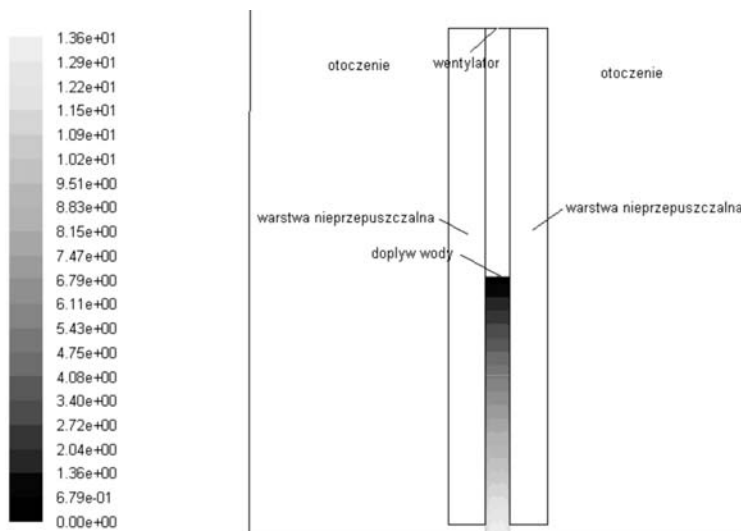
Rys. 6. Kontur profilu prędkości powietrza w szybie (w przekroju pionowym) w badanym modelu 300-metrowego odcinka szybu wentylacyjnego przy jednostronnym dopływie powietrza

Wpływ dopływu wody na wydatek przepływu powietrza w szybie badano na uproszczonym modelu dwuwymiarowym. Powietrze płynie pionową szczeliną o długości 100 m i szerokości 5 m. Wentylator usytuowany na wylocie ze szczeliny ma charakterystykę liniową. Rozważany obszar przepływu jest symetryczny względem osi szczeliny. Źródło wody o wydatku masowym równym od 0,1 kg/s do 2 kg/s umieszczono w połowie długości szczeliny. Obliczenia wykonano dla kropek wody o średnicach zawartych w przedziale 0,053 mm.

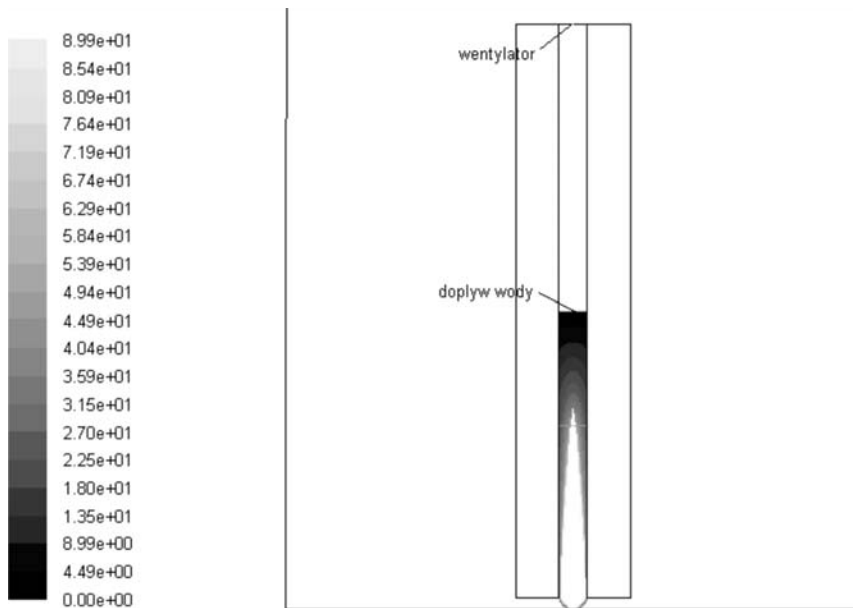
Na rysunkach 8–10 przedstawiono tory kropek wody o średnicy 1mm w funkcji czasu ich przebywania w szczelinie. Dla tej średnicy kropek i przy masowym wydatku wody wynoszącym około 1,1 kg/s następuje odwrócenie kierunku przepływu powietrza w szczelinie.



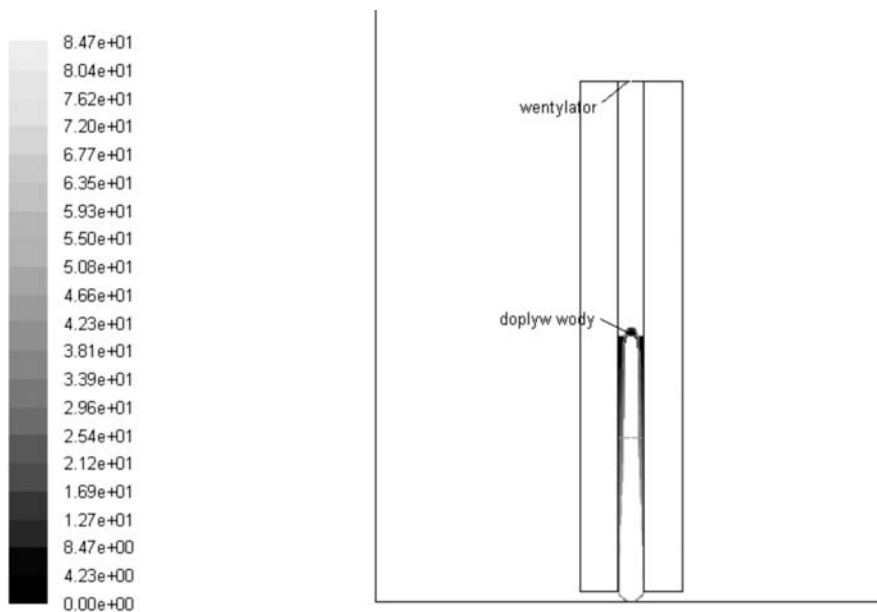
Rys. 7. Profil prędkości powietrza w funkcji odległości od osi szybu oraz odległości od wlotu do przewodu



Rys. 8. Tory kroplel wody o średnicy 1 mm w funkcji czasu przebywania w szczelinie. Wydatek masowy wody 1,15 kg/s; wydatek masowy powietrza – 0,57 kg/s (przepływ odwrócony)



Rys. 9. Tory kroplel wody o średnicy 1 mm w funkcji czasu przebywania w szczelinie. Wydatek masowy wody 0,1 kg/s; wydatek masowy powietrza + 11,08 kg/s



Rys. 10. Tory kroplel wody o średnicy 1 mm w funkcji czasu przebywania w szczelinie. Wydatek masowy wody 0,05 kg/s; wydatek masowy powietrza + 11,78 kg/s

4. Podsumowanie i wnioski

1. Z badań wynika, że ukształtowanie dolotu lub dolotów powietrza do szybu wentylacyjnego w teoretycznym modelu zjawiska ma duży wpływ na kształtowanie się profilu prędkości powietrza w szybie. Oznacza to potrzebę uwzględnienia w modelu wyrobiska doprowadzającego powietrze do szybu o takiej długości, by profil prędkości powietrza przed skrzyżowaniem z szybem był ukształtowany. Konsekwencją tego jest znaczny wzrost ilości węzłów w numerycznej siatce obliczeniowej.
2. Analiza otrzymanych wyników wskazuje, że przy modelowaniu jednego dolotu powietrza do szybu wentylacyjnego profil prędkości powietrza normuje się dopiero w odległości 200 metrów powyżej tego dolotu.
3. Uwzględnienie rzeczywistego profilu prędkości w kontekście lokalizacji możliwych płaszczyzn dolotu wody do szybu może istotnie wpływać na rozkład stężenia wody w powietrzu w płaszczyźnie poprzecznej szybu i na obliczone wielkości gęstości mieszaniny dwufazowej.

LITERATURA

- [1] *Crow C.T.*: Multiphase Flow Handbook, Taylor & Francis Group, New York, CRC, 2006
- [2] *Crowe, C.T., Sommerfeld, M., and Tsuji, Y.*: Multiphase Flows with Droplets and Particles, CRC Press, Boca Raton, FL, 1998
- [3] *Branny M., Filek K., Nowak B., Ptaszyński B.*: Dwufazowy przepływ powietrza i wody w pionowych wyrobiskach górniczych, Górnictwo i Geoinżynieria, w druku
- [4] *Ptaszyński B.*: Strata naporu wywołana wykraplaniem pary wodnej w szybie wydechowym, praca doktorska, Kraków 1986