

Przykład modelowania numerycznego przepływu powietrza wilgotnego w kanałach zamkniętych

MATEUSZ WIELIŃSKI^{ID}, JERZY KRAWCZYK^{ID}, JAKUB JANUS^{ID}

Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków

Streszczenie

Artykuł przedstawia wybrane zagadnienia metodyki modelowania przepływów wilgotnego powietrza przewodach zamkniętych metodą objętości skończonej na przykładzie przepływu w końcowym odcinku kopalnianego szybu wydechowego i kanale stacji wentylatorowej. Przedstawiono w nim zastosowany model numeryczny i uzyskane wyniki obliczeń. Skupiono się na powstającej warstwie przyściennej w zależności od stopnia relatywnej wilgotności. W dalszej części przeprowadzono dyskusję wyników i zarysowano kierunki dalszych badań.

Słowa kluczowe: Przepływ wilgotnego powietrza, Numeryczna Mechanika Płynów, Metoda Objętości Skończonej

1. Wprowadzenie

Wiele analiz z zakresu aerologii górniczej było prowadzonych dla suchego powietrza. Jednak istnieją przypadki, dla których stosowanie tego uproszczenia może budzić wątpliwości a także przypadki, w których obecność wilgoci jest decydującym czynnikiem. Przykładami takich zagadnień może być przepływ w szybach wydechowych i stacjach wentylatorowych, gdzie wilgotność powietrza może wzrastać do poziomu, w którym następuje wykraplanie czy też ocena zagrożenia dla kryształów halitu na ścianach Grot Kryształowych kopalni w Wieliczce [1]. Obecność wilgotnego powietrza może również mieć znaczenie dla pracy urządzeń stosowanych w kopalniach w szczególności aparatury pomiarowej. Niniejszy artykuł przedstawia wybrany sposób modelowania przepływu wilgotnego powietrza i wyniki wstępnych obliczeń. Prace te mogą posłużyć do późniejszych analiz konieczności uwzględnienia wilgotności, gdyż wprowadza ona znaczące utrudnienia w przeprowadzanych symulacjach numerycznych, oraz dla ochrony zabytków. Jednym z takich przykładów są Groty Kryształowe w wielickiej kopalni soli. W obu przypadkach zalecane jest utrzymywanie wilgoci powietrza w stałym, wąskim przedziale. W zadaniu zapewnienia restrykcyjnych wymagań pomocna może być numeryczna mechanika płynów. W tego typu zastosowaniach najczęściej używa się metody objętości skończonych, pozwalających wiernie odwzorować nawet ogromne i złożone przestrzenie, uwzględnić szereg zjawisk takich jak turbulencja, obecność mieszanin gazów i zmiany stanów skupienia substancji uczestniczących w przepływie.

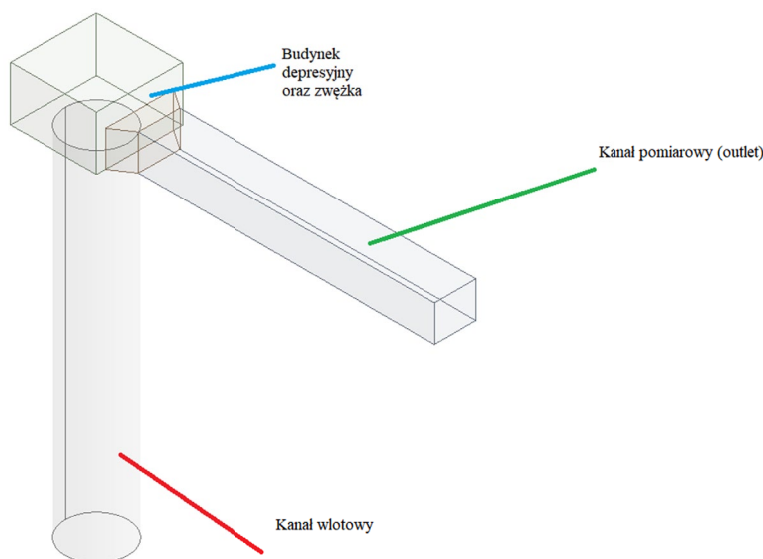
Większość metod modelowania stosowanych dla metody objętości skończonej wymaga sprawdzenia w oparciu o dane eksperymentalne. Jednak wcześniej należy zapewnić wstępną poprawność rozwiązań w szczególności ich zbieżność i pomijalnie mała wrażliwość na dyskretyzację obszaru. [4]

Nawiązując do doświadczeń badań polowych zbudowano model o geometrii odpowiadającej końcowemu odcinkowi szybu wentylacyjnego kopalni, w celu przetestowania metod numerycznych.

2. Prezentacja modelu numerycznego

Przygotowano trójwymiarowy model geometrii szybu wydechowego wentylacji kopalnianej. Geometria składa się z szybu pionowego, budynku przejściowego, zwężki oraz szybu wentylacyjnego (Rys. 1). Uproszczono model, nie projektując takich elementów jak zakręty prowadzące do wentylatorów czy prze-

szkody jak kratownice. Rura wlotowa ma średnicę 8 metrów oraz długość 50 metrów. Jej początek stanowi wlot wilgotnego powietrza o temperaturze 25 stopni. Kanał pomiarowy, służący w dalszej części jako kanał wlotowy dla wentylatorów ma wymiary 6x6 metrów w kwadratowym przekroju poprzecznym, oraz ma długość 75 metrów.



Rys. 1. Widok izometryczny na geometrię modelu szybu wentylacyjnego

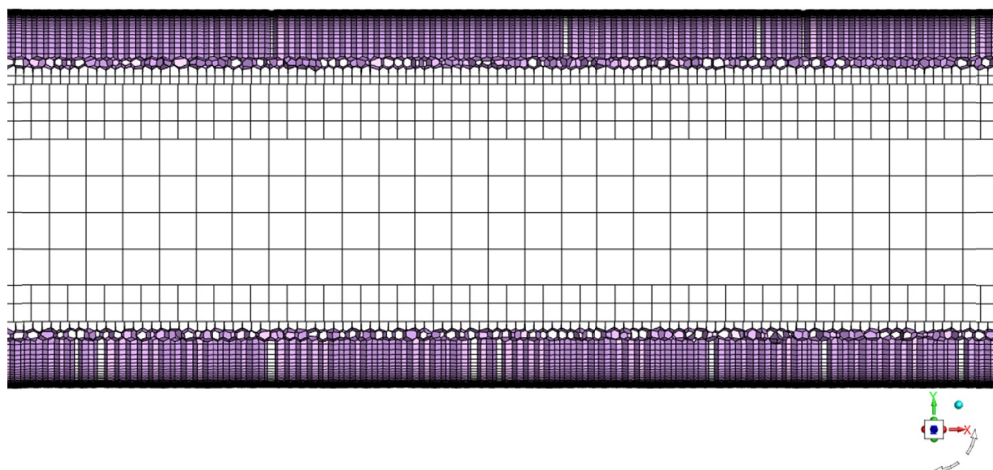
Na wlocie szybu zadeklarowano wlot o zerowym ciśnieniu, oznaczającym wypływ swobodny powietrza o ciśnieniu atmosferycznym. Przepływ był uzyskiwany zadając na wylocie podciśnienie, symulując pracę wentylatora o zadanych parametrach ciśnieniowych. Ciśnienie dobrano w ten sposób, aby w przepływie w kanale pomiarowym prędkość średnia wynosiła 10 [m/s]. Założono, że przepływ jest wysoko turbulentny, nieściśliwy, oraz zastosowano wymianę ciepła z otoczeniem. Obliczenia prowadzono dla modelu turbulencji k-Omega SST. Uwzględniono działanie sił grawitacji. Powietrze wilgotne potraktowano jako mieszaninę powietrza oraz pary wodnej. W procesie symulacji przeprowadzono parametryzację rozpatrując wartości wilgotności względnej na wlocie do kanału od 10% do 100%. Temperaturę otoczenia ustalono jako 15 stopni Celsjusza. Obserwowano rozkłady się wilgoci w przepływie, oraz zmiany występujące w obszarze warstwy przyściennej. Warstwa ta jest kluczowym elementem niepewności pomiarowych przeprowadzanych techniką anemometryczną – zazwyczaj jest ona bliska ścianek, mając grubość pomijalną w stosunku do wielkości modelu.

W modelu zastosowano siatkę z elementów polihedralnych oraz sześciokątnych (w przepływie bezpośrednim). Siatka tego typu pozwala na znacznie zmniejszenie jej wymiarów, zachowując odpowiedni rozmiar do modelowania zjawisk przyściennych (Rys. 2). W siatce numerycznej, ze względu na badanie w warstwie przyściennej zastosowano warstwę inflacyjną. Składa się ona z 26 warstw, z pierwszą o wysokości 0.5 [mm], o współczynniku wzrostu 1.15 [3,9].

W modelu zastosowano również opcję *Eulerian Wall Film*, pozwalającą na tworzenie się filmu wodnego na ściankach geometrii. Opcja ta pozwala na dostrzeżenie miejsc newralgicznych, oraz jest krokiem przejściowym do bardziej zaawansowanych symulacji takich jak modelowanie kondensacji pary wodnej. Użycie tej metody zasugerowane zostało poprzez rozprawę doktorską Sławosza Kleszcza “Opracowanie systemu kontroli mikroklimatu opartego na wysokosprawnym periodycznym przeciwprądowym wymienniku ciepła” [3,8]. W pracy obliczano podobny przypadek pod względem technicznym – przepływ wilgotnego powietrza oraz osadzanie się go na ściankach modelu. W badaniach eksperymentalnych stwierdzono wysoką zgodność wyników numerycznych jak i rzeczywistych, co potwierdza słuszność stosowania opcji Eulerian Wall Film w podobnych zagadnieniach.

Dla przyspieszenia symulacji, użyto modelu stacjonarnego przepływu, z zastosowaniem pseudo kroku czasowego o współczynniku relaksacji 0.5. Charakter badań miał na celu sprawdzenie różnic w funkcji przyściennej, co pozwoliło na ten zabieg. W przyszłości, rozszerzając badania o kondensację pary wodnej konieczne będzie używanie modeli niestacjonarnych, o bardzo niskim współczynniku CFL (Courant-Friedrich-Lewy) [3].

Ansys
2022 R1

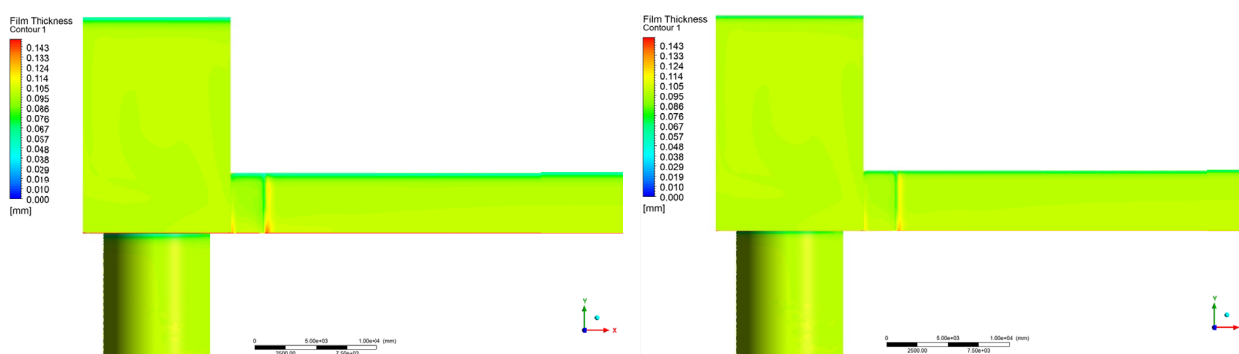


Rys. 2. Zbliżenie na siatkę numeryczną w części kanału wylotowego

3. Omówienie wyników symulacji

Jak wspomniano wcześniej, parametryzacji podlegała wilgotność względna powietrza, w zakresie od 10% do 100%. W każdym z przypadków wilgotności powietrza zauważyć można, że grubość filmu rozkłada się nierównomiernie zachowując specyficzną tendencję: w górnych narożach powstaje go mniej, niż w dolnych (Rys. 3). Na poziomych powierzchniach grubość filmu jest równomiernie rozłożona przyjmując wartości około 0.1 mm. Maksymalna grubość filmu wodnego osiągnięta była w narożach, blisko części budynkowej i wynosiła ona około 0.15 mm. Zmiany wartości obserwowano na pionowych powierzchniach. Zasięg obniżania bądź zwiększania się wartości grubości filmu wynosi około 10%. Pola powierzchni.

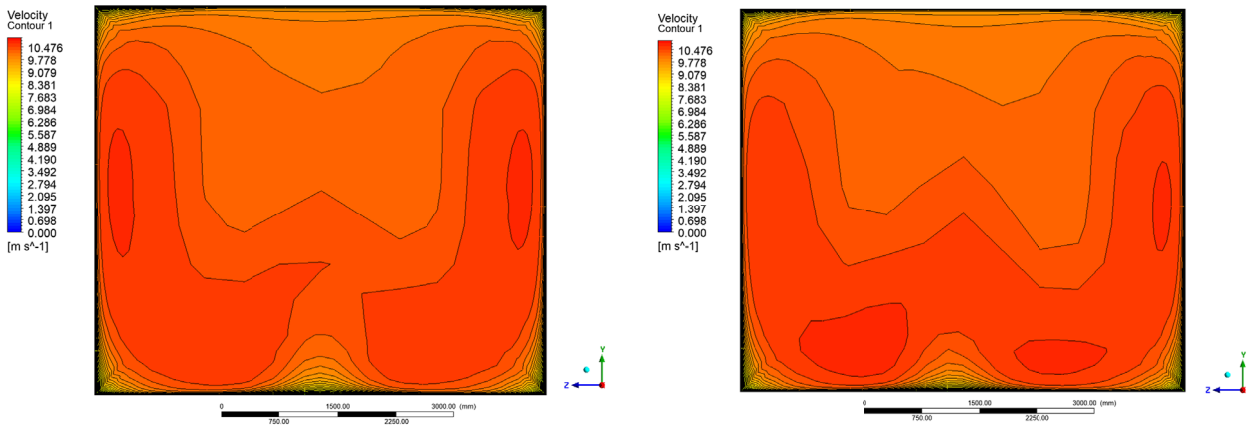
Należy wspomnieć, że jest to przypadek numeryczny, wzorujący się tylko na parametrach w kanałach wentylacyjnych. W celu dokładniejszego odwzorowania, potrzebne są badania in-situ.



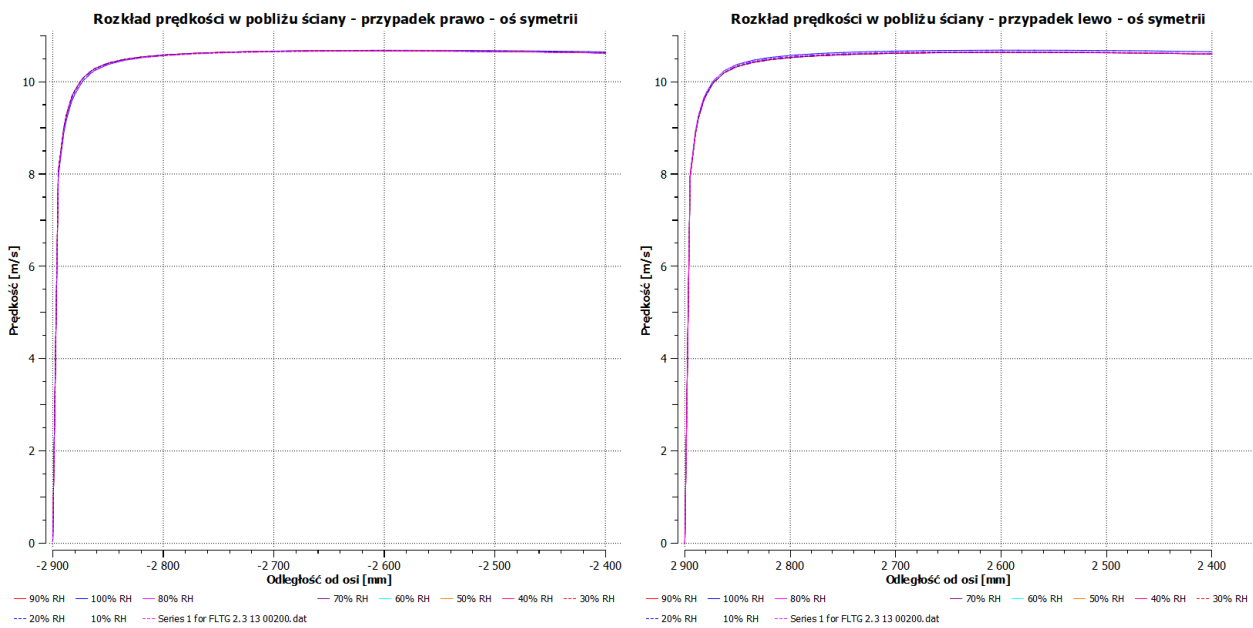
Rys. 3. Widok na część kanału wentylacyjnego – grubość filmu wodnego. Po lewej 100% wilgotności, po prawej 50%

Dalszą częścią badań była analiza wpływu wilgotności względnej na przepływ obszarze przyściennym. W tym celu stworzono płaszczyznę pionową, oddaloną 30 [m] od końca zwężki. W tym przypadku zauważyć że w połowie wysokości kanału następuje zmian w charakterze rozkładów. W przypadku wilgotności 100% powstają maksima po obu stronach kanału - w innych przypadkach jest to mniej widoczne, najczęściej maksima powstają wyłącznie po jednej stronie.

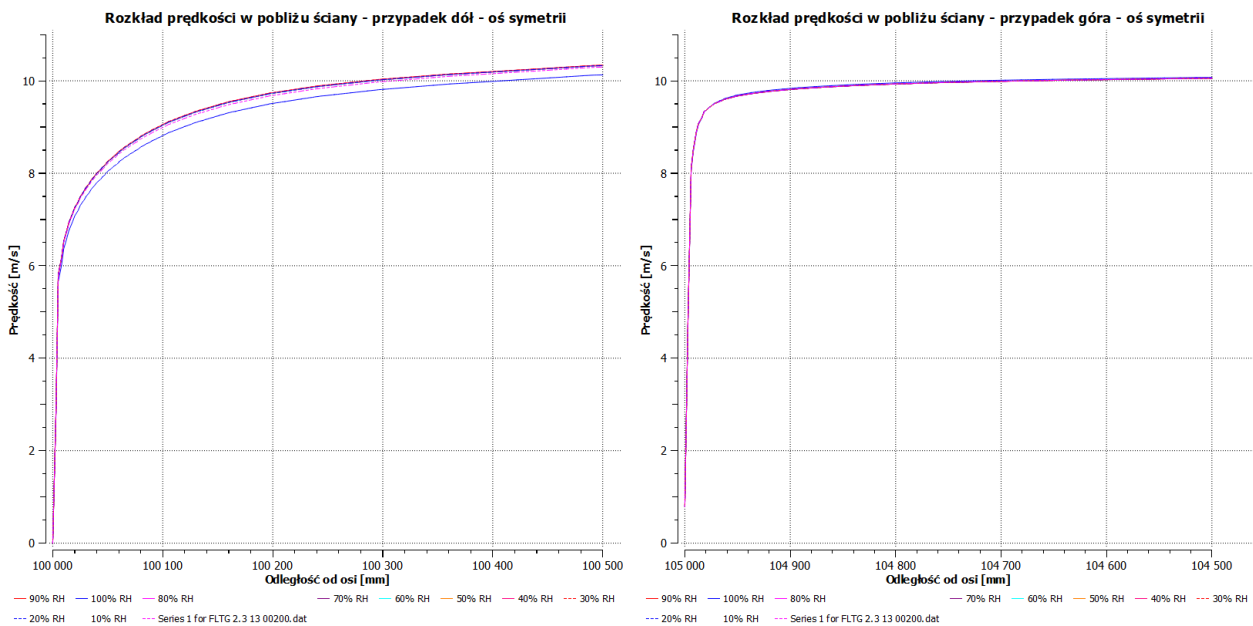
Dla zbadania rozkładu prędkości w pobliżu warstwy przyściennej stworzono linie w każdej z części kanału, w środkach osi symetrii. Różnice dla osi poziomej są znikome – wartości te nie przekraczają 0.5% (Rys. 5). Największe odchylenia, sięgające około 5% zauważyć można na osi pionowej, w dolnej części szybu.



Rys. 4. Pole prędkości na płaszczyźnie pomiarowej. Po lewej dla 100% wilgotności, po prawej dla 50%



Rys. 5. Rozkład funkcji przyściennej dla linii poziomej



Rys. 6. Rozkład funkcji przyściennej dla linii pionowej

4. Wnioski i uwagi końcowe

Badania dotyczące wpływu wilgotności na przepływ w obszarze przyściennym koncentrowały się na opracowaniu metodyki symulacji. Zdobyte doświadczenie posłużyć może w dalszych pracach i odniesione do fizycznych modeli i danych pomiarowych w celu walidacji. Modele te posłużą również jako modele weryfikacyjne w dalszych badaniach, mających na celu zastosowania metod niestacjonarnych dla uwzględnienia kondensacji pary wodnej [3-5].

Zdobyte dane oraz doświadczenie mogą przysłużyć dla badań prowadzonych dla kopalni, w celu optymalizacji szybów wentylacyjnych. Przeprowadzone symulacje wskazują na istotny wpływ wilgotnego powietrza na rozkłady w obszarach przyściennych, a co za tym idzie, w przepływie w szybie wentylacyjnym. Badania będą kontynuowane w kolejnych latach.

Literatura

- [1] Alexandrowicz Z. (red) (2000): *Grotty kryształowe w Kopalni Soli Wieliczka*, *Studia Natura 46*. Wyd. Polska Akademia Nauk Editor: Instytut Ochrony Przyrody PAN str. 205. ISBN: ISSN 0081-6760.
- [2] *Ansys Theory Guide 2021 R2*. Dostępny: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v201/en/flu_th/flu_th.html?q=ansys%20fluent%20theory%20guide
- [3] Dziurzyński W., Krach A., Krawczyk J., Pałka T., (2008): *The flow of humid air in the ventilation network of a mine with an underground fire*. Arch. Min. Sci., Monograph Number 4, pp. 112.
- [4] Janus J., (2017): *Modelowanie numeryczne zjawisk przepływowych w wyrobiskach kopalnianych z wykorzystaniem wyników skaningu laserowego*. Rozprawa doktorska, IMG-PAN.
- [5] Janus J., Krawczyk J., (2021): *Measurement and Simulation of Flow in a Section of a Mine Gallery*. *Energies*. 14 (16), 4894. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14164894>
- [6] Janus J., Krawczyk J., (2023): *Defining the Computational Domain and Boundary Conditions for Fluid Flow in a Mining Excavation*. *Archives of Mining Sciences*. DOI: <https://doi.org/10.24425/ams.2023.146860>
- [7] Kleszcz S., *Opracowanie systemu kontroli mikroklimatu opartego na wysokosprawnym periodycznym przeciwprądowym wymienniku ciepła*. Rozprawa doktorska, Wydział Energetyki i Paliw Akademii Górniczo-Hutniczej.
- [8] White Frank M., *Fluid Mechanics, McGraw-Hill Education, 7th edition*. February, 2010. ISBN: 978-0077422417.

Example of numerical modeling of moist air flow in closed ducts

Abstract

The article presents selected issues of the methodology of modeling the flow of moist air in closed ducts using the finite volume method on the example of the flow in the end section of a mine exhaust shaft and the duct of a fan station. It presents the numerical model used and the computational results obtained. The focus was on the resulting near-wall layer depending on the degree of relative humidity. It goes on to discuss the results and outline directions for further research.

Keywords: Moist air flow, Computational Fluid Mechanics, Finite Volume Method