

Marian Branny*, Krzysztof Broda*,
Krzysztof Filek*, Władysław Mikołajczyk*

PRÓBA OPISU ZJAWISKA PRĄDÓW WSTECZNYCH METODAMI CFD**

1. Wprowadzenie

Jeśli w danym przekroju wyrobiska górniczego w tym samym czasie odbywa się przepływ powietrza w dwóch przeciwnych kierunkach, to mówimy wtedy o prądach wstecznych. Matematyczny opis tego zjawiska w wyrobiskach kopalnianych podał profesor Jerzy Litwiniszyn w pracy [5]. Rozważania swoje oparł na podstawowych równaniach hydrodynamiki oraz twierdzeniach Thompsona i Bjerknessa. Wykazał, że zjawisku powstawania prądów wstecznych w obszarze D ograniczonym konturem K towarzyszy zmiana cyrkulacji. Zaproponował, aby miarą tendencji do powstawania prądów wstecznych była szybkość zmiany cyrkulacji w czasie. Z rozważań profesora J. Litwiniszyna [5] wynika, że zjawisko prądów wstecznych w warunkach kopalnianych może wystąpić wtedy, jeśli zaistnieje tylko odpowiedni rozkład temperatury i ciśnienia powietrza, a więc niekoniecznie tylko w czasie pożaru podziemnego.

Dalsze prace poznawcze nad zjawiskiem prądów wstecznych kontynuowane były przez E. Marszałka, J. Pawińskiego i J. Roszkowskiego [6–8], który oprócz rozważań teoretycznych przeprowadzali badania na modelu w laboratorium. Po wytworzeniu w przewodzie liniowego pola temperatur dokonywali pomiarów temperatury i prędkości powietrza przy różnym jego kącie nachylenia. Poczynione pomiary oraz obserwacje kształtowania się smug dymu, potwierdziły regułę dotyczącą kierunku powstawania prądów wstecznych.

W artykule podjęto próbę opisu zjawiska prądów wstecznych na drodze numerycznej. Zadanie rozwiązywano metodą CFD (*Computer Fluid Dynamics*), techniką która coraz szerzej wykorzystywana jest w różnych aplikacjach przemysłowych [1, 4, 9–12].

Obliczenia wykonano przy użyciu programu FLUENT 6.1.

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

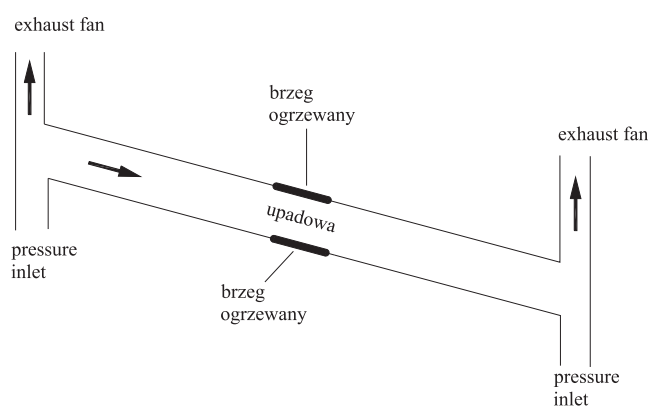
** Pracę wykonano w ramach pracy statutowej nr 11.11.100.850

2. Obszar przepływu

Obszar przepływu tworzy upadowa o długości 150 m, nachylona pod kątem 15° do poziomu i prostokątnym przekroju poprzecznym o polu 12 m^2 . Przepływ powietrza w upadowej wymuszany jest przez przyjęcie odpowiednich warunków brzegowych w dwóch krótkich otworach pionowych o długości 15 m (rys. 1). Takie przyjęcie obszaru przepływu umożliwia stosowanie w obliczeniach geometrii dwuwymiarowej. W warunkach izotermicznych strumień powietrza kierowany jest na upad. Źródło ciepła, w postaci segmentów powierzchni o podwyższonej temperaturze, usytuowano między 65 a 75 m bieżącym wyrobiska na jego spągu i stropie.

3. Model matematyczny

Zakłada się, że powietrze jest gazem doskonałym i ściśliwym, dla którego znajduje zastosowanie równanie Clapeyrona. Ruch jest ustalony, zaś proces przebiega w warunkach nieizotermicznych. Rozważany problem opisany jest układem równań ciągłości, Naviera–Stokesa, energii i modelu turbulencji k – ϵ (kinetyczna energia turbulencji, szybkość dyssypacji kinetycznej energii turbulencji) [2, 3].



Rys. 1. Schemat dwuwymiarowego obszaru przepływu wraz z typem przyjętych warunków brzegowych

Warunki brzegowe (rys. 1)

- W otworach wlotowych przyjmowano w przekroju: stałą wartość ciśnienia, temperatury powietrza oraz stałe wartości kinetycznej energii turbulencji i szybkości dyssypacji tej energii — wyliczane przy założeniu 10-procentowej intensywności turbulencji na wlocie i skali turbulencji wynoszącej $L = 3 \text{ m}$. W programie FLUENT jest to tzw. warunek brzegowy typu *pressure inlet*.

- W przekrojach otworów wylotowych przyjmowano stałe wartości ciśnienia statycznego oraz stały skok ciśnienia wymuszający przepływ w wyrobiskach, odpowiadający depresji wentylatorów. Ten typ warunku brzegowego w programie nosi nazwę *exhaust fan*.
- Przy opisie warunków przyściennych korzystano z klasycznego modelu funkcji ściany.

Obszar przepływu pokryto siatką numeryczną, zagęszczoną w pobliżu ścian sztywnych i w obszarach z podwyższoną temperaturą ścian, zawierającą około 480 000 komórek elementarnych.

4. Analiza wyników obliczeń

Jako pierwszy rozważano przykład przepływu izotermicznego. Na dwóch wylotach z obszaru przyjęto stałe, ale różne co do wartości skoki ciśnienia, które można utożsamiać z depresjami wentylatorów zainstalowanych na wylotach. Wielkości depresji wentylatorów przyjęto tak, by wymusić schodzący kierunek przepływu powietrza w upadowej. We wszystkich obliczeniach parametry te nie były zmieniane. Przy tych założeniach strumień masowy powietrza płynącego upadową jest równy 0,96 kg/s, zaś prędkość średnia 0,26 m/s. Kolejne przykłady dotyczą warunków nieizotermicznych. Na ścianie sztywnej, na odcinku o długości 10 m przyjmowano temperaturę wyższą niż w pozostałej części. Segment ściany z podwyższoną temperaturą usytuowany był w środku upadowej (między 65 a 75 mb) w części spągowej i stropowej. W ramach prezentowanej pracy wykonano obliczenia dla wariantów zestawionych w tabeli 1. We wszystkich obliczeniach przyjęto, że zarówno temperatura powietrza wlotowego, jak i ścian (poza strefą o podwyższonej temperaturze) wynosi 300 K.

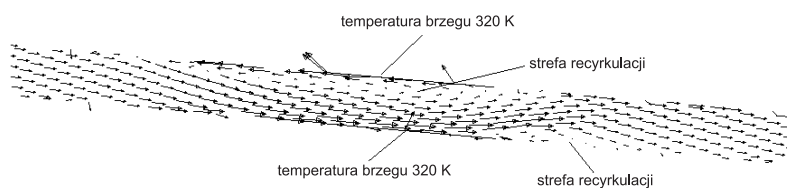
TABELA 1

Podstawowe parametry charakteryzujące rozważane przykłady

Wariant	Temperatura spągu K	Temperatura stropu K	Strumień masowy powietrza* kg/s	Uwagi
1	300	300	0,96	Schodzący prąd powietrza
2	320	300	0,33	Schodzący prąd powietrza
3	300	320	0,34	
4	350	300	0,054	Dwie strefy z prądem wstecznym
5	300	350	0,063	
6	370	300	-0,15	Wzmocniona recyrkulacja powietrza w dolnej strefie z prądem wstecznym
7	300	370	-0,20	
8	390	300	-0,25	Odwrócenie przepływu w dolnej strefie upadowej
9	300	390	-0,28	

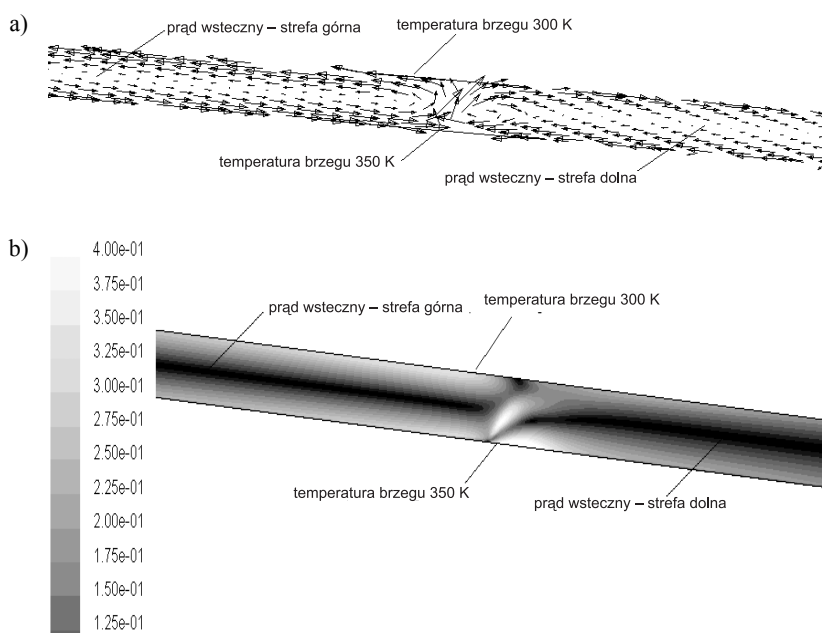
* Znak dodatni dla schodzącego prądu powietrza.

Wraz ze wzrostem temperatury na ścianach sztywnych — zarówno w części spągowej, jak i stropowej — maleje ilość powietrza płynącego upadową. Przy temperaturze, zarówno spągu jak i stropu, wynoszącej 320 K, strumień masowy powietrza zmniejsza się około trzykrotnie, a w pobliżu źródła ciepła pojawiają się niewielkie strefy z przepływem recyrkulacyjnym (rys. 2).



Rys. 2. Pole prędkości w środkowej strefie upadowej — temperatura spągu i stropu 320 K

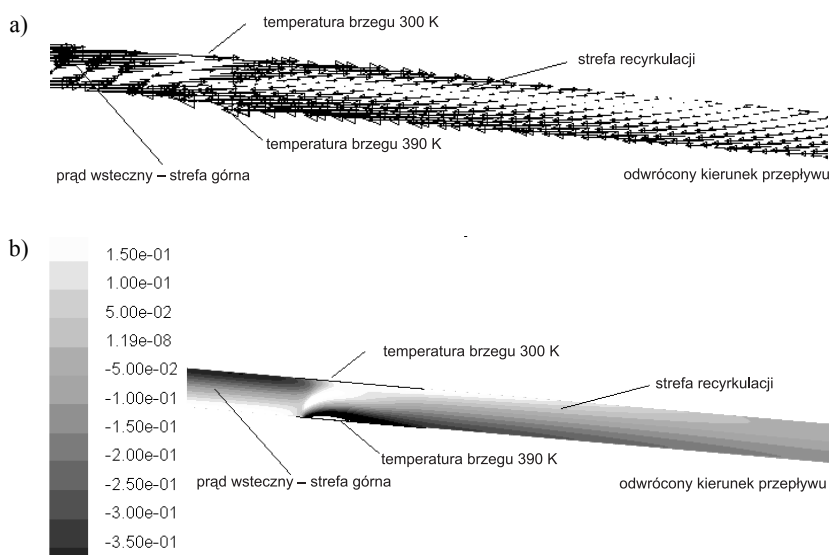
Dalszy wzrost temperatury spągu lub stropu prowadzi do powstania dwóch, charakterystycznych stref z prądem wstecznym (rys. 3).



Rys. 3. Pole prędkości w środkowej strefie upadowej – temperatura spągu 350 K:
a) wektory prędkości; b) kontur prędkości

Chłodne powietrze płynie przy spągu, przy czym powyżej źródła ciepła w kierunku upadu, zaś poniżej — po wzniosie. Kierunek przepływu ogrzanego strumienia powietrza jest odwrotny. Przy temperaturze ścian 350 K z chodnika górnego do upadowej wpływa i wy-

plywa prawie taka sama ilość powietrza. Podobnie bilansują się wlotowe i wylotowe strumienie masowe powietrza po stronie chodnika dolnego. Tak więc, w tych warunkach, strumienie masowe powietrza przepływające przez dowolny poprzeczny przekrój upadowej w dwóch przeciwnych kierunkach są w przybliżeniu równe. Przy wzroście temperatury spągu lub stropu do 370 K w dolnej strefie upadowej obserwuje się zintensyfikowanie zjawiska recyrkulacji powietrza. Powietrze płynie w dalszym ciągu przez przekroje upadowej na skrzyżowaniach z chodnikami dolnym i górnym w dwóch przeciwnych kierunkach, natomiast zauważalny jest wzrost strumienia masowego płynącego po wzniosie. Dalsze zwiększenie temperatury ścian powoduje odwrócenie kierunku przepływu w dolnej strefie upadowej (rys. 4).

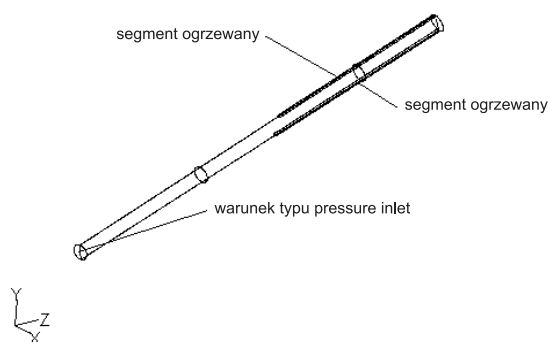


Rys. 4. Pole prędkości w środkowej strefie upadowej — temperatura spągu 390 K:
a) wektory prędkości; b) kontur prędkości

5. Próba weryfikacji modelu

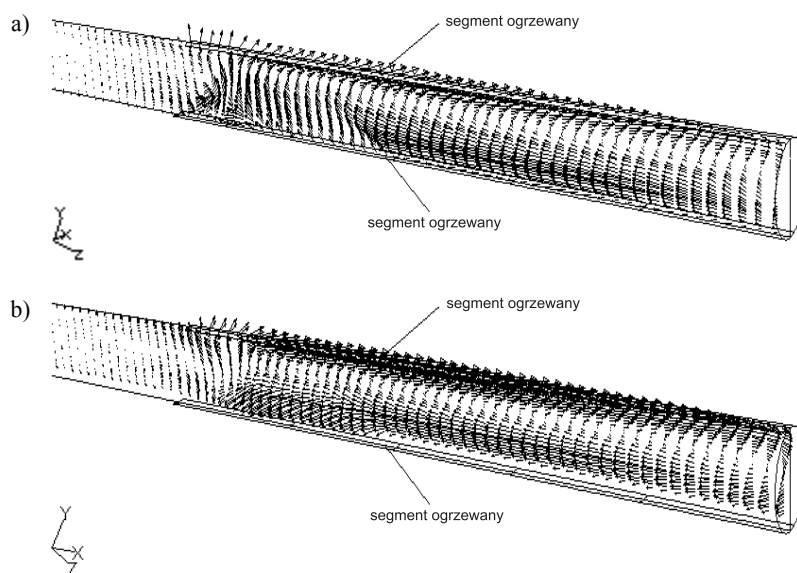
Autorzy prac [7, 8], opisują wyniki eksperymentu modelowania zjawiska prądów wstecznych wykonane w skali laboratoryjnej. W nachylonym do poziomu przewodzie o długości 1460 mm i średnicy 90 mm, którego jeden koniec był zamknięty, ogrzewano powietrze za pomocą elektrycznych spiral grzejnych umieszczonych w górnej i dolnej części rury. W wybranych punktach mierzono prędkość przepływu anemometrem oscylacyjnym oraz temperaturę powietrza termometrem rtęciowym. Wyniki cytowanego eksperymentu potraktowano tutaj jako test wiarygodności obliczeń numerycznych. Z uwagi na brak informacji dotyczących mocy spiral elektrycznych bądź temperatur powierzchni grzejnych w obliczeniach dążono do odtworzenia uzyskanego w doświadczeniu rozkładu temperatur powietrza i dla

takiego przypadku porównywano eksperymentalne i teoretyczne pola prędkości. Obliczenia wykonano dla geometrii 3D przy założeniu zarówno laminarnego, jak i turbulentnego charakteru przepływu w przewodzie. Schemat obszaru przepływu przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat modelu do obliczeń weryfikujących

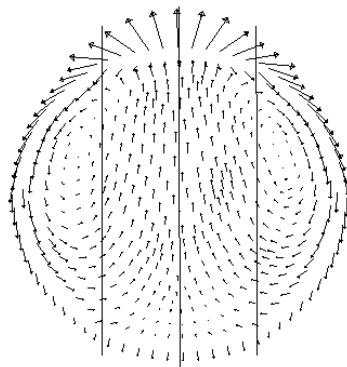
Według Autorów eksperymentu [8] przepływ w przewodzie miał charakter laminarny. Obliczenia natomiast wskazują, że bliższe wielkości pomierzonym są wyniki uzyskane za pomocą modelu turbulentnego. Pole prędkości rzutowane na płaszczyznę pionową przechodzącą przez oś przewodu zamieszczono na rysunku 6a. Płaszczyzna ta jest równocześnie płaszczyzną symetrii. Obraz pola prędkości w płaszczyźnie równoległej i oddalonej o $\pm 0,02$ m od płaszczyzny symetrii przedstawia rysunek 6b.



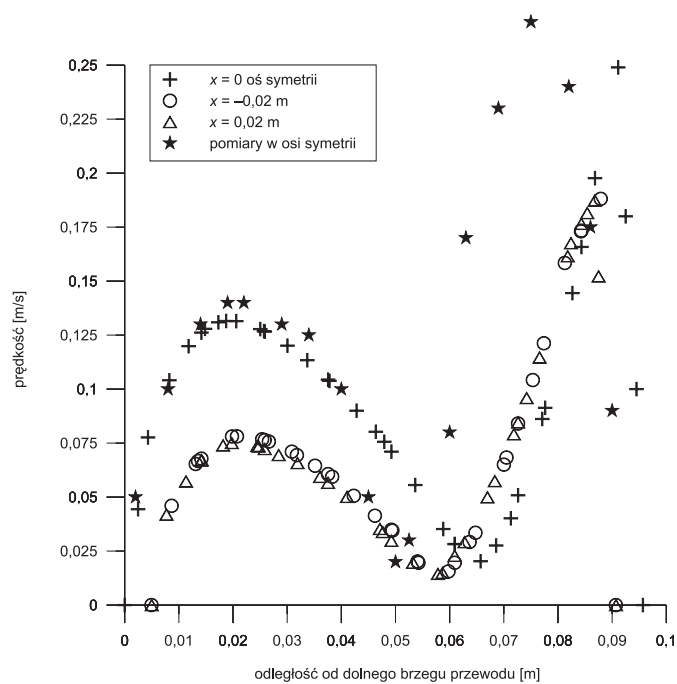
Rys. 6. Pole prędkości rzutowane na płaszczyzny pionowe: a) płaszczyzna symetrii; b) płaszczyzna równoległa do płaszczyzny symetrii i oddalona o 0,02 m

Wektorowe pole prędkości w przekroju poprzecznym usytuowanym w połowie długości ogrzewanego segmentu przewodu pokazano na rysunku 7.

Porównanie wyników obliczeń z pomiarami w postaci rozkładów prędkości (modułów prędkości) wzdłuż równoległych, pionowych linii zaznaczonych na rysunku 7, z których jedna przechodzi przez oś przewodu, a pozostałe oddalone są o $\pm 0,02$ m, obrazuje rysunek 8.



Rys. 7. Pole prędkości w przekroju poprzecznym usytuowane w połowie długości ogrzewanego segmentu przewodu



Rys. 8. Porównanie wyników obliczeń z pomiarami [8] — rozkład prędkości (modułów prędkości) wzdłuż pionowych linii zaznaczonych na rysunku 7

Zarówno wyniki obliczeń, jak i pomiarów wskazują, że rozkład prędkości w przekroju poprzecznym nie jest symetryczny. Z rozważań teoretycznych i eksperymentalnych wynika, że maksymalna prędkość w strumieniu chłodniejszego powietrza (dolna część przewodu) jest na znacznej długości przewodu wyraźnie mniejsza od odpowiedniej wielkości strumienia przeciwnego.

Maksymalne prędkości w dolnej części przewodu wynoszą 0,13 m/s (obliczenia) i 0,14 m/s (pomiar) natomiast w górnej 0,25 m/s (obliczenia) i 0,27 m/s (pomiar), przy czym w obliczeniach maksimum prędkości w strumieniu skierowanym do zamkniętego końca przewodu przypada bliżej górnej ścianki przewodu. Należy tutaj podkreślić, że z uwagi na stosowane przyrządy pomiarowe, pomiar prędkości w pobliżu ścianki jest prawdopodobnie obciążony sporym błędem pomiarowym. W strumieniu chłodniejszym, płynącym dolną częścią przewodu zarówno zmierzone prędkości, jak i ich rozkład są zbliżone do wyznaczonych drogą teoretyczną.

6. Podsumowanie

Wykonana symulacja przepływu w warunkach sprzyjających powstawaniu prądów wstecznych potwierdziła istniejący pogląd o złożoności tego zjawiska. Przy miejscowym źródle ciepła w schodzącym prądzie powietrza początkowo obserwuje się zmniejszenie ilości przepływającego powietrza oraz tworzenie się w pobliżu miejsc z podwyższoną temperaturą stref z przepływem recyrkulacyjnym, których obszar powiększa się w miarę wzrostu temperatury. Dalsze zwiększanie temperatury spągu lub stropu prowadzi do powstania dwóch stref z prądem wstecznym. Na tym etapie przez każdy z końcowych przekrojów poprzecznych upadowej powietrze płynie w dwóch przeciwnych kierunkach — część przekroju obejmuje strumień powietrza wpływającego do upadowej, zaś pozostała — wypływający. Przy odpowiedniej mocy źródła ciepła następuje odwrócenie kierunku przepływu w upadowej, początkowo występujące tylko w jej dolnej strefie (dla najniższych kot niwelacyjnych) przy równoczesnym istnieniu obszarów z przepływem recyrkulacyjnym.

Wiarygodność obliczeń numerycznych oceniono przez porównanie z wynikami pomiarów. Przedstawiony test wiarygodności modelu ma charakter fragmentaryczny z uwagi na niewystarczającą ilość danych pomiarowych. Tym niemniej, bazując na uzyskanych wynikach, można sądzić, że nie tylko pod względem jakościowym, ale i ilościowym, wykorzystany w symulacji model CFD z zadowalającą dokładnością odzwierciedla rozważane zjawisko rzeczywiste.

LITERATURA

- [1] *Branny M.*: Numeryczne modelowanie przewietrzania wyrobisk ślepych systemem wentylacji kombinowanej. 4 Szkoła Aerologii Górniczej, Kraków, 2006, 431–438
- [2] FLUENT Inc., 2005: FLUENT 6.1 Documentation
- [3] *Kazimierski Z.*: Podstawy mechaniki płynów i metod komputerowej symulacji przepływów. Politechnika Łódzka, 2004

- [4] *Krawczyk J.*: Symulacja nieustalonego przepływu wywołanego zamknięciem i otwarciem tamy. 4 Szkoła Aerologii Górniczej, Kraków, 2006, 439–454
- [5] *Litwiniszyn J.*: Prądy wsteczne w wyrobiskach. Przegląd Górniczy, nr 6, 1952
- [6] *Marszałek E., Pawiński J., Roszkowski J.*: Zjawisko prądów wstecznych w wyrobiskach górniczych. Górnictwo, r. 1, z. 3, 1977
- [7] *Marszałek E., Pawiński J., Roszkowski J.*: Zjawisko prądów wstecznych w świetle rozważań teoretycznych i badań modelowych. Archiwum Górnictwa, t. 35, z. 2, 1990
- [8] *Marszałek E., Pawiński J., Roszkowski J.*: Zjawisko prądów wstecznych w wyrobiskach górniczych. Archiwum Górnictwa, t. 36, z. 1, 1991
- [9] *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, 247–251
- [10] *Silvester S.A.*: The Integration of CFD and VR Methods to Assist Auxiliary Ventilation Practice. PhD Thesis. The University of Nottingham, Nottingham, 2002
- [11] *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, 411–418
- [12] *Young T.*: CFD and Field Testing of a Naturally Ventilated Full-Scale Building. University of Nottingham, Nottingham, 2004 (Ph.D. Thesis)