

Wybrane aspekty metodyki tworzenia wieloskalowych modeli numerycznych rejonu ściany

JERZY KRAWCZYK, JAKUB JANUS, PIOTR OSTROGÓRSKI

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

Streszczenie

Rozwijana w ramach numerycznej mechaniki płynów metoda objętości skończonej jest z coraz częściej stosowana do modelowania zagadnień przepływowych wentylacji kopalń. Jednak systemy wentylacyjne kopalń głębinowych są zbyt rozległe i złożone, by przy wydajności współczesnych komputerów prowadzić symulacje dla całych obiektów. Szczególnie dotyczy to procesów zmiennych w czasie. Ograniczenia te powodują, że są modelowane wybrane fragmenty sieci. Dla procesów stacjonarnych pominięte obszary mogą być zastąpione przez warunki na brzegach. Podczas stanów przejściowych dynamiczne własności pominiętych obszarów sieci mogą mieć istotny wpływ na przebieg zjawiska. Skutecznym rozwiązaniem może być uzupełnienie modelu o prostszy opis dynamiki pominiętego obszaru. W ten sposób mogą być tworzone wieloskalowe modele łączące na przykład jedno i trójwymiarowy opis. Prowadzi to do optymalnej reprezentacji obiektu – szczegółowej dla obszarów krytycznych dla badanych procesów i uproszczonej dla obszarów o mniejszym wpływie. Podobne ograniczenia dotyczą wielu analogicznych dziedzin takich jak wentylacja tuneli czy przepływy w instalacjach reaktorów atomowych, dla których już od kilku lat zaleca się i stosuje wieloskalowe modele. Przy łączeniu różnych jakościowo opisów należy sformułować metody wymiany danych oraz dokonać praktycznej ich implementacji w oprogramowaniu. Przedstawiono wynik studiów literaturowych i prac koncepcyjnych ukierunkowanych na wdrożenie i efektywne wykorzystanie metodyki łączenia modeli numerycznych.

Słowa kluczowe: numeryczna mechanika płynów, modelowanie wieloskalowe, wentylacja kopalń, stany przejściowe

1. Wprowadzenie

Systemy wentylacyjne kopalń głębinowych są bardzo złożonymi obiektami. Tworzą je zarówno specjalnie do tego celu przeznaczone urządzenia, takie jak wentylatory lub tamy regulacyjne jak i wyrobiska wykonane dla realizacji podstawowej funkcji obiektu czyli wydobywania kopaliny. Często łączna długość wyrobiska jest rzędu setek kilometrów a całkowita ich objętość to miliony metrów sześciennych. Dodatkowo wyrobiska te tworzą trójwymiarową strukturę o złożonej topologii. Struktura ta ciągle zmienia się wskutek działalności wydobywczej, likwidacji zbędnych wyrobisk oraz oddziaływania górotworu, naruszonego przez wykonanie wyrobisk. Z górotworu dopływa też ciepło oraz zwarte w nim składniki ciekłe i gazowe. Podziemne wyrobiska z reguły są połączone z atmosferą na powierzchni, która również ma wpływ na stan systemu wentylacji.

W przestrzeni wyrobisk znajduje się infrastruktura, konieczna do realizacji funkcji kopalni, która również ma wpływ na stan atmosfery kopalnianej. Obejmuje ona zarówno wspomniane urządzenia wentylacyjne jak i inne, które mogą stanowić przeszkody dla przepływu, emitować spaliny lub ciepło.

Procesy zachodzące w kopalnianych sieciach wentylacyjnych zależą od wielu czynników, wynikających zarówno ze zjawisk naturalnych jak i działalności człowieka. Przepływ powietrza przez sieć wyrobisk ma z reguły charakter turbulentny. W niektórych wyrobiskach, takich jak zroby są warunki dla laminarnego przepływu. W przepływie następuje wymiana masy pędu i energii. Zmiany warunków atmosferycznych na powierzchni, procesy związane z działalnością produkcyjną oraz awarie przyczyniają się do niestacjonarności przepływu.

Dla tak złożonego obiektu uniwersalnym byłby opis przepływu mieszanin gazów, w szczególności pobieranego z atmosfery powietrza oraz dopływających z górotworu gazów takich jak metan lub ditlenek węgla, pary wodnej i kropeł wody oraz ewentualnych cząstek stałych. Opis przepływu powinien być oparty na odpowiednio rozbudowanym, pełnym układzie równań mechaniki płynów i równań konstytutywnych. Dodatkowo należałoby uwzględnić oddziaływania między przepływem a infrastrukturą i górotworem.

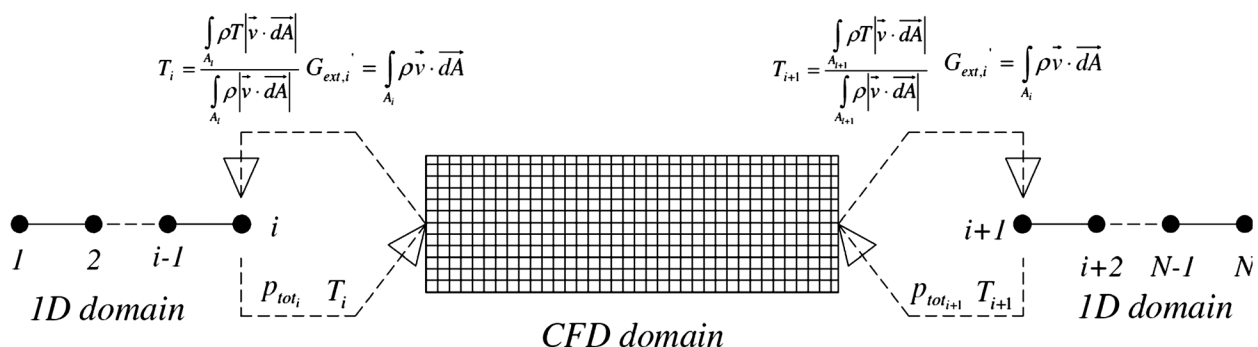
Najbliższe tak postawionym wymaganiom są równania i programy symulacyjne Numerycznej Mechaniki Płynów (angielski termin: *Computational Fluid Dynamics*, w skrócie CFD). Pełniejszy opis uwzględnić powinien wspomniane oddziaływania płynów z ciałami stałymi (angielski termin: *Fluid Structure Interaction*, w skrócie FSI).

Metody CFD są z powodzeniem stosowane do rozwiązywania lokalnych zagadnień, takich jak przepływ w ślepych wyrobiskach chodnikowym przewietrzanym wentylacją odrębną. W publikacji z 2001-go roku Hargreaves z zespołem dokonali oszacowania zapotrzebowania na sprzęt i czasu, w jakim można byłoby przeprowadzić obliczenia dla prostej sieci wentylacyjnej. W konkluzji uznano, że zapotrzebowanie to znacznie przekracza zasoby czasu i środków, jakie na ten cel można przeznaczyć. Nawet obecnie, mimo wzrostu wydajności maszyn liczących ograniczenie to pozostaje aktualne. Prowadzone są prace nad połączeniem metod CFD z oprogramowaniem do modelowania deformacji górotworu [Kelsey i in. 2003], jednak na razie zagadnienia FSI mogą mieć zastosowanie dla podobszarów sieci wentylacyjnej, na przykład rejonu ścian.

W przypadku całej sieci wentylacyjnej należałoby rozwiązać inne problemy wynikające z rozległości obszaru, takie jak dostatecznie dokładne sformułowanie warunków brzegowych i weryfikacja eksperymentalna otrzymanych rozwiązań, czyli weryfikacja modelu i walidacja symulacji.

Wobec poważnych trudności w stosowaniu pełnego opisu od lat stosowano mniej skomplikowane modele oparte na upraszczających założeniach. Niektóre zjawiska można było wystarczająco wiernie opisywać zakładając, że przepływ jest ustalony, pomijając ściśliwość powietrza lub traktując przepływ jako bliski dwu, lub nawet jednowymiarowemu.

W ten sposób powstawały symulatory kopalnianych sieci wentylacyjnych, które nadal są cennym uzupełnieniem trójwymiarowego modelowania lokalnych zjawisk przepływowych metodą objętości skończonej (Rysunek 1).



Rys. 1. Schemat idei sprzężenia opisu jednowymiarowego z modelem objętości skończonej (Coella i in. 2010)

Dla współczesnych komputerów sieci kopalniane są nadal zbyt rozległe, by stosować dla nich modele objętości skończonej (wielowymiarowe). Szczególnie dotyczy to stanów przejściowych. Dla ustalonego przepływu można prowadzić obliczenia dla ograniczonego obszaru, zastępując pozostałą część sieci przez odpowiednie warunki brzegowe. W stanach przejściowych mogą występować dynamiczne interakcje z całą siecią. W takim przypadku można zastępować oddziaływanie pominiętej sieci wentylacyjnej przez warunki brzegowe otrzymane z równoległe prowadzonej symulacji odpowiednio sprzężonym prostszym modelem, na przykład jednowymiarowego przepływu. Prace Coello z zespołem [2010] z pokrewnej dziedziny symulacji pożarów w tunelach wskazująca to, iż połączenie jedno i trójwymiarowego opisu daje zadowalająco dokładny model przy minimalizacji czasu obliczeń i zapotrzebowania na moc obliczeniową.

Podobne podejście było stosowane w innych dziedzinach, takich jak analiza bezpieczeństwa pracy reaktorów atomowych. W tej dziedzinie metody symulacyjne stosowano od ponad 30 lat. Początkowo, analogicznie jak dla zagadnień wentylacji kopalń rozwinięto programy oparte na modelach blokowych

i jednowymiarowych modelach sieciowych. Przy ich rozwijaniu korzystano z danych z licznych eksperymentów, dzięki którym zapewniono zadowalające dopasowanie uproszczonych opisów. Perspektywa trójwymiarowego modelowania, która otworzyła się pod koniec lat 80-tych dzięki wzrostowi wydajności komputerów i opracowaniu oprogramowania opartego na metodzie objętości skończonej umożliwiła analizę wielu zagadnień, które jednak mogły dotyczyć fragmentów badanych obiektów. W sytuacjach, gdy istotne jest uwzględnienie interakcji analizowanego podobszaru z resztą obiektu. Problematykę łączenia różnych modeli, podstawy metodyki sprzęgania różnych jakościowo opisów i walidacji wieloskalowych modeli były analizowane przez wielu autorów, począwszy od Zienkiewicza [1984] po współczesne prace Gibelina i Mahaffyego [2002] oraz Papukchiev-a i in. [2009]. Doświadczenia te zostaną wykorzystane w dalszych pracach nad opracowywaniem wieloskalowych opisów dla potrzeb wentylacji kopalń.

2. Przykłady gotowych, uproszczonych modeli stosowanych w programie Fluent

Podejście łączenia prostszych modeli z opisem metodą objętości skończonej było stosowane od dawna. Przykładami mogą być model porowatej przegrody i wentylatora standardowo dostępne dla użytkowników programu Fluent [ANSYS 2011].

2.1. Modelowanie oddziaływania przegrody porowatej na przepływ

Podczas badań przepływowych często spotykane jest zjawisko przepływu przez warstwę porowatą, którego efektem jest spadek ciśnienia. W badaniach numerycznych nie zawsze istnieje konieczność dokładnej symulacji zjawiska filtracji przez ośrodek porowaty, lecz konieczne jest uwzględnienie zmiany ciśnienia.

Jednym z narzędzi umożliwiających uwzględnienie wpływu warstwy porowatej bez konieczności symulacji filtracji lecz z uwzględnieniem spadku ciśnienia po przepływie przez tą warstwę jest zadanie warunku brzegowego porowatości (*porous jump*). W warunku tym przestrzenie porowe mają skończoną objętość na których zachodzi zmiana ciśnienia definiowana połączeniem prawa Darcy oraz dodatkowymi stratami inercyjnymi:

$$\Delta p = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v + C_2 \frac{1}{2} \rho v^2 \right) \Delta m$$

gdzie:

- μ – lepkość płynu,
- α – przepuszczalność modelu,
- C_2 – współczynnik skoku ciśnienia,
- v – prędkość normalna do powierzchni porowej,
- Δm – grubość warstwy.

Współczynnik skoku ciśnienia może być postrzegany jako współczynnik strat na długości, wzdłuż kierunku przepływu, co pozwala, aby spadek ciśnienia był określony jako funkcja dynamiczna. W przepływach laminarnych przez ośrodki porowate, spadek ciśnienia jest zazwyczaj proporcjonalny do prędkości i stała może mieć zerową wartość. Przy dużych prędkościach przepływu, współczynnik ten zapewnia korektę inercyjnych strat w ośrodku porowatym.

2.2. Modelowanie przepływu generowanego przez wentylator

W wielu zagadnieniach dotyczących przepływu gazów należy uwzględnić oddziaływanie wentylatora. Niejednokrotnie w modelu numerycznym wystarczy użyć uproszczonego modelu wentylatora i dzięki temu uniknąć straty mocy obliczeniowej potrzebnej do dokładnego odwzorowywania jego geometrii oraz sposobu działania. Program symulacyjny Fluent zawiera model blokowy wentylatora. Reprezentuje go płaszczyzna, która generuje skok ciśnienia zależnie od prędkości przepływu. W zależności tej można uwzględnić charakterystykę wentylatora. Związek ten może być stały, wielomianowy, odcinkowo-liniowy, jako funkcja odcinkowo wielomianowa lub funkcja zdefiniowana przez użytkownika. W przypadku wielomianu związek ten jest w postaci:

$$\Delta p = \sum_{n=1}^N f_n v^{n-1}$$

gdzie:

- Δp – skok ciśnienia,
- f_n – współczynnik wielomianowy skoku ciśnienia,
- v – chwilowa prędkość płynu do wentylatora.

W przypadku modeli trójwymiarowych w modelu wentylatora można zdefiniować prędkość radialną celem generowania zawirowań. Prędkości te mogą być określone funkcją odległości promieniowej od środka wentylatora. Relacje mogą być stałe, wielomianowe lub jako funkcja zdefiniowana przez użytkownika. W przypadku funkcji wielomianowej, stycznej i radialnej prędkości składowe mogą być określone następującym równaniem:

$$U_0 = \sum_{n=-1}^N f_n r^n; \quad -1 \leq N \leq 6$$

$$U_r = \sum_{n=-1}^N g_n r^n; \quad -1 \leq N \leq 6$$

gdzie:

- U_0 – prędkość styczna wentylatora,
- U_r – prędkość radialna wentylatora,
- f_n – współczynnik wielomianowy prędkości stycznej,
- g_n – współczynnik wielomianowy prędkości radialnej,
- r – odległość od środka wentylatora.

Model nie daje dokładnego opisu szczegółowego przepływu przez łopatki, zamiast tego określa wydatek medium przepływającego przez wentylator.

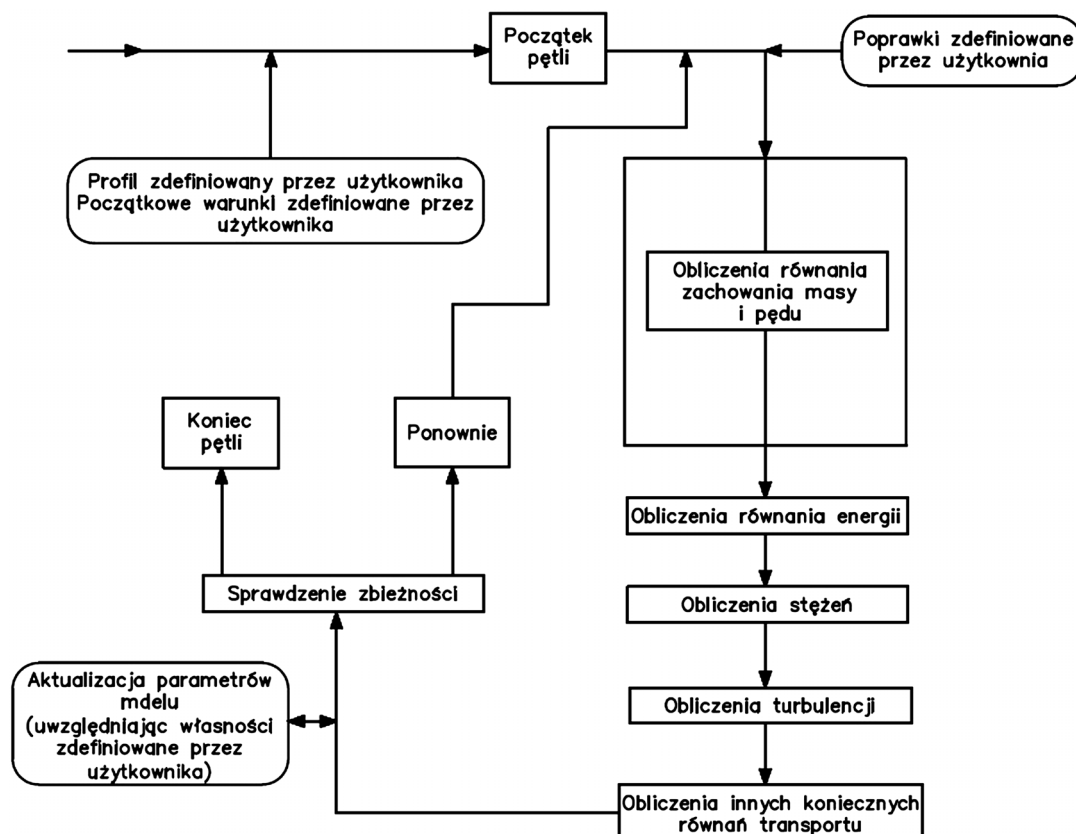
3. Sposoby dołączania zewnętrznych modeli do modeli numerycznych

W programach CFD najczęściej używa się metody objętości skończonej do przekształcenia równań różniczkowych opisujących zjawisko do postaci algebraicznej, w której mogą być rozwiązane numerycznie. Układ równań bilansów wielkości fizycznych istotnych dla rozpatrywanego zagadnienia przepływowego jest zwykle formułowany dla pewnej objętości kontrolnej. Dlatego objętość obszaru obliczeniowego jest przedstawiona jako logiczna suma wielościanów (wieloboków dla zagadnień dwuwymiarowych). Wielościany te są nazywane komórkami (ang. *cell*), zaś wieloboki stanowiące ich brzeg są nazywane ścianami (ang. *face*). Dla każdej komórki wybieramy punkt nazywanym węzłem (ang. *node*). Przyjmujemy, że stan w węźle jest reprezentatywny dla całej komórki. W ten sposób, zamiast ciągłego pola interesujących nas wielkości fizycznych (gęstości, temperatury, ciśnienia...) rozpatrujemy przeliczalny zbiór tychże wielkości określonych w węzłach. W oparciu o zasady zachowania zapisujemy bilanse masy, pędu itd. dla każdej z komórek. Stosując kolejne uproszczenia wyznaczamy dyskretne odpowiedniki postaci całkowych w/w równań.

Odpowiednio do przyjętego modelu przepływu (uwzględniający lepkość, ściśliwość, transport ciepła...), warunków brzegowych, kształtu, dyskretyzacji obszaru obliczeniowego (siatki) oraz dokładności (stopnia) schematów różnicowych, oprogramowanie tworzy nieliniowy układ równań algebraicznych, który jest rozwiązywany metodami iteracyjnymi, w których przeważają schematy niejawne. Pętla obliczeń jest przedstawiona na schemacie blokowym (Rysunek 2)

3.1. Warunki brzegowe na granicach modeli

W wieloskalowej reprezentacji model objętości skończonej i model uzupełniający wzajemnie na siebie oddziałują, poprzez warunki na brzegach łączących właściwe dla nich obszary obliczeniowe. Na przykład odcinek tunelu w otoczeniu ogniska pożaru jest reprezentowany w sposób dokładniejszy zaś rozległe odcinki przed i za ogniskiem w sposób uproszczony właściwy dla modelu uzupełniającego. Stan na przekro-



Rys. 2. Schemat blokowy cyklu iteracji z zaznaczeniem możliwości modyfikacji parametrów

jach rozgraniczających owe obszary określa warunki brzegowe dla poszczególnych metod numerycznych. W szczególności należy wyróżnić dwa zagadnienia:

- Przejsięcie z opisu trójwymiarowego na jednowymiarowy (3D -> 1D).
- Przejsięcie z opisu jednowymiarowego na trójwymiarowy (1D -> 3D).

Ad a. Pierwsze z zagadnień jest prostsze. W założeniu opisy jednowymiarowe dotyczą wielkości średnich dla przekroju poprzecznego, dlatego wystarczy dokonać odpowiednich uśrednień dla płaszczyzny granicznej obszaru trójwymiarowego by otrzymać warunki brzegowe dla prostszego opisu.

Ad b. Znacznie trudniejsze jest wygenerowanie przestrzennych warunków na brzegu na podstawie wielkości średnich. W takiej sytuacji istotne jest to by w otoczeniu granicy między modelami przepływ trójwymiarowy był w pewnym stopniu przewidywalny, na przykład poprzez znajomość kształtu profili prędkości.

3.2. Strategie otrzymywania rozwiązań numerycznych

- Najprostszym podejściem jest zamodelowanie procesu dla całego obiektu przy pomocy prostszego modelu a następnie zadanie z góry przyjętego scenariusza jako warunków brzegowych dla dokładniejszego opisu.
- Szansę na lepsze rezultaty daje faktyczne sprzężenie modeli, w którym dane są wymieniane dwukierunkowo. W tym przypadku sprzężenia można dokonać z różnym stopniem jawności. Na przykład dla rozwiązania stanu przejściowego przy pomocy programu Fluent w danym kroku czasowym można zadać warunki brzegowe otrzymane z jednowymiarowego modelu jednorazowo przed cyklem iteracji lub zmieniać te warunki w każdej iteracji, uwzględniając wyliczone w danym kroku iteracyjnym zmienne z Fluent-a.
- W ogólności można spodziewać się, że jawne schematy iteracyjne mogą prowadzić do niestabilności rozwiązań, jednak są one znacznie prostsze, dlatego warto rozpocząć analizę od próby ich zastosowania.

3.3. Techniczne aspekty łączenia oprogramowania

Rozwijane w Instytucie oprogramowanie było pisane w rozwijanym przez firmę Embarcadero (dawniej Borland) języku Delphi Pascal dla systemów MS Windows™. Do niedawna kompilator Delphi obsługiwał jedynie systemy 32-bitowe, co narzucało właściwe systemom 32-bitowym ograniczenia rozmiarów zadań we Fluencie do 2GB. Od niedawna programowanie to ma wersję dla systemów 64-bitowych, co likwiduje ograniczenia odnośnie rozmiaru pamięci a tym samym zadań obliczeniowych.

Stosowany dotychczas język i kompilator wymaga opracowania sposobu dołączania oprogramowania do Fluent'a i skoncentrowania się na systemach Windows. Prace rozwojowe przebiegają dwukierunkowo:

- określić sposób dołączania oprogramowania napisanego w Delphi,
- dostosować istniejące oprogramowanie, tak by wymieniało dane z programem nadrzędnym.

Program Fluent jest wyposażony w mechanizmy dołączania procedur napisanych przez użytkownika (ang. user defined function – skrótowo UDF). Muszą być one napisane w języku c. W intencji autorów miał to być zestaw możliwie prostych funkcji, zawierających algorytmy modyfikowania parametrów modelu, zebranych w jednym pliku. Dla najprostszyc przypadków plik ten jest interpretowany podczas symulacji. Jednak nie wszystkie rodzaje funkcji UDF mogą być interpretowane. Pełną funkcjonalność i można osiągnąć kompilując plik źródłowy. Specyficzny dla Fluent'a mechanizm prowadzi do wytworzenia dynamicznie dołączanej biblioteki o domyślnej nazwie libudf.dll. Kompilator zależy od systemu operacyjnego – dla Windows jest to Visual C++ dla Linux-a gcc. Przewidziano również dołączanie oprogramowania napisanego w języku Fortran. Wymaga to statycznego dołączania fortranowskich plików obiektowych (*.o).

Program dołączany można przekształcić w dynamicznie dołączaną bibliotekę (*.dll), która może komunikować się z programem nadrzędnym za pośrednictwem upublicznionych funkcji. Funkcje te mogą określać parametry prostszego modelu, sterować symulacją i wymianą danych między nadrzędnym (Fluent) i podrzędnym programem. Przydatne mogą też być funkcje zapisu i odczytu stanu modelu oraz graficzna prezentacja jego bieżącego stanu.

Biblioteki dll z założenia mają być ładowane do pamięci i łączone z programem nadrzędnym stosownie do potrzeb. Jednak okazało się, że Fluent nie dopuszcza dynamicznego dołączania biblioteki dll. Również sugerowane w podręczniku użytkownika dołączanie plików obj stwarza praktyczne trudności, nawet w odniesieniu do plików generowanych przez C++ Microsoftu [RoM 2006]. Dodatkowo samo łączenie oprogramowania generowanego przez produkty różnych firm (Embarcadero i Microsoft) może stwarzać problemy [Howe 2008].

Korzystając z źródeł internetowych (listy dyskusyjne) i własnych doświadczeń opracowano metodę dołączania do Fluent'a bibliotek dll napisanych w Delphi, jednak działa ona dobrze dla prostych przykładów. Prawdopodobnie osiągnięcie bezproblemowej wymiany danych między programami będzie wymagało głębszych przekształceń oprogramowania napisanego Delphi lub znalezienia skuteczniejszej metody jego dołączania.

Program Fluent może być uruchamiany w tak zwanym trybie wsadowym Dzięki temu można również stosować odwrotne podejście, w którym program Fluent jest sterowany przez model uzupełniający. Wtedy w pętli obliczeń programu uzupełniającego będzie wywoływana symulacja metodą objętości skończonej dla dopasowania bieżącego stanu na granicach modeli.

4. Przykłady programów, które mogą być dołączane do zagadnień liczonych metodą objętości skończonej

Uproszczone modele powinny w wystarczającym stopniu generować zmienne w czasie warunki na brzegach obszaru opisywanego metodą objętości skończonej. Odpowiednio do zagadnienia konieczne może być uwzględnienie transportu składników atmosfery kopalnianej, opóźnienia wynikające z bezwładności ruchu mas powietrza, czy też propagacja fal ciśnienia i prędkości. Wymienione w tym rozdziale modele mogą reprezentować nawet całą sieć wentylacyjną i efektywnie dopełnić dokładniejszy opis.

4.1. Jednowymiarowy model nieustalonego przepływu suchego gazu doskonałego w sieci wyrobisk

Spośród jednowymiarowych opisów jednym z najbardziej złożonych jest rozwijany przez autora model przeznaczony do symulacji stanów przejściowych w wielooczkowych sieciach wentylacyjnych. Powietrze kopalniane traktowane jest jako suchy gaz doskonały. Przepływ w bocznicach sieci opisują układy równań zachowania masy, pędu i energii. Analogiczne bilanse w węzłach są źródłem warunków brzegowych dla bocznic. Opis ten uwzględnia:

- bezwładność i ściśliwość mas powietrza poruszających się w sieci,
- straty ciśnienia wskutek tarcia,
- lokalne opory, m.in. tamy wentylacyjne włącznie z efektami ich otwierania i zamykania,
- wymianę ciepła z górotworem,
- oddziaływanie pola sił grawitacyjnych i wentylację naturalną,
- lokalne dopływy gazów, takich jak metan,
- ze źródeł o ustalonym wydatku,
- o zaprogramowanej wydajności, przeznaczone do symulacji wyrzutu gazów,
- propagację metanu w sieci wentylacyjnej.

Rozwiązania układu równań obrazują, zgodnie z przybliżeniem jednowymiarowego przepływu rozkłady wielkości średnich dla przekroju poprzecznego bocznicy: gęstości, temperatur, ciśnień i prędkości oraz stężeń metanu. Typowym zastosowaniem modelu są obliczenia stanów przejściowych, dla których rozkłady wymienionych wielkości były zmienne w czasie. Stan przejściowy można otrzymać na kilka sposobów:

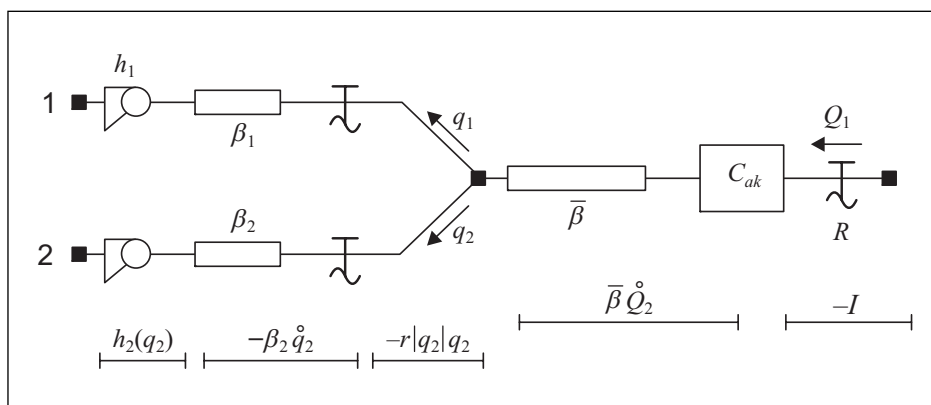
- rozpoczynając obliczenia od przepływu odległego od stanu równowagi układu,
- zmianę warunków brzegowych (np. zmienny w czasie dopływ gazów),
- zmianę parametrów modelu (np. oporu tamy podczas regulacji sieci).

Opóźnienie w dojściu do stanu równowagi lub reakcji na zmiany parametrów modelu oraz pojawianie się dodatkowych efektów jak oscylacje rozwiązań wynika z uwzględnienia w modelu przepływu ściśliwości i bezwładność ruchu powietrza.

W oparciu o opis matematyczny i model numeryczny opracowano program komputerowy, który pozwala na prowadzenie obliczeń dla sieci o rozległości i komplikacji porównywalnej z rzeczywistymi sieciami wentylacyjnymi.

4.2. Modele o stałych skupionych

Dążąc do sformułowania możliwie prostych modeli matematycznych uśredniano równania przepływu nie tylko po przekroju poprzecznym wyrobiska, ale także wzdłuż jego osi. W rezultacie opis matematyczny zostaje przekształcony do nieliniowego układu równań różniczkowych zwyczajnych [Krawczyk 2009]. Bezwładność ruchu powietrza reprezentują w nim tak zwane masy akustyczne β a ściśliwość gazów pojemności akustyczne C_{ak} .



Rys. 3. Przykładowy schemat blokowy modelu o stałych skupionych dla sieci złożonej z trzech bocznic i dwóch wentylatorów

Przykładową sieć złożoną z trzech bocznic i dwóch wentylatorów (Rysunek 3) opisuje układ trzech równań różniczkowych zwyczajnych. Za zmienne przyjęto (q_1, q_2, I) .

$$(\bar{\beta} + \beta)\dot{q}_1 + \beta\dot{q}_2 = -I - I_1(q_1) + h_1(q_1)$$

$$\bar{\beta}\dot{q}_1 + (\beta + \beta_1)\dot{q}_2 = -I - I_2(q_2) + h_2(q_2)$$

$$I = \frac{1}{C_{ak}} [q_1 + q_2 - Q_1(I)]$$

gdzie:

$\beta_1, \beta_2, q_1, q_2, r_1, r_2, h_1(q_1), h_2(q_2), I_1(q_1), I_2(q_2)$ – odpowiednio masy akustyczne, wydatki, opory, depresje wentylatorów i straty ciśnienia w kanałach dolotowych stacji wentylatorowej,

C_{aks}, β, Q_1, I – pojemność, masa akustyczna, wydatek na wlocie i strata ciśnienia dla trzeciej z bocznic, która ma reprezentować resztę sieci.

Wydatek Q_1 jest powiązany z I zależnością:

$$I = R|Q_1| \cdot Q_1$$

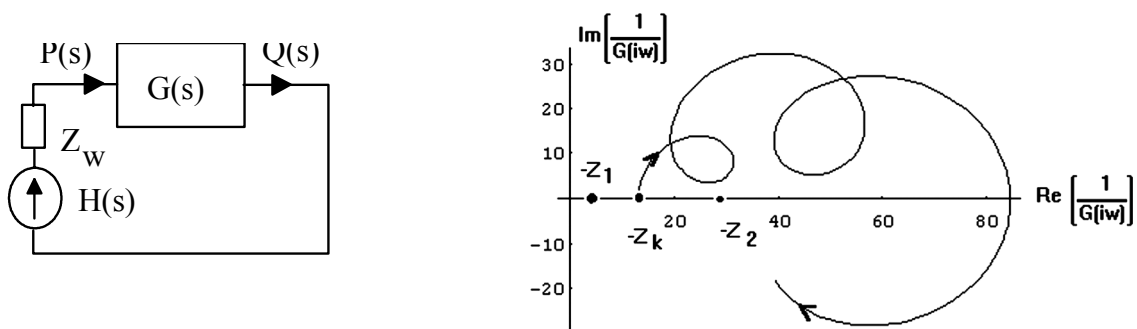
podobnie

$$I_i(q_i) = r_i|q_i|q_i, \quad i = 1, 2$$

Powyższy układ równań nieliniowych różniczkowych zwyczajnych można rozwiązywać numerycznie, na przykład metodą Rungego-Kutty o zmiennym kroku.

4.3. Zlinearyzowane modele wygenerowane w oparciu o metody częstotliwościowe

Jeśli spodziewane wahania parametrów na brzegach dokładniejszego modelu mają niewielką amplitudę, to można po linearyzacji opisu dopełniającego obszaru określić jego charakterystyki częstotliwościowe w sposób określony przez J. Tracza [1990]. Otrzymane z użyciem transformat Fouriera lub dyskretnych (np. przekształcenia Z) charakterystyki widmowe $G(s)$ wiążą ze sobą transmitancje macierzy ciśnień $P(s)$, wydatków $Q[s]$ i spiężeń wentylatorów $H(s)$ (Rysunek 4). Na podstawie tych charakterystyk można obliczyć odpowiedź obiektu na wymuszenia.



Rys. 4. Schemat blokowy i charakterystyka częstotliwościowa modelu prostego układu bocznic-wentylator

5. Uwagi końcowe

Znane z literatury doświadczenia w sprzęganiu jedno i trójwymiarowych opisów uzasadniają kontynuację prac nad zastosowaniem wieloskalowych modeli w zagadnieniach wentylacji kopalń. Jak pokazały doświadczenia z dziedziny zagadnień bezpieczeństwa pracy reaktorów jądrowych [Bertolotto 2011] i pożarów w tunelach [Colella i in. 2010], umiejętne połączenie opisów może dać rezultaty znacznie lepsze niż otrzymywane dla każdej z metod z osobna. Zespoły badawcze Instytutu, w szczególności Pracowni Wentylacji Kopalń

mają wieloletnie doświadczenie w rozwijaniu własnego oprogramowania z zastosowaniem uproszczonych, jedno i dwuwymiarowych opisów. Kody te mogą być sprzęgnięte z oprogramowaniem wykorzystującym metodę objętości skończonej, dając nową jakość w dziedzinie modelowania stanów przejściowych.

Praca została wykonana w roku 2012 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

6. Literatura

1. ANSYS inc. [2011]: *Fluent User Guide*.
2. Bertolotto D. [2011]: *Coupling a System Code with Computational Fluid Dynamics for the Simulation of Complex Coolant Reactivity Effects*, praca doktorska, École Polytechnique Fédérale De Lausanne.
3. Colella F., Rein G., Borchiellini R., Torero J., L.: (2010): *A Novel Multiscale Methodology for Simulating Tunnel Ventilation Flows During Fires*, Fire Technology DOI: 10.1007/s10694-010-0144-2
4. Gibeling H., Mahaffy J. H. [2002]: *Benchmarking simulations with CFD to 1-D coupling*, Joint IAEA/OECD Technical Meeting on Use of CFD Codes for Safety Analysis of Reactor Systems, Including Containment, Nov. 2002.
5. Hargreaves D.M., Lowndes I.S. [2001]: *An assessment of the future use of computational Fluid dynamics for network modelling*, Proceedings of the 8-Th International Mine Ventilation Congress, Kraków, p. 547-553
6. Howe H. [2008]: *How to call functions from a DLL generated by Borland C++ Builder from VS2005*, Visual Studio Developer Center Visual C++ Forums
7. Kelsey A., Lea C., Lowndes I., Whittles D., Ren T. X. [2003]: *CFD modeling of methane movement in mines*. 30-th International Conference of Safety in Mines Research Institutes, South African Institute of Mining and metallurgy, 2003.
8. Krawczyk J. (2007): *Jedno i wielowymiarowe modele niestacjonarnych przepływów powietrza i gazów w wyrobiskach kopalnianych*. Przykłady zastosowań. Arch. Min. Sci., Monograph Numer 2. p. 192.
9. Krawczyk J. (2009): *On Transients in Mine Ventilation Systems Caused by Fans*, Arch. Min. Sci., No 7, pp. 148.
10. Krawczyk J., Kruczkowski J., Janus J. (2011): *Porównanie symulacji numerycznych z wynikami pomiarów rozkładów pól prędkości w przekrojach chodników kopalnianych* Prace Instytutu Mechaniki Górniczej, Kraków 2011, vol. 14, Nr 1-4.
11. A. Papukchiev, G. Lerchl, C. Waata, and T. Frank [2009] *Extension of the simulation capabilities of the 1D system code ATHLET by coupling with the 3D CFD software package ANSYS CFX*, Proceedings NURETH-13, Sept. 2009.
12. Smith B.L. i inni [2008]: *Assessment of CFD For Nuclear Reactor Safety Problems* Raport OECD Nuclear Safety NEA/CSNI/R(2007)13
13. RoM [2006] *Integration of a Custom C++ Model into FLUENT*, odpowiedź na pytanie na forum: <http://www.cfd-online.com/Forums/fluent/>
14. Tadros A. Uber E. [1996]: *Using Borland's Delphi and C++ A Technical paper for developer. A Technical paper for developers*. <http://edn.embarcadero.com/>
15. Tracz J. (1990): *Zastosowanie metod częstotliwościowych do badania własności kopalnianej sieci wentylacyjnej*. Praca doktorska, IMG-PAN.
16. Zienkiewicz O. C.: *Coupled problems and their numerical solution*. In Lewis R. W., Bettes P., Hinton E. (eds.): *Numerical Methods in Coupled Systems*, John Wiley & Sons, 1984
17. ZorroTheFox [2009]: *How to call functions from a DLL generated by Borland C++ Builder from VS2005*. Visual Studio Developer Center Visual C++ Forums

Methodology of development of multi-scale numerical models of the face region – selected aspects

Abstract

The finite volume method within the framework of the CFD is widely applied in modelling of flow phenomena in mine ventilation. However, ventilation networks in underground mines are typically expanded and complicated and the computation power of currently available computers proves insufficient to simulate the behaviour of entire objects, particularly when handling time-variant phenomena. Simulations, therefore, involve selected fragments of ventilation network only. In the case of stationary processes, the omitted areas can be replaced by the boundary conditions. For transients, however, dynamic properties of omitted areas may strongly impact on the involved processes. To overcome this difficulty, the model should incorporate a simpler description of dynamics of the omitted area and thus multi-scale models can be created to connect the 1D and 3D descriptions, yielding the optimal representation of the object to provide a detailed description of critical areas and simplified one for less significant regions. Similar restrictions apply to other analogous fields, such as tunnel ventilation or flows in installations of nuclear reactors, where multi-scale models have been recommended and effectively used for years. When combining qualitatively different descriptions, utmost care should be taken to formulate the methods of data exchange to enable their practical implementation in dedicated software. The work provides the survey of literature and of conceptual works targeted at implementation and effective utilisation of methodology of numerical model integration.

Keywords: numerical fluid mechanics, CFD, multi-scale modelling, mine ventilation, transients