

# Numeryczne wyznaczenie rozkładów ciśnień i prędkości powietrza w zwałowisku górniczym i jego otoczeniu dla założonej porowatości

PRZEMYSŁAW SKOTNICZNY

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

## Streszczenie

W artykule omówiono przypadek niestacjonarnego przepływu powietrza wokół zwałowiska odpadów pogórnich w aspekcie napowietrzania porowatego materiału zwałowiska. Prezentowany przypadek obejmuje analizę niestacjonarnych rozkładów ciśnień statycznych na powierzchni zwałowiska, analizę śladu turbulentnego za zwałowiskiem jak również rozkład prędkości powietrza wewnątrz zwałowiska. W zastosowanym w obliczeniach profilu prędkości uwzględniono atmosferyczną warstwę przyścienną.

**Słowa kluczowe:** zwałowisko odpadów pogórnich, materiał porowaty, analiza numeryczna

## Wstęp

Omawiany we wcześniejszym artykule (Skotniczny, 2005) przykład ograniczał się do modelowania stacjonarnego przypadku przepływu powietrza wokół zwałowiska odpadów pogórnich „Stożki – Rymer”. Analiza stacjonarna zaprezentowanej w wyżej wymienionym artykule geometrii może powodować przekłamanie w rzeczywistym obrazie rozkładów wielkości omawianych. Aby uzyskać dokładniejsze rozwiązanie zagadnienia należy sięgnąć do analizy niestacjonarnej obejmującej wyznaczenie rozkładu parametrów przepływającego powietrza ( $p$ ,  $U$ ) w funkcji czasu. Kolejnym zagadnieniem przybliżającym proces rzeczywistego przepływu powietrza jest wprowadzenie dodatkowego parametru charakteryzującego materiał zwałowiska, jakim jest porowatość. W dalszym ciągu zajęto się przypadkiem przepływu niestacjonarnego w aspekcie penetracji zwałowiska zbudowanego z materiału porowatego. Prezentowany przypadek obejmuje analizę niestacjonarnej symulacji rozkładów ciśnień statycznych na powierzchni zwałowiska, śladu turbulentnego za zwałowiskiem jak również rozkładów prędkości wewnątrz zwałowiska.

## Opis zagadnienia

Przedstawione w niniejszym artykule wyniki obliczeń opisują dwa przypadki. Pierwszy z nich obejmuje wyznaczenie parametrów powietrza przepływającego wokół zwałowiska, przy czym zwałowisko jest traktowane jako obiekt nieprzepuszczalny ( $p = \infty$ ,  $\varepsilon = 0$ ) z kolei drugi przypadek porusza kwestię wyznaczenia parametrów przepływającego powietrza wewnątrz zwałowiska przy założonym współczynniku przepuszczalności  $p$  oraz porowatości  $\varepsilon$ .

## Modelowanie turbulencji w przepływach środowiskowych

W omawianym we wstępie przypadku do rozwiązania turbulentnych zagadnień przepływowych użyto modelu opierającego się na uśrednionych w czasie równaniach Naviera-Stokesa (RANS) domkniętego modyfikacjami modelu  $k-\varepsilon$  jako członu opisującego transport turbulentnych naprężeń Reynoldsa (Fluent

Inc User Guide, 2004). Zastosowanie to było podyktowane przede wszystkim powszechnością stosowania w aplikacjach inżynierskich. Jednakże z uwagi na specyfikę omawianego przypadku odpowiedniejszym wydaje się być model sugerowany przez Bartzisa (Bartzis i in., 2004) który opiera się na niestacjonarnym rozwiązaniu uśrednionych w czasie równań N-S (uRANS). Z kolei według Badra (Badr i in., 2004) najlepsze rezultaty przynosi zastosowanie modelu,  $k-\omega$ , z modyfikacją opisującą transport naprężeń ścinających (SST). Model ten wyrażony jest następującymi równaniami opisującymi odpowiednio transport energii kinetycznej turbulencji  $k$  (1) oraz szybkości dyssypacji  $\omega$  (2)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + D_\omega \quad (2)$$

gdzie  $\tilde{G}_k$  oznacza produkcję energii kinetycznej turbulencji w funkcji gradientu średniej prędkości, wyrażaną równaniem

$$\tilde{G}_k = \min(G_k, 10 \rho \beta^* k \omega), \quad (3)$$

$G_\omega$  jest członem określającym produkcją  $\omega$  wyrażoną jako,

$$\tilde{G}_\omega = \frac{\alpha}{v_t} G_k \quad (4)$$

gdzie  $\alpha$  jest współczynnikiem wyrażonym zależnością:

$$\alpha = \frac{\alpha_\infty}{\alpha^*} \left( \frac{\alpha_0 + \text{Re}_t / R_\omega}{1 + \text{Re}_t / R_\omega} \right) \quad (5)$$

określonym z odpowiednimi stałymi modelu,

$\Gamma_k$  oraz  $\Gamma_\omega$  oznaczają odpowiednio efektywną dyfuzyjność  $k$  i  $\omega$ , określone zależnościami

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \quad (6)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}, \quad (7)$$

w których  $\sigma_k$  i  $\sigma_\omega$  określają odpowiednio turbulentną liczbę Prandtla dla  $k$  i  $\omega$ ,

$Y_k$  i  $Y_\omega$  oznaczają dyssypację  $k$  i  $\omega$ ,

$$Y_k = \rho \beta^* k \omega, \quad (8)$$

$$Y_\omega = \rho \beta^* \omega^2, \quad (9)$$

a z kolei człon  $D_\omega$  oznacza dyfuzję wzajemną (cross-diffusion) określona jako

$$D_\omega = 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}. \quad (10)$$

## Założenia przyjęte w obliczeniach

Obliczenia przeprowadzono w programie FLUENT przy następujących założeniach:

- Turbulentny rozkład prędkości  $U_x$  w przestrzeni wlotowej opisany funkcją wykładniczą zgodnie z „prawem jednej siódmej” (Elsner, 1987) w postaci

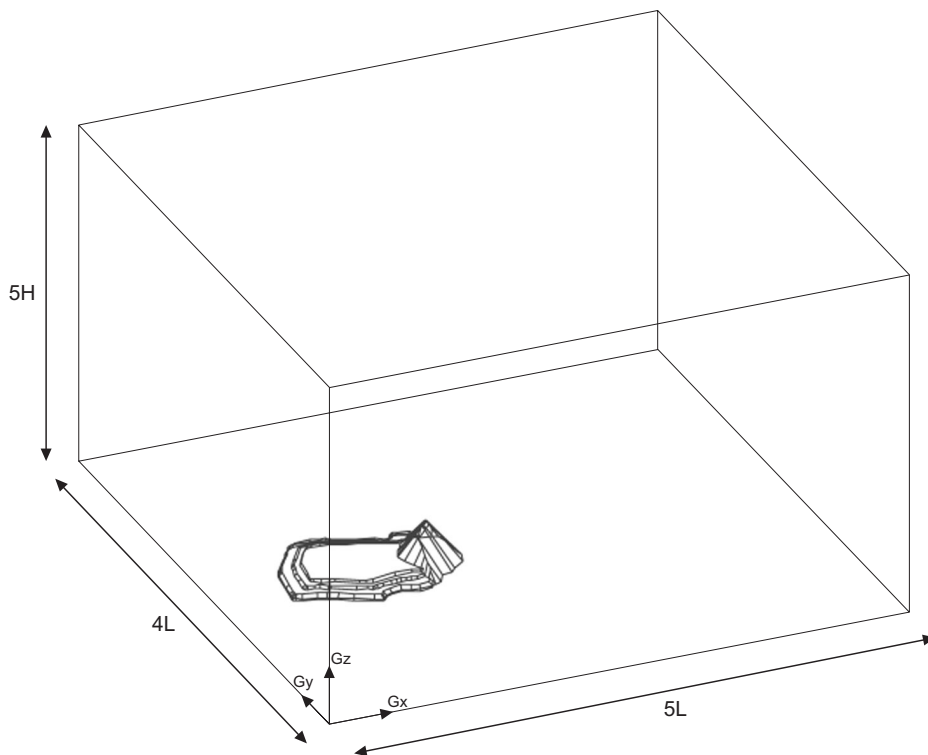
$$U_x = U_{x,m} \left( \frac{y}{h} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (11)$$

gdzie  $U_{x,m}$  prędkość maksymalna,  $h$  wysokość obszaru obliczeniowego,

- wysokość wewnętrznego obszaru turbulentnej warstwy przyściennej  $h_{in} = 1$  m,
  - długość, szerokość wysokość obszaru obliczeniowego odpowiednio:  
 $5L \times 4L \times 5H$ , gdzie wielkość  $L$  oznacza długość zwałowiska,
  - w celu uniezależnienia rozwiązania od stosowanej siatki obliczeniowej rozmiary zastosowanej siatki przy wierzchołku zwałowiska wynoszą  
 $0.1H \times 0.05H$ , gdzie  $H$  – wysokość stożka zwałowiska (Bartzis i in., 2004),
- oraz, w przypadku obliczeń przeprowadzanych dla porowatego materiału zwałowiska
- izotropowa porowatość materiału zwałowiska (Litwiniszyn i in., 1963).

## Opis geometrii

Do obliczeń przyjęto ten sam trójwymiarowy model zwałowiska, który wykorzystywany był w przypadku wykonywania obliczeń stacjonarnych (Skotniczny, 2005). W stosunku do poprzedniego przypadku zmieniono wymiary obszaru obliczeniowego, a w dalszej kolejności omawianą geometrię przygotowano do obliczeń uwzględniających przepływ powietrza przez porowate medium. Na rys. 1 zamieszczono zmodyfikowany na podstawie wytycznych zawartych w „Best Practise Guidelines” obszar pomiarowy wraz z naniesionymi głównymi wymiarami. Ponieważ przytaczane w zaleceniach rozmiary obszaru obliczeniowego dotyczyły przypadku obliczeń zasięgu propagacji zanieczyszczeń pyłowych oraz gazowych, w omawianym przypadku wyznaczania parametrów powietrza w otoczeniu zwałowiska, oraz w jego środku (przypadek  $p \neq 0$ ), zdecydowano się na zmniejszenie domeny bez straty informacji dotyczących przepływu powietrza wokół zwałowiska, a z korzyścią dla całkowitego czasu obliczeń.



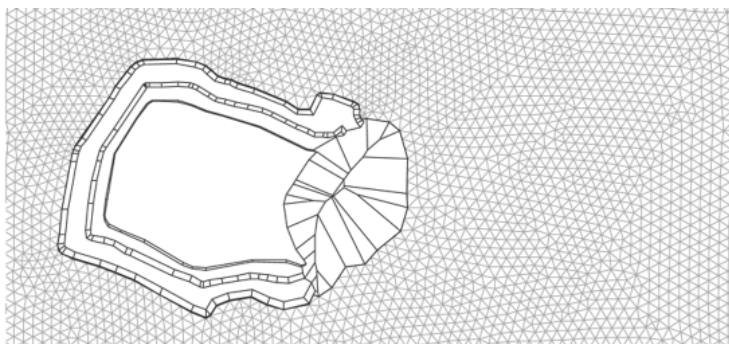
Rys. 1. Obszar obliczeniowy wraz z głównymi wymiarami

W kolejnym etapie przystąpiono do dyskretyzacji obszaru obliczeniowego (rys. 2 i 3). Z uwagi na to, że model zwałowiska mimo zastosowanych uproszczeń zawierał istotne dla omawianego problemu

elementy geometryczne celem lepszego odwzorowania przestrzennego zdecydowano się na zastosowanie siatki niestrukturalnej typu *tri-pave*. Elementy w środku zwałowiska, na jego zboczach oraz w najbliższym sąsiedztwie zostały utworzone z podziałką 0,2, z kolei elementy leżące na granicy obszaru z podziałką 10.



Rys. 2. Dyskretyzacja obszaru zwałowiska

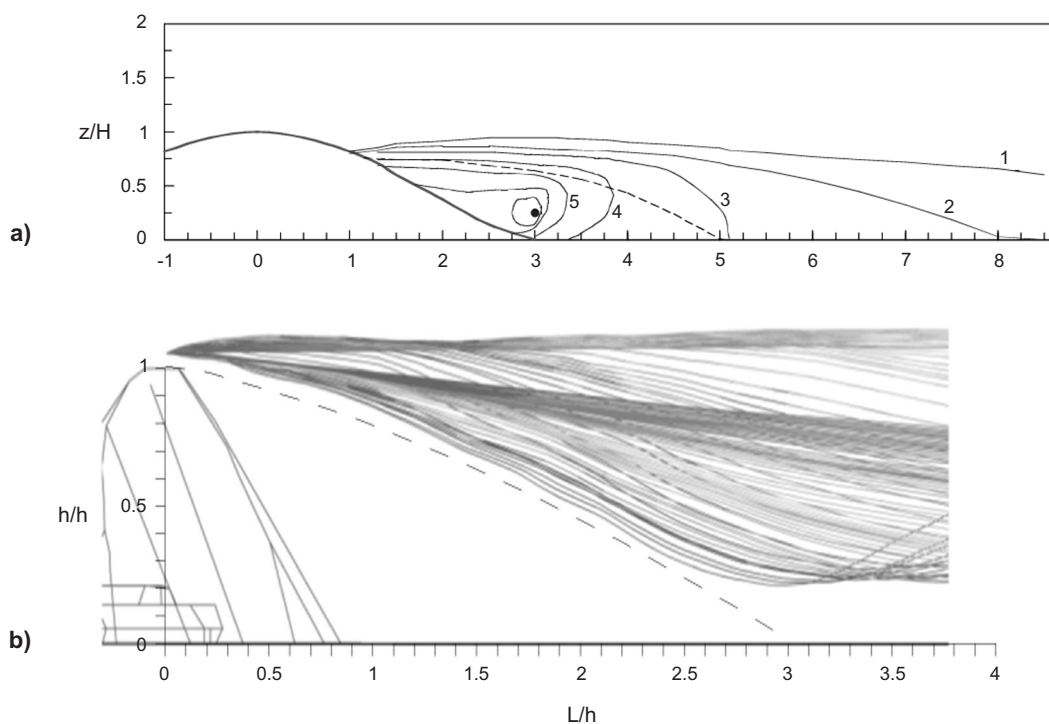


Rys. 3. Fragment siatki obliczeniowej obszaru zewnętrznego

## Obliczenia wstępne

Pierwszym etapem przed przystąpieniem do obliczeń właściwych jest konieczność wykonania kalibracji stosowanego modelu. Z uwagi na brak analogicznych danych literaturowych a tym bardziej danych eksperymentalnych można było skorzystać jedynie z przybliżonego porównania rozwiązania pola przepływu za zwałowiskiem (stożek) omawianej geometrii z rozwiązaniem przypadku zbliżonej geometrii zawartego w „Best Practise Guidelines” opisującego problem rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń pyłowych i gazowych za osiowosymetrycznym, trójwymiarowym wzgórzem. Porównanie ilustruje rys. 4.

Obydwa przypadki dotyczą przepływu środowiskowego, czyli takiego, w którym powietrze przepływa wokół przeszkód terenowych. Porównanie dotyczyło wielkości i zasięgu strefy recyrkulacji znajdującej się



Rys. 4. Porównanie przypadku testowego a) z omawianym b)

od strony zawietrznej omawianych przeszkód (linia przerywana na rys. 4a i b). W pierwszym z przypadków zamieszczonym na rys. 4a strefa recyrkulacji sięga  $5H$ , natomiast w przypadku zamieszczonym na rys. 4b –  $3H$ .

Różnica w zasięgu recyrkulacji wynika z różnicy w smukłościach omawianych wzniesień. Smukłość definiowana jako

$$s = \frac{2H}{L} \quad (12)$$

w przypadku geometrii wzorcowej wynosi  $s = 0.334$ , z kolei w przypadku geometrii testowanej  $s = 1.25$ , czyli stożek zwałowiska jest bardziej smukły niż wzgórze.

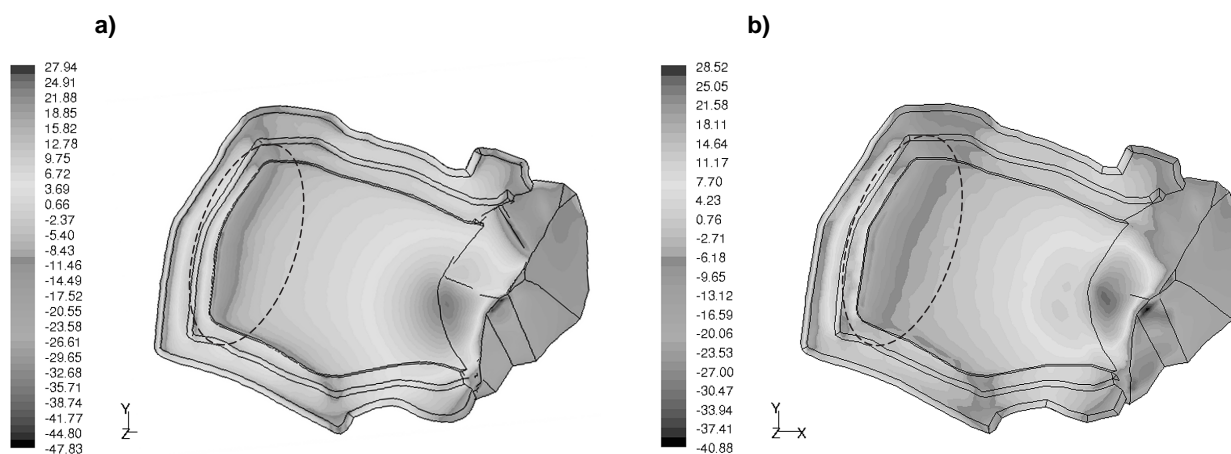
Z tego wynikają dwa fakty.

- Zjawisko oderwania strugi przepływającego powietrza w przypadku geometrii o większej smukłości nastąpi wcześniej niż w przypadku geometrii o mniejszej smukłości,
- zasięg strefy recyrkulacji za geometrią o większej smukłości będzie mniejszy niż w przypadku geometrii o mniejszej smukłości.

Porównując rys. 4a z b można zauważyć potwierdzenie powyższych spostrzeżeń.

Kolejnym krokiem było porównanie wyników otrzymanych z obliczeń stacjonarnych wykorzystujących model  $k-\varepsilon$  z wynikami niestacjonarnymi z modelem  $k-\omega$ -SST.

Jak wynika z analizy izobar  $p_s$  zamieszczonych na rys. 5 zastosowanie w obliczeniach modelu  $k-\omega$ -SST (rys. 5b) spowodowało rozszerzenie stref dużego gradientu ciśnienia w stosunku do modelu  $k-\varepsilon$ , co w aspekcie zastosowania w obliczeniach materiału porowatego może mieć wpływ na efektywność napowietrzania zwałowiska. Na uwagę zasługuje również fakt nieznaczniejszego zwiększenia się wartości minimalnych oraz maksymalnych ciśnień dla rozwiązania niestacjonarnego.

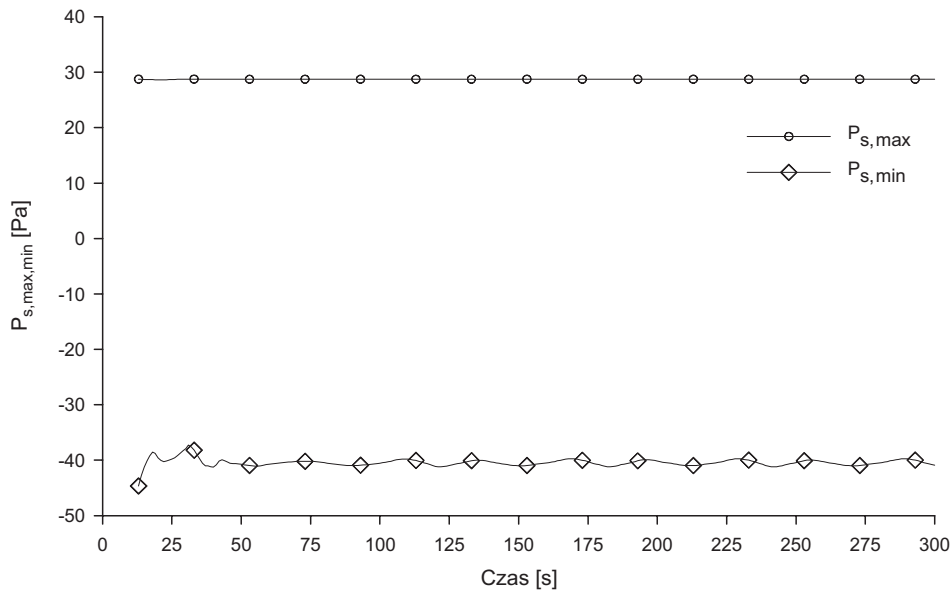


Rys. 5. Rozkład ciśnień statycznych na powierzchni zwałowiska a) RANS- $k-\varepsilon$ , b) uRANS- $k-\omega$ -SST

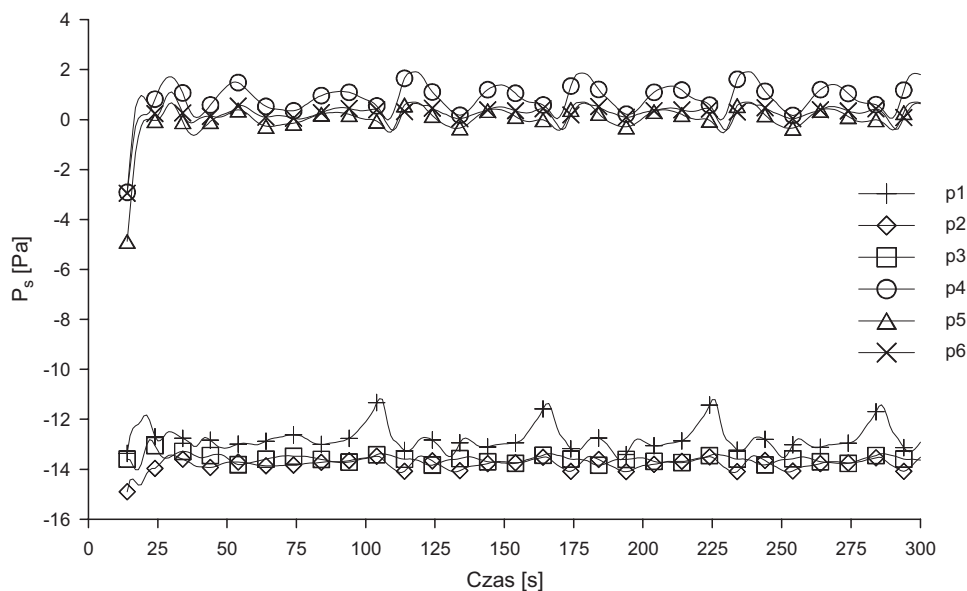
## Wyniki symulacji niestacjonarnej

W rozwiązaniu traktującym zwałowisko jako obiekt nieporowaty najważniejszym zagadnieniem było wyznaczenie fluktuacji ciśnień statycznych na powierzchni zwałowiska. Potencjalna możliwość występowania fluktuacji, ich wielkość i miejsce występowania może mieć wpływ na mechanizm napowietrzania zwałowiska a przez to wzrost zagrożenia pożarowego. W analizie zagadnienia istotnym czynnikiem była wartość ciśnień. Na rys. 6 zamieszczono wykres zmian ciśnienia statycznego  $p_{s,\min}$ ,  $p_{s,\max}$  w funkcji czasu zarejestrowanego na całej powierzchni zwałowiska.

Po wstępnym okresie ustalenia się przepływu spowodowanego warunkami początkowymi w przebiegu ciśnienia  $p_{s,\max}$  nie zauważono zmian. Zarejestrowane zmiany w przebiegu  $p_{s,\min}$  pochodzą z niestacjonarności przepływu od strony nawietrznej zwałowiska. Podobne zjawisko jest widoczne w przebiegu zmienności ciśnień statycznych  $p_c$  w turbulentnym śladzie za zwałowiskiem, które zamieszczono na rys. 7. Poszczególne punkty p1-p6 zostały umieszczone w linii za stożkiem na wysokości  $1/2H$ .



Rys. 6. wykresy rozkładu ciśnień całkowitych na ścianach zwałowiska

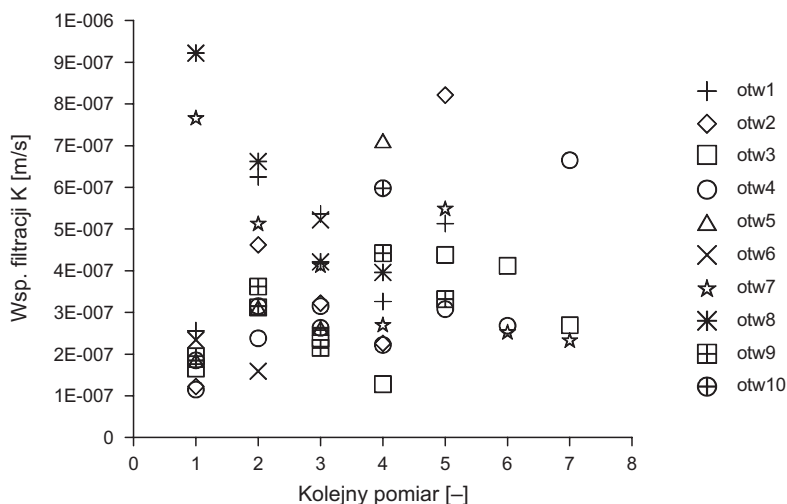


Rys. 7. Wykresy rozkładu ciśnień statycznych w turbulentnym śladzie za stożkiem

Niestacjonarny i okresowy charakter przepływu szczególnie dobrze jest widoczny w przebiegu zmian ciśnienia statycznego w punkcie p1, leżącym w odległości 5 m od zbrocza stożka.

## Wyniki symulacji niestacjonarnej. Przypadek z porowatością

Wyznaczenie wielkości charakteryzujących przepływ powietrza w materiale porowatym obciążeniu do podania dwóch wielkości, które stanowią o przepływie. Są to porowatość materiału  $\varepsilon$ , oraz współczynnik przepuszczalności  $p$ . Obie te wartości należy wyznaczyć eksperymentalnie. Na podstawie testów laboratoryjnych, zgodnych z normą PN-EN 1097-3/2000 która opisuje procedurę pomiaru porowatości  $\varepsilon$  i oraz metody zmiennego gradientu pomiaru współczynnika filtracji  $K$  stwierdzono, że materiał rdzeniowy pobrany z 10 otworów badawczych charakteryzuje się średnią porowatością  $\varepsilon = 0.6$  a zmierzona wartość współczynnika filtracji  $K$  przedstawia rys. 8.



Rys. 8. Rozkład współczynnika filtracji dla otworów badawczych

Współczynnik filtracji związany jest ze współczynnikiem przepuszczalności zależnością

$$K = \frac{p_{prz} \rho g}{\mu} \tag{13}$$

na podstawie której określono wartość współczynnika  $p_{prz} = 1.742 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ . Podana wartość współczynnika przepuszczalności jest wartością dość małą, dla porównania współczynnik przepuszczalności skały granitowej jest rzędu  $10^{-16} \text{ m}^2$ .

Fluent rozwiązuje zagadnienie przepływu płynu przez porowate medium poprzez dodanie dodatkowego członu źródłowego (14) do równania ruchu.

$$S_i = - \left( \sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho v_j^2 \right) \tag{14}$$

dla rozpatrywanego przypadku medium homogenicznego, wyrażenie (14) przybiera postać

$$S_i = - \left( \frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho v_i^2 \right) \tag{15}$$

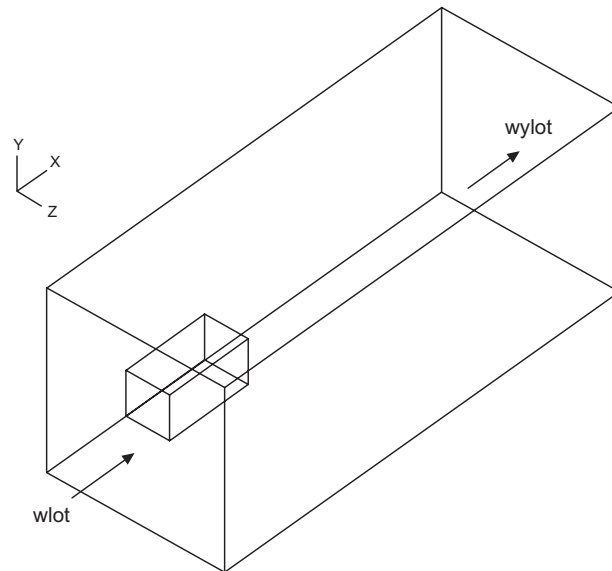
Pierwszy człon po prawej stronie równania (15) opisuje liniową stratę ciśnienia na długości (równanie Darcy) a drugi jest odpowiedzialny za zjawiska inercyjne w przepływie przez porowate medium.

Przepływ przez medium o współczynniku przepuszczalności rzędu  $10^{-13}$  może stanowić pewnego rodzaju „wyzwanie” dla Fluent z racji dużego zróżnicowania wartości wektora prędkości. Stąd też w pierwszym przybliżeniu zdecydowano się na rozwiązanie zagadnienia przepływowego dla prostej geometrii zamieszczonej na rys. 9 z następującymi warunkami brzegowymi.

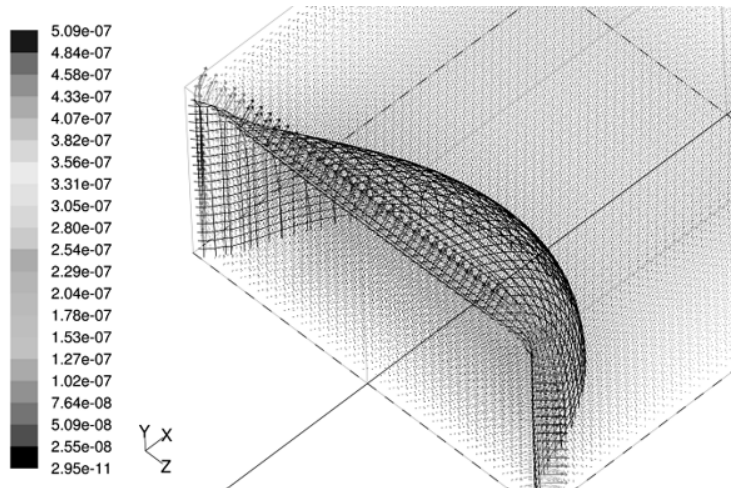
- profil prędkości na wlocie –  $U_{sr} = 1 \text{ m/s}$ , profil opisany równaniem wykładniczym zgodnie z „prawem 1/7”,
- porowatość materiału  $\varepsilon = 0.6$ ,
- współczynnik przepuszczalności  $p = 1.742 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ ,
- analiza niestacjonarna.

W wyniku przeprowadzenia obliczeń uzyskano rozkład wektora prędkości wewnątrz sześciangu, który został zaprezentowany na rys. 10.

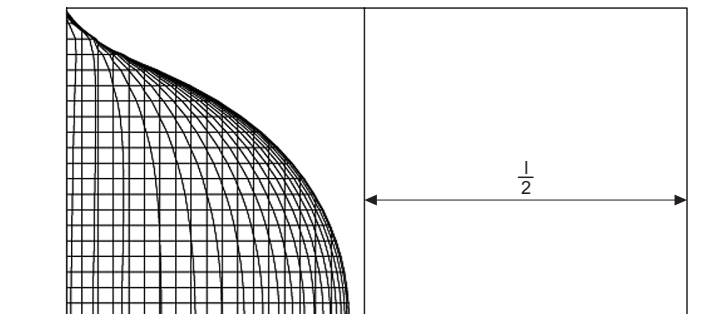
Jak wynika z analizy wartości prędkości wewnątrz omawianego sześciangu, prędkości osiągnięte przez powietrze nie przekraczają rzędu  $10^{-7} \text{ m/s}$ . Na rys. 10 zaznaczono ponadto przestrzenną izobarę wartości ciśnienia całkowitego  $p_t = 0 \text{ Pa}$ . Z jej kształtu można wywnioskować zasięg strefy nadciśnienia wewnątrz materiału porowatego (rys. 11).



Rys. 9. geometria testowego przypadku przepływu powietrza w materiale o  $p = 1.742 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$



Rys. 10. rozkład prędkości oraz ciśnienia całkowitego wewnątrz porowatego sześcianu



Rys. 11. Izobara  $p_c = 0 \text{ Pa}$ . Widok z boku

Przy zmianie wartości średniej profilu prędkości na wlocie do  $U_{sr} = 7.03 \text{ m/s}$  nastąpiły poważne problemy ze zbieżnością. W wyniku obliczeń uzyskano pole ciśnień o niespotykane wysokie wartości, rzędu  $10^4 \text{ Pa}$ . Efekt ten należy tłumaczyć dużym wpływem zjawisk inercyjnych w przepływie przez porowate medium, a więc człon inercyjny w równaniu (15) będzie posiadał niezerowy współczynnik  $C_2$ .



Ta informacja w aspekcie zmierzonej wartości współczynnika przepuszczalności materiału zwałowiska jest istotna. Jeżeli wartość wektorów prędkości wewnątrz materiału o omawianych parametrach wyznaczana dla testowej geometrii nie przekracza rzędu  $10^{-7}$  to dla geometrii zwałowiska powinna być jeszcze mniejsza. Ponadto istnienie niezerowej wartości współczynnika  $C_2$  w równaniu (15) może wykluczyć poprawność wyników przeprowadzonych dla całego zwałowiska bez znajomości jej wielkości.

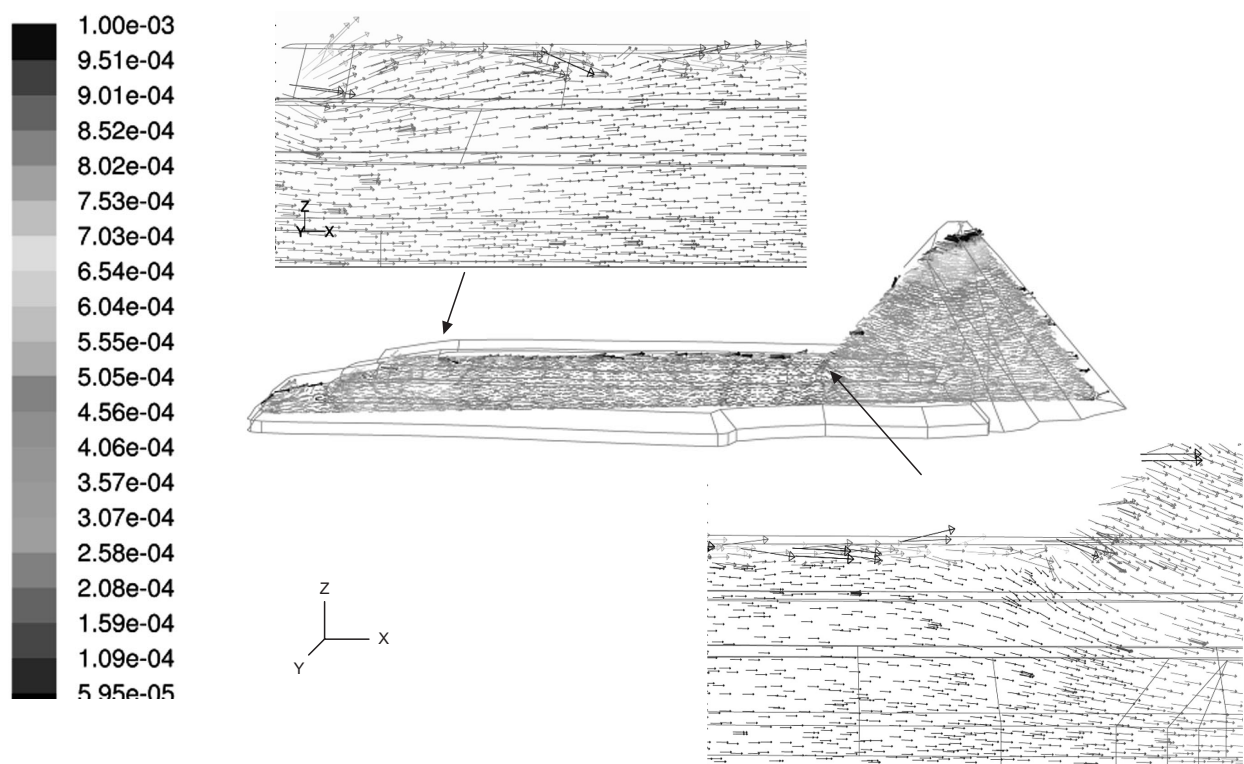
Powyższe spostrzeżenia praktycznie eliminują słuszność hipotezy o napowietrzaniu zwałowiska dzięki penetracji materiału powietrzem atmosferycznym przepływającym wokół niego. Wniosek ten jest słuszny pod warunkiem poprawnego oszacowania wielkości związanych z porowatością materiału. Istnieje prawdopodobieństwo, że badania laboratoryjne nie oddają w pełni charakteru porowatości zwałowanego materiału. Z tego względu, poniżej przedstawiono przypadek przepływu przez porowaty materiał zwałowiska charakteryzujący się następującymi parametrami

$$\varepsilon = 0.6, \quad p_{prz} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ 1/m}^2, \quad U_0 = 1.2 \text{ m/s}$$

Przytoczona wartość współczynnika przepuszczalności jest najmniejszą wartością rozpatrywaną dla przypadku testowego, dla której zjawiska inercyjne nie mają wpływu na zbieżność rozwiązania.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń dla geometrii zwałowiska z powyższymi wartościami porowatości i współczynnika przepuszczalności uzyskano następujące wyniki.

Na rys. 12 przedstawiono wartość wektorów prędkości w płaszczyźnie pionowej umieszczonej w osi zwałowiska.



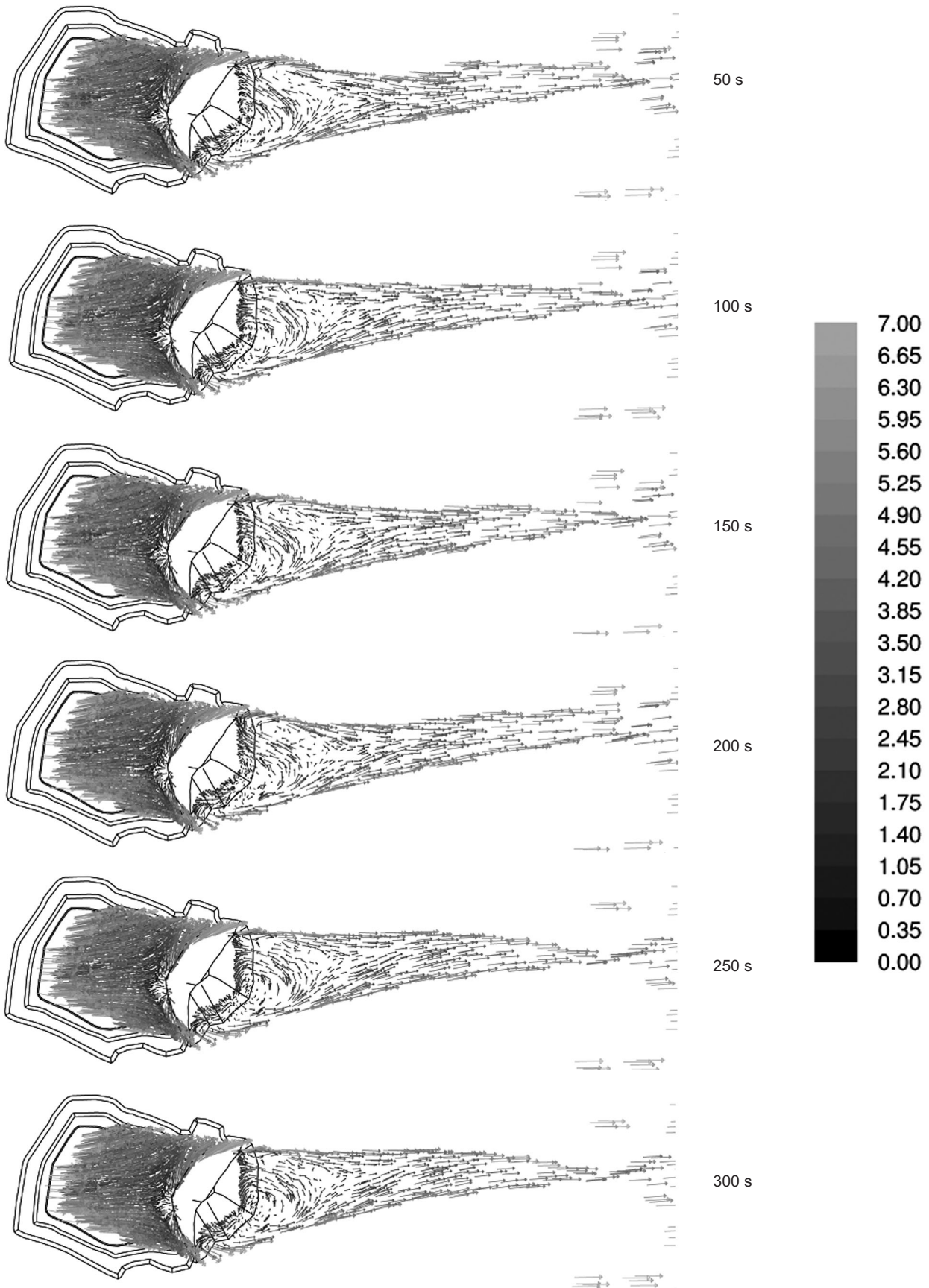
Rys. 12. Penetracja zwałowiska przez przepływające wokół niego powietrze

Wartość prędkości w omawianym obszarze nie przekracza  $10^4$  m/s. Na rys. 12 zamieszczono również powiększone fragmenty interesujących miejsc.

- Od strony nawietrznej, przy wierzchołku zwałowiska.  
Efekt zmiany kierunku strugi powietrza penetrującej zwałowisko może być związany z fluktuacjami ciśnień statycznych poruszanych pokazanych na rys. 6.
- Podnóże stożka od strony nawietrznej.  
W tym miejscu zwraca uwagę zwiększona intensywność penetracji zwałowiska, która może mieć związek z występowaniem w tym obszarze maksimum wartości ciśnienia statycznego (rys. 5b)

## Rozkład prędkości w śladzie za stożkiem

Na rys. 13 zamieszczono obraz śladu turbulentnego za stożkiem dla wybranych chwil czasowych.



Rys. 13. Ślad turbulentny za zwałowiskiem. Wybrane kroki czasowe

Kształt i zasięg śladu turbulentnego za stożkiem dla zadanego profilu prędkości i w omawianej geometrii wydaje się być stabilny. Analizując kształt śladu w chwili czasowej 50 s oraz 250 s można znaleźć pewne podobieństwa. Mogą one wynikać z okresowego charakteru przepływu powietrza wokół zwałowiska, spowodowanego niewielkim wahaniem ciśnień statycznych w strefie recyrkulacji (rys. 7).

## Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono wyniki analizy niestacjonarnego przypadku przepływu powietrza wokół zwałowiska odpadów pogórnictw. Opisywane przypadki obejmowały przepły wokół zwałowiska traktowanego jako ośrodek nieprzepuszczalny, oraz z porowatością i przepuszczalnością różną od zera.

- Zastosowanie modelu  $k-\omega$ -SST spowodowało rozszerzyło strefę gradientów ciśnień statycznych na powierzchni zwałowiska, co w aspekcie napowietrzania materiału porowatego ma istotne znaczenie.
- Przytoczone w artykule wartości porowatości  $\varepsilon$ , oraz współczynnika przepuszczalności  $p_{prz}$  pochodzą z testów laboratoryjnych, które mogą niepełnie odzwierciedlać warunki rzeczywiste. Istnieje konieczność przeprowadzenia pomiarów wyżej wymienionych wielkości w warunkach rzeczywistych, na zwałowisku.
- Występowanie efektów inercyjnych w przepływie powietrza przez porowaty materiał zwałowiska powoduje duże błędy w otrzymywanych rozkładach prędkości i ciśnień wewnątrz zwałowiska. Zachodzi konieczność odpowiedniego uwzględnienia w modelu współczynnika  $C_2$  (15).
- Istotnym czynnikiem jest wprowadzanie do obliczeń modelu transportu energii. W chwili obecnej parametry charakteryzujące proces wymiany ciepła w materiale zwałowiska i otoczeniu ( $\lambda$ ,  $\alpha$ ,  $dT$ ) są nieznanne.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w ramach działalności statutowej IMG PAN w roku 2006.

## Literatura

- Litwiniszyn J., Ci-tong L., Mączyński J., 1963: *Filtracja pod działaniem wiatru przy pożarach zwałów węgla*, Krajowy zjazd BHP nt. Nauka i bezpieczeństwo w górnictwie, SliTG.
- Bartzis J.G., Vlachogianis D., Stefanos A., 2004: *Best Practice Advice for Environmental Flows*, TA5 QNET CFD network Newsletter, Vol. 2, No 4.
- Elsner J.W., 1987: *Turbulencja przepływów*, PWN.
- Badr T., Harion J.L., 2005: *Numerical modelling of flow over stockpiles: Implications on dust emissions*, Atmospheric Environment, Elsevier.
- Fluent Inc User Guide, 2004
- Skotniczny P. 2005: *Modelowanie trójwymiarowego przepływu powietrza wokół zwałowiska odpadów pogórnictw*, t. 7, nr 1-2, s. 135-151, Prace IMG.

## Numerical estimation of air velocity and pressure distributions inside and outside the coal waste dump for assumed porosity

### Abstract

Presented paper discusses case of transient air flow around coal waste dump in terms of infiltration of porous material. In The analysis of the fluctuation of static pressure, velocity field outside and inside the dump as well as turbulent wake behavior is talked about. The atmospheric boundary layer was introduced into applied turbulent velocity profile as an inlet boundary condition.

**Keywords:** coal waste dump, porous material, numerical analysis

Recenzent: Prof. dr. hab. inż. *Wacław Trutwin*, Instytut Mechaniki Górotworu PAN