

Numeryczna symulacja rozkładów temperatur i stężenia gazów pożarowych w zwałowisku odpadów pogórnich

PRZEMYSŁAW SKOTNICZNY

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

Streszczenie

W pracy przedstawiono analizę wyników numerycznej symulacji zjawisk pożarowych mających miejsce w zwałowisku odpadów pogórnich. Przedstawione wyniki stanowią rozwiązanie dwuwymiarowego zagadnienia wymiany masy i energii w porowatym materiale zwałowiska. Pełna trójwymiarowa analiza z uwagi na gabaryty zwałowiska nie jest możliwa do wykonania z uwagi na bardzo długi czas obliczeń. Omawiany przypadek stanowi rozwinięcie zagadnienia dotyczącego opisu zjawisk towarzyszących przepływowi wokół zwałowiska odpadów pogórnich.

Słowa kluczowe: wymiana masy i energii w materiale porowatym, zwałowisko odpadów pogórnich

Wstęp

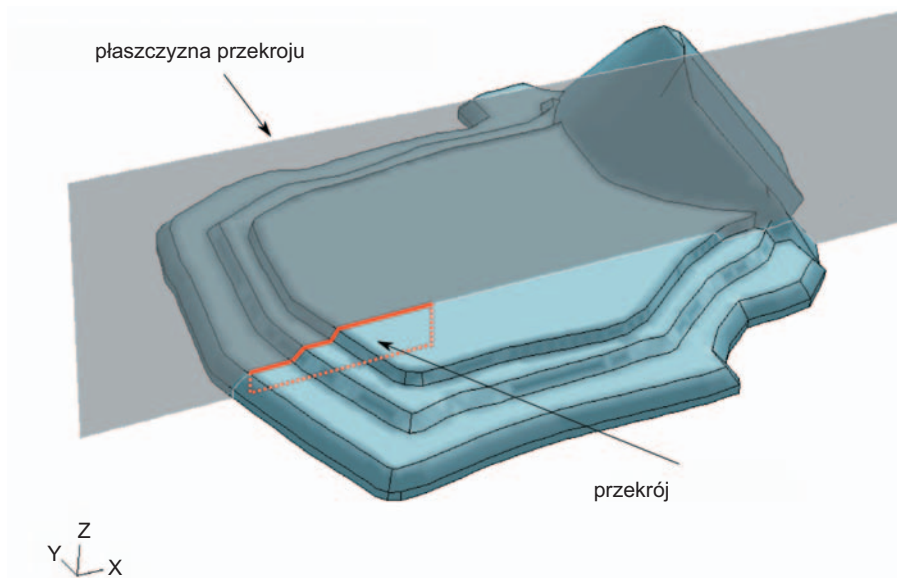
Możliwość analizy zasięgu pól temperatur oraz rozprzestrzeniania się gazów pożarowych ma ogromne znaczenie w procesie redukcji szkodliwego wpływu zwałowisk odpadów pogórnich na otoczenie. Dotychczasowo analizie numerycznej poddano trójwymiarowy przepływ powietrza wokół oraz wewnątrz zwałowiska przy założonej porowatości i przepuszczalności materiału usypowego (Skotniczny, 2005, 2006). Naturalną kontynuacją procesu modelowania jest wprowadzenie do modelu obliczeniowego dodatkowych parametrów określających rozkłady temperatur oraz gazów pożarowych generowanych w procesie samozagrzewania materiału zwałowiska. W tym miejscu pojawia się istotna przeszkoda. O ile wyznaczenie parametrów trójwymiarowego przepływu powietrza w materiale porowatym jest możliwe stosunkowo niskim nakładem mocy obliczeniowej o tyle dodanie do układu równań transportu dodatkowych składników pociąga za sobą wielokrotny wzrost zapotrzebowania na moc obliczeniową. Poprzednie, trójwymiarowe rozwiązanie opisujące zagadnienie wymiany masy w zwałowisku odpadów pogórnich, traktowanym jako ośrodek porowaty składało się z przeszło 800 000 elementów siatki niestrukturalnej typu *tri-pave*. Na podstawie wstępnych analiz oszacowano, że rozwiązanie uzyskano by po około 4 miesiącach nieprzerwanej pracy komputera typu desktop wyposażonego w dwurdzeniowy procesor oraz 2 GB pamięci RAM. Z tego względu postanowiono dokonać pewnego uproszczenia dotychczas rozważanego modelu.

- Wykonanie obliczeń na modelu dwuwymiarowym wybranego fragmentu zwałowiska, których głównym celem było wykonanie kalibracji danych wejściowych,
- z uwagi na gabaryty zwałowiska stała czasowa zjawisk termicznych zachodzących w jego wnętrzu może sięgać nawet 30 dni w związku z tym zdecydowano się na wyznaczenie szukanych wartości rozkładów pól temperatury i stężeń gazów w stanie ustalonym,
- obliczenia ograniczono do wyznaczenia rozkładu pól temperatury wewnątrz i na zewnątrz zwałowiska oraz wyznaczenia rozkładu stężeń gazu trującego – CO.

W związku z zastosowanymi uproszczeniami możliwe było wprowadzenie zróżnicowania parametrów porowatości i przepuszczalności materiału zwałowiska.

Opis geometrii

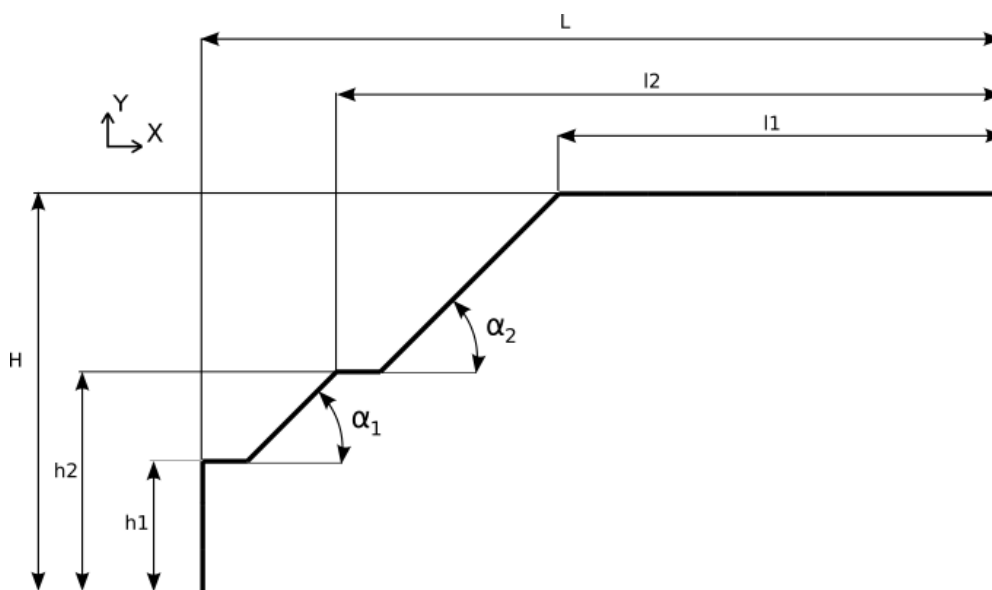
Do celów obliczeniowych wybrano przekrój od strony południowo-wschodniej zwałowiska, rysunek 1. Wybór obszaru był podyktowany wiedzą z wcześniejszych obliczeń (Skotniczny, 2006) oraz wykonanych pomiarów na zwałowisku – zaznaczony na rysunku przekrój należał do strefy najbardziej narażonej na działanie wiatru, czyli czynnika mogącego mieć wpływ na zjawisko napowietrzania materiału zwałowanego.



Rys. 1. Wybór przekroju obliczeniowego

Podczas wyboru kierowano się również efektywnością obliczeń, wybrany fragment nie mógł być zbyt duży – spowodowałoby to wzrost zapotrzebowania na moc obliczeniową a z kolei zbyt mały mógłby spowodować utratę informacji.

Wymiary wybranego przekroju zostały zaznaczone na rysunku 2, ich wartości liczbowe zamieszczono w tabeli 1.

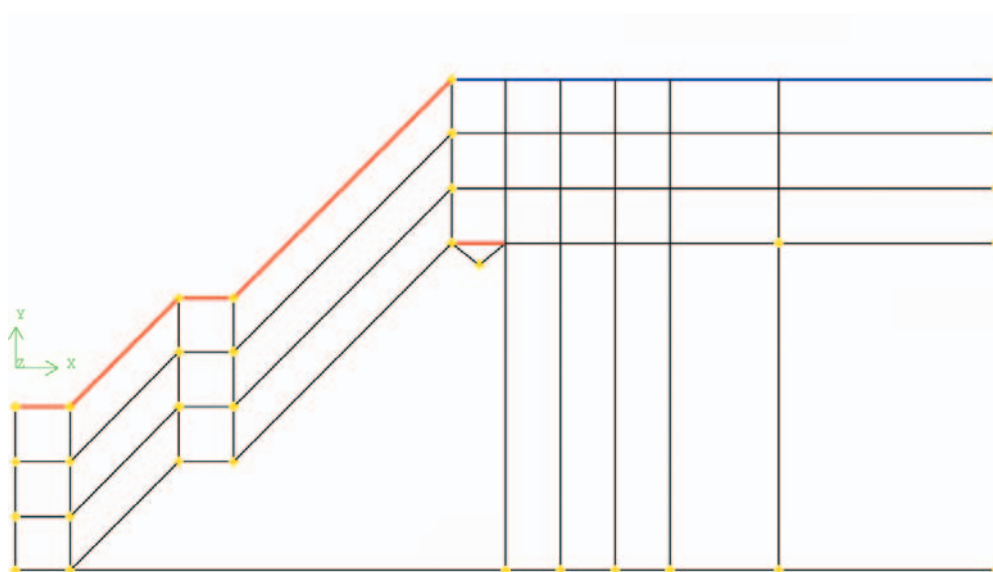


Rys. 2. Wymiary wybranego przekroju zwałowiska

Tab. 1. Wymiary dla geometrii z rysunku 2

wymiar	wartość
H	9,0 m
h1	3,0 m
h2	4,0 m
L	18,0 m
l1	10,0 m
l2	14,45 m
α_1	45°
α_2	45°

Wybrany przekrój został podzielony na podobszary zgodnie ze schematem zamieszczonym na rysunku 3, na którym również wyszczególniono rodzaj warunków brzegowych.



Rys. 3. Podział przekroju na podobszary. Objasnienie w tekście

Do celów obliczeniowych zdecydowano się na zróżnicowanie parametrów porowatego materiału poprzez wyróżnienie pięciu obszarów wewnątrz zwałowiska, zróżnicowanych pod względem parametrów przepuszczalności, porowatości oraz rodzaju materiału. Parametry opisujące omawiane warstwy zamieszczono w tabeli 2.

Tab. 2. Parametry warstw

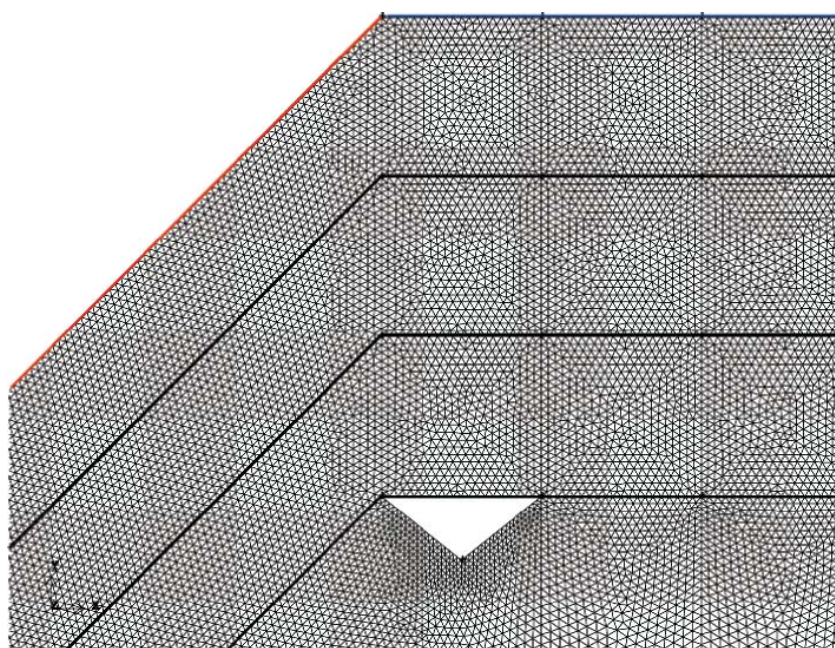
warstwa	grubość warstwy [m]	porowatość ϵ [-]	wsp. przepuszczalności $1/f$ [1/m]	materiał warstwy
p1	1	0,20	$1e^{-9}$	dolomit
p2	1	0,18	$2e^{-9}$	dolomit
p3	1	0,16	$3e^{-9}$	dolomit
p4	1	0,14	$4e^{-9}$	dolomit
plyta	1	0,10	$1e^{-11}$	gips

W powyższym przykładzie celowo zrezygnowano z modelowania obszaru powietrza znajdującego się na zewnątrz zwałowiska. Ten zabieg miał na celu dalszą redukcję liczby elementów w siatce obliczeniowej, jak również wyeliminowanie konieczności modelowania wymiany masy i energii w obrębie warstwy przyściennej.

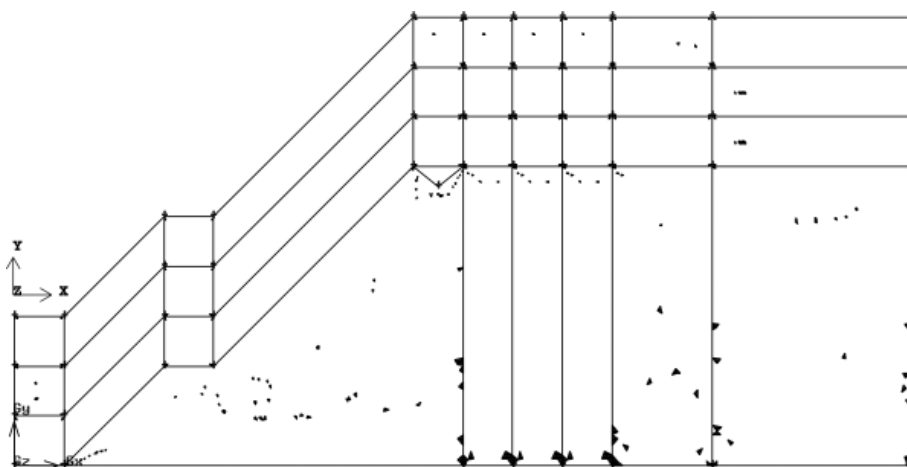
Dyskretyzacja obszaru obliczeniowego

Omawiany przekrój zdyskretyzowano w preprocesorze Gambit używając siatki niestrukturalnej typu *tri-pave*. To działanie było celowe w aspekcie budowy modelu zwałowiska, dla którego zastosowanie siatki strukturalnej typu quad byłoby niezwykle trudne a miejscami wręcz niemożliwe.

Fragment zastosowanej siatki został przedstawiony na rysunku 4. Gambit oprócz dyskretyzacji obszaru obliczeniowego umożliwia również kontrolę jakości wygenerowanej siatki poprzez analizę współczynnika skośności poszczególnych elementów. Podaje się (Fluent User Manual) że optymalna skośność elementu siatki powinna zawierać się w przedziale $0,1 < Sk < 0,6$. Podobna analiza została przeprowadzona dla omawianego przykładu. Wyniki w formie graficznej zamieszczone są na rysunku 5. Jak widać, maksymalna wartość parametru Sk nie przekracza 0,4 w ilości 0,34% całkowitej ilości elementów w siatce. W związku z tym należy uznać, że wygenerowana siatka spełnia kryterium jakościowe.



Rys. 4. Fragment siatki obliczeniowej



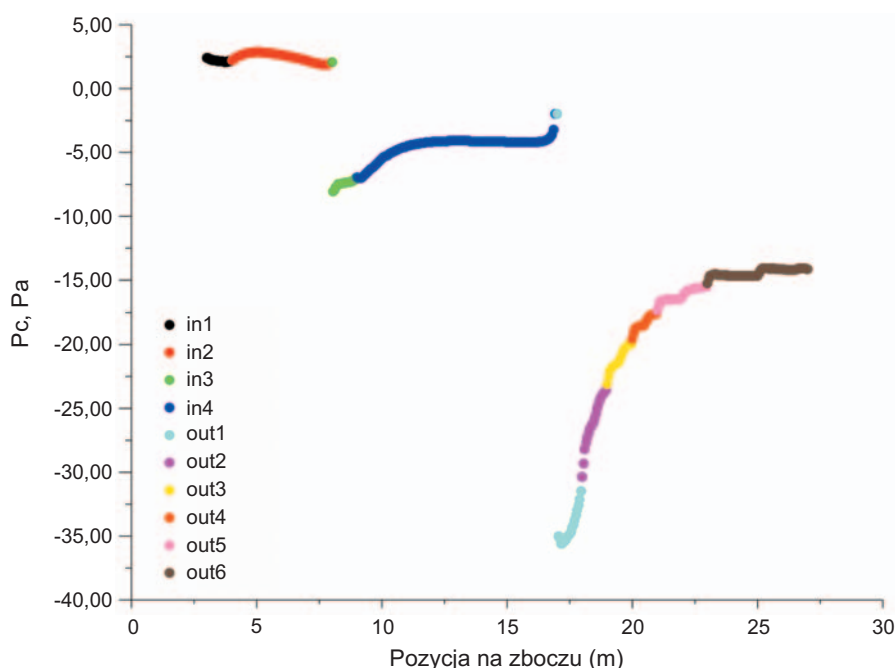
Rys. 5. Badanie wartości parametru Sk . Zaznaczono elementy o wartości $Sk = 0.4$

Warunki brzegowe

Jak zostało to wcześniej zaznaczone w omawianym przykładzie zrezygnowano z modelowania opływu powietrza na zewnątrz zwałowiska. Warunki brzegowe typu *pressure inlet* oraz *pressure outlet* dają możliwość wprowadzenia profilów ciśnień całkowitych otrzymanych z obliczeń przepływu powietrza wokół „negatywu” zwałowiska traktowanego jako ośrodek nieprzepuszczalny. Wyznaczone profile zamieszczono na rysunku 6. Zarówno wlot jak i wylot został wstępnie podzielony na odcinki celem łatwiejszego zadawania profilów ciśnień całkowitych.

Powietrze zatłaczane na wlocie ciśnienia $in_1 - in_4$ posiadało następujące parametry:

temperatura t	26°C
zawartość O_2	21%
zawartość N_2	79%



Rys. 6. Profile ciśnień całkowitych zadanych na wlocie i wylocie zwałowiska

Tlenek węgla został podany w źródle traktowanym jako warunek brzegowy typu *pressure inlet*. Parametry gazu:

temperatura:	340°C,
zawartość CO	5%,
nadciśnienie wypływu	2 Pa.

Obliczenia

Wyznaczenie parametrów przepływowych zostało wykonane w programie Fluent v. 6.2.18. Zarówno powietrze, jak i mieszanina gazów były traktowane jako gazy lekkie ściśliwe, obliczenia zostały przeprowadzone przy założeniu przepływu laminarnego wewnątrz zwałowiska.

Ponieważ rozpatrywany przykład dotyczy przepływu płynu przez medium porowate konieczne było aktywowanie odpowiedniego członu źródłowego w równaniach ruchu. Ogólną postać wzoru opisuje równanie 1.

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

W przypadku rozpatrywania przepływu w medium homogenicznego powyższa postać równania może być napisana w formie:

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

Dalsze uproszczenie uzyskano dzięki założeniu przepływu laminarnego, tak więc człon inercyjny w równaniu (2) przyjmuje wartość zerową. Ostatecznie człon źródłowy przyjmuje postać równania (3).

$$S_i = -\frac{\mu}{\alpha} v_i \quad (3)$$

Dodatkowo, w przykładzie rozpatrywano transport składników mieszaniny powietrze-tlenek węgla. W tym przypadku równanie ruchu poszczególnych składników może być napisane w następującej formie.

$$\frac{d}{dt}(\rho Y_i) + \nabla(\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (4)$$

gdzie

Y_i – lokalna koncentracja i -tego składnika,

\vec{J}_i – strumień dyfuzji i -tego składnika powstający w wyniku gradientu koncentracji gradientu. W omawianym przypadku przepływu laminarnego w materiale zwałowiska przyjmuje on postać:

$$\vec{J}_i = -\rho D_{i,m} \nabla Y_i \quad (5)$$

gdzie wyraz $D_{i,m}$ oznacza współczynnik dyfuzji i -tego składnika w mieszaninie.

Pozostałe wyrazy równania (4) oznaczają odpowiednio:

R_i – produkcja netto i -tego składnika na skutek reakcji chemicznej,

S_i – człon źródłowy wynikający z przejścia i -tego składnika z fazy rozproszonej, lub źródło uwzględnione przez użytkownika.

Wyniki obliczeń

Wyniki przeprowadzonych obliczeń przedstawiono na rysunkach w postaci izolinii poszczególnych wartości obliczeniowych.

Na rysunku 7 przedstawiono rozkład prędkości wewnątrz zwałowiska traktowanego jako wielowarstwowy ośrodek porowaty. Wartości prędkości są filtrowane w zakresie $0-10^{-4}$ m/s.

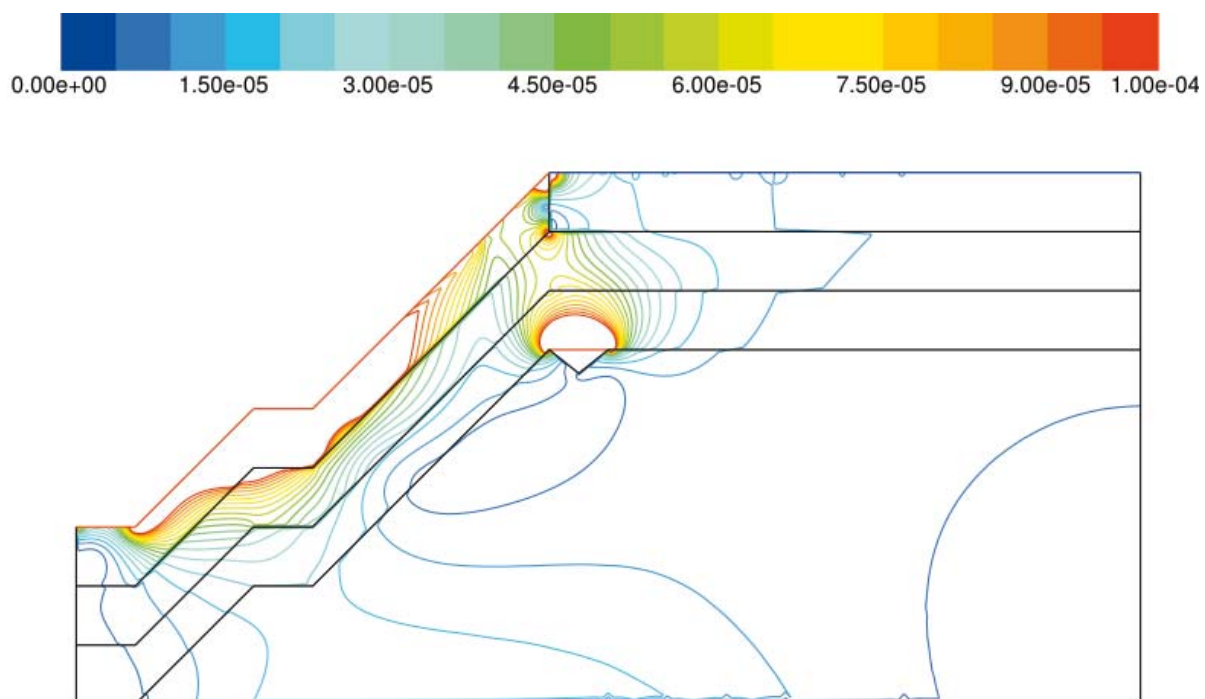
Płyta jako ośrodek o najmniejszym współczynniku filtracji powoduje zniekształcenie pól prędkości w kierunku przepływu. Ponadto jak wynika z analizy rozkładów prędkości od strony „nawietrznej” istnieje wyraźne zróżnicowanie wartości prędkości w funkcji właściwości materiału porowatego; pierwsza warstwa – p_1 – jest warstwą najintensywniej napowietrzaną. Kierunki przepływów najlepiej widać na rysunku 6, który przedstawia pole wektorów prędkości średniej mieszaniny w pobliżu źródła gazu.

Interesującą rzeczą jest rozkład prędkości średnich oraz sposób penetracji płyty przez mieszaninę gazów. Jak można zauważyć na rysunku 8 wektory prędkości wewnątrz płyty są skierowane pionowo do góry. Można to wytłumaczyć równomiernym rozkładem ciśnień całkowitych wewnątrz płyty – rysunek 9.

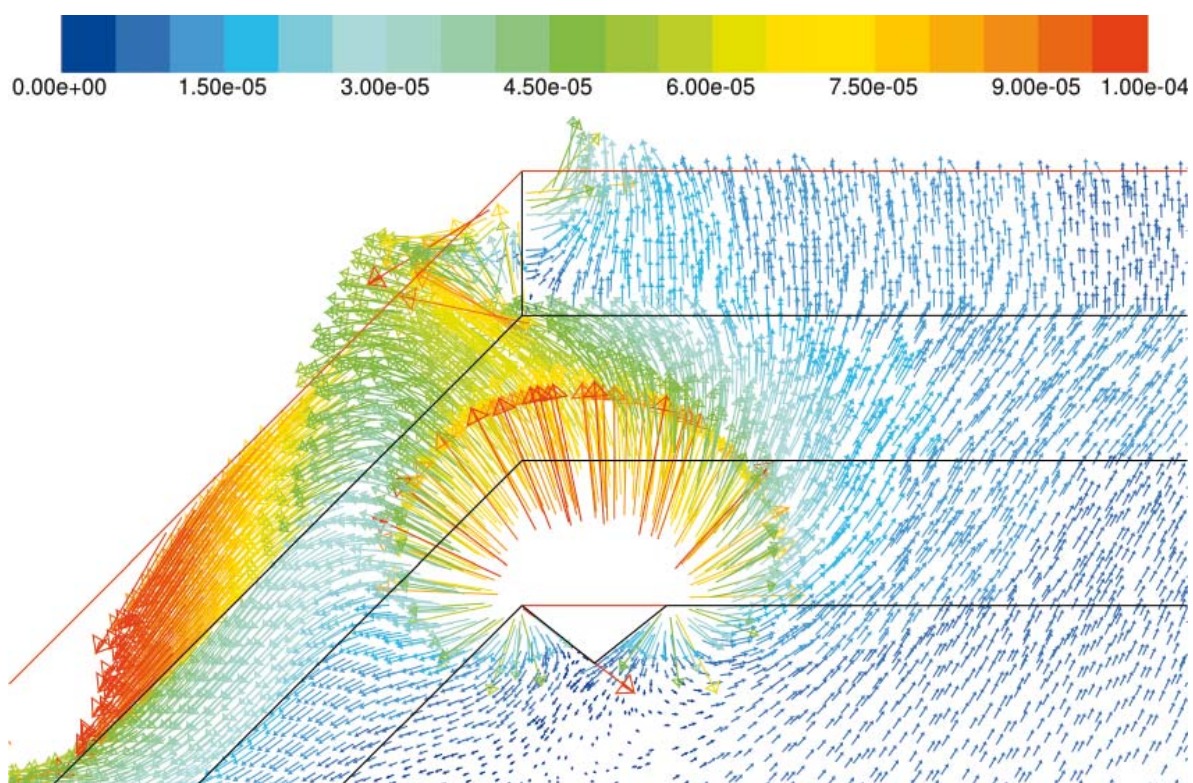
Najważniejszymi czynnikami, w aspekcie zagrożeń środowiskowych są rozkłady temperatur oraz stężeń tlenu węgla w materiale zwałowiska. Rozkład tych parametrów przedstawiają kolejne rysunki.

Rysunek 10 przedstawia rozkład stężeń tlenu węgla w objętości zwałowiska. Przebieg linii stężeń sugeruje istnienie zjawiska „zatłaczania” tlenu do środka zwałowiska spowodowanego zarówno rozkładem ciśnień całkowitych wewnątrz zwałowiska spowodowanych istnieniem ośrodka o niskiej przepuszczalności (płyty), jak również istnieniem dyfuzji. Pola rozkładów temperatury dla omawianego przypadku zaprezentowano na rysunku 11.

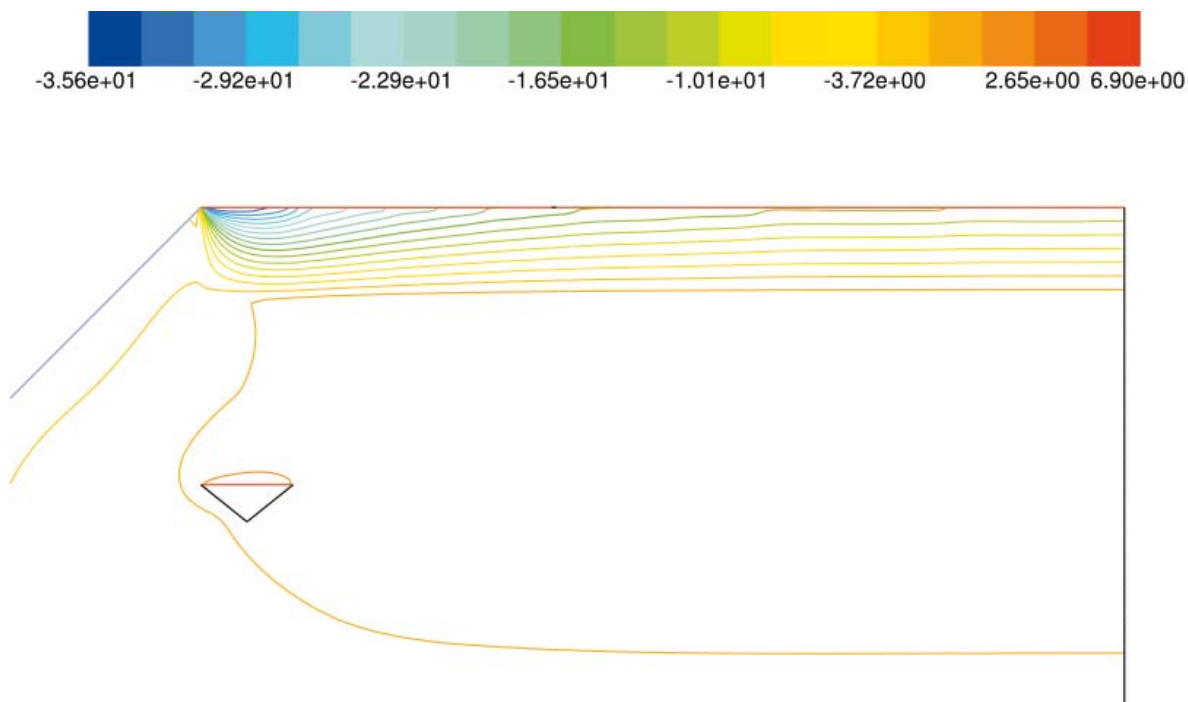
Analizując rozkłady zamieszczone na rysunkach 10 i 11 można stwierdzić, że w strefie wierzchniej zwałowiska na obszarze płyty następuje wyrównanie pól temperatur oraz stężeń tlenu węgla. Zjawisko to jest w pełni uzasadnione biorąc pod uwagę rodzaj zadanego rozkładu ciśnień całkowitych na powierzchni,



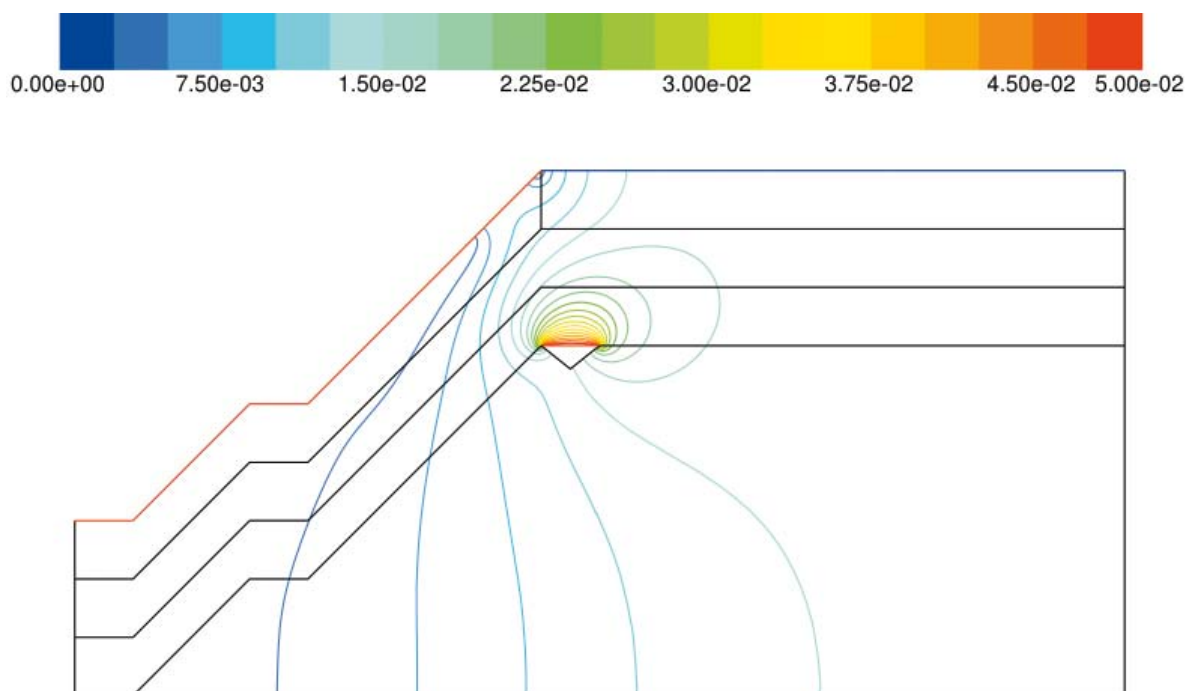
Rys. 7. Rozkład prędkości w zwałowisku, skala m/s



Rys. 8. Pole wektorowe prędkości średniej mieszaniny, skala m/s

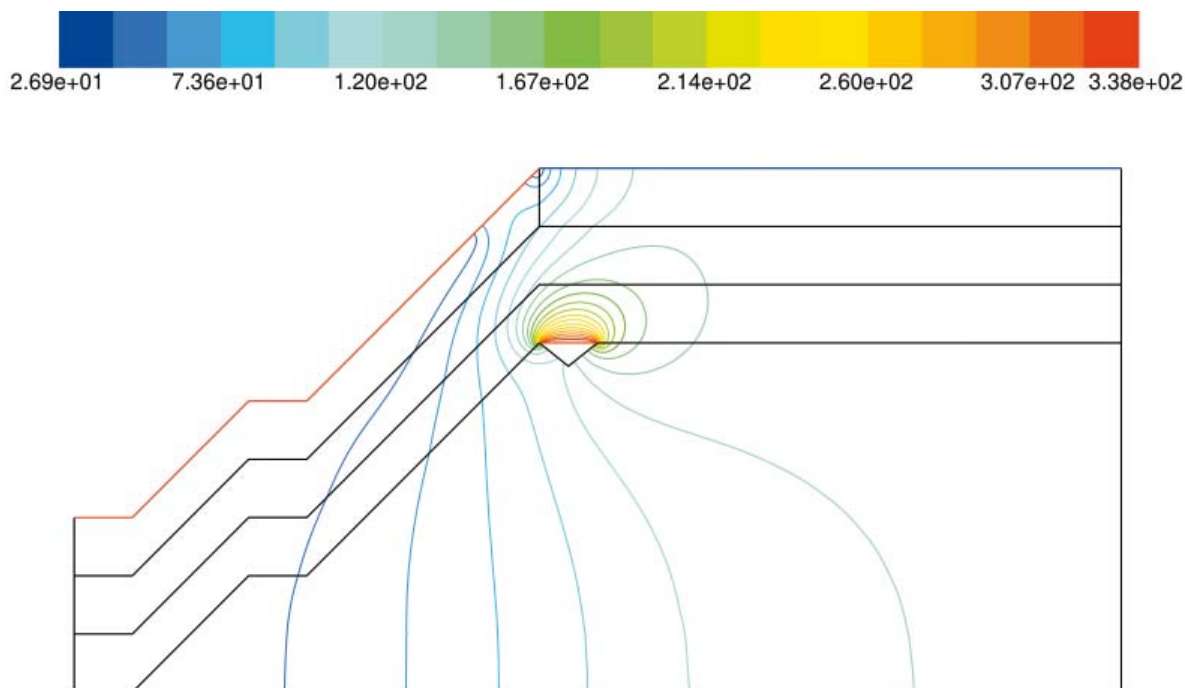


Rys. 9. Rozkład ciśnień całkowitych w płycie, skala Pa



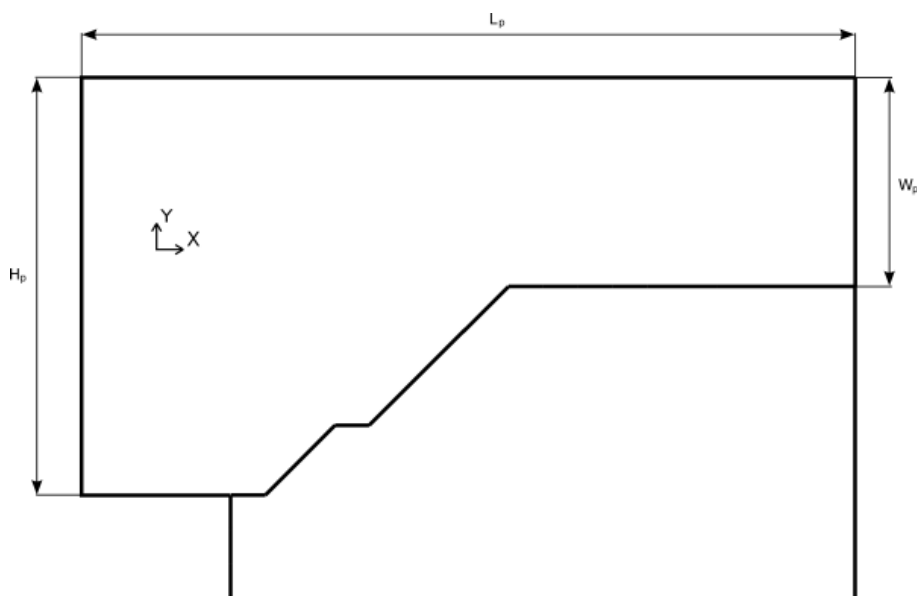
Rys. 10. Rozkład stężeń tlenku węgla wewnątrz żwałowiska, skala -

jednakże jak wynika z obserwacji poczynionych podczas pomiarów na obiekcie tego typu rozkład nie ma miejsca. Zaistniała sytuacja bierze się z faktu niemożliwości modelowania warunków konwekcyjnych dla temperatur oraz stężeń gazów dla warunku brzegowego typu *pressure outlet*. Stąd też wynika pojawienie się kumulacji tych wartości w obszarze wewnętrznym żwałowiska co z kolei w sposób niedostateczny odzwierciedla modelowany proces.



Rys. 11. Rozkład temperatury wewnątrz zwałowiska, skala °C

Po rozwiązaniu tego problemu należało sięgnąć do poprzedniego sposobu modelowania, polegającego na stworzeniu dodatkowej strefy przepływowej, znajdującej się powyżej bryły zwałowiska, wymieniającej masę i energię z materiałem porowatym. W tym celu stworzono zmodyfikowaną wersję obszaru obliczeniowego przedstawionego na rysunku 12.



Rys. 12. Rozszerzona domena obliczeniowa

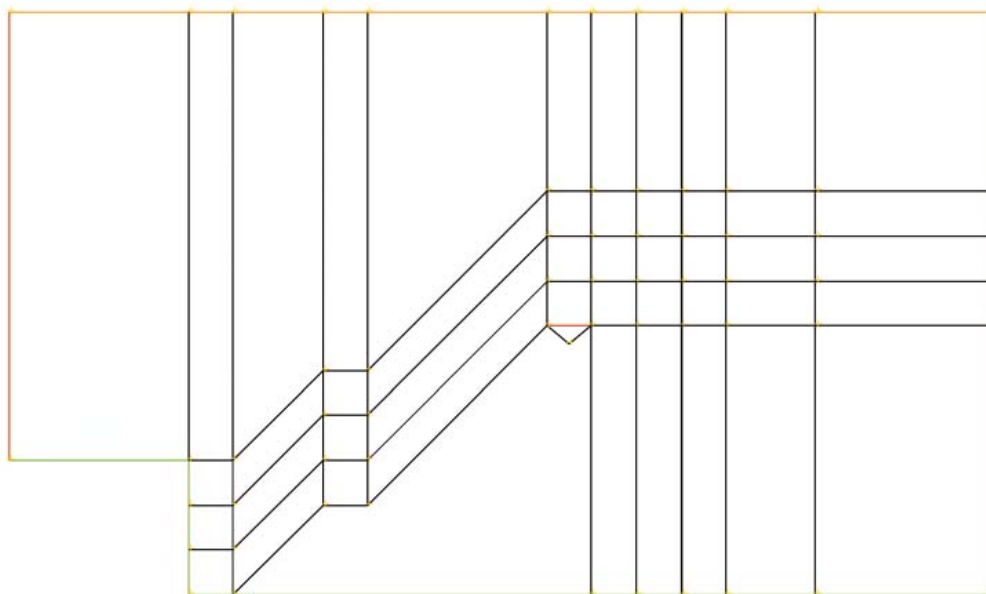
Jak widać geometria została rozszerzona przez dodanie dodatkowej strefy – powietrza. Wymiary strefy były następujące:

$$\begin{aligned}
 H_p &= 11 \text{ m} \\
 L_p &= 24 \text{ m} \\
 W_p &= 5 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Proces tworzenia siatki obliczeniowej został powtórzony analogicznie do poprzedniego przypadku.

Różnice polegały głównie w założonych wartościach dla warunków brzegowych. Podstawowym problemem było wyznaczenie wartości ciśnienia na wlocie L_p takiego, żeby prędkości uzyskane w strudze swobodnej nad zwałowiskiem były takie same jak w przykładzie na podstawie którego określano profile ciśnień całkowitych na zboczach zwałowiska. W wyniku przeprowadzonych obliczeń ustalono wielkość ciśnienia wlotowego $P_{cLp} = 6$ Pa. Pozostałe wielkości jak w poprzednim przykładzie.

Na rysunku 13 zamieszczono schemat nowej geometrii z naniesionymi rodzajami zastosowanych warunków brzegowych.



Rys. 13. Schemat zmodyfikowanej geometrii przekroju zwałowiska

Obliczenia – model zmodyfikowany

W przypadku obliczeń przeprowadzonych na modelu zmodyfikowanym założenie laminarnego przepływu w całej domenie obliczeniowej byłoby zbyt wielkim uproszczeniem mogącym prowadzić do błędnych wniosków. Zdecydowano się na rozwiązanie „hybrydowe” polegające na założeniu przepływu turbulentnego powietrza opływającego zwałowisko, przy założeniu przepływu laminarnego wewnątrz zwałowiska. Ten zabieg był możliwy dzięki aktywacji własności *laminar flow* dotyczącej przepływu w ośrodku porowatym znajdującej się w opcjach Fluent. W ten sposób utrzymano postacie równań transportu wewnątrz materiału porowatego stosowane w poprzednim przykładzie, modyfikując je tylko w strefie przepływu swobodnego.

Człon domykający w równaniach transportu odpowiadający za ruch turbulentny został uwzględniony z użyciem sprawdzonego do tych zastosowań modelu **k- ω -SST** (Skotniczny, 2006).

Model ten wyrażony jest następującymi równaniami opisującymi odpowiednio transport energii kinetycznej turbulencji **k** (6) oraz szybkości dyssypacji **ω** (7)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + D_\omega \quad (7)$$

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

$$\tilde{G}_k = \min(G_k, 10\rho\beta^*k\omega) \quad (8)$$

G_ω jest członem określającym produkcją ω wyrażoną jako,

$$\tilde{G}_\omega = \frac{\alpha}{V_t} G_k \quad (9)$$

gdzie α jest współczynnikiem wyrażonym zależnością:

$$\alpha = \frac{\alpha_\infty}{\alpha} \left(\frac{\alpha_0 + \text{Re}_t / R_\omega}{1 + \text{Re}_t / R_\omega} \right) \quad (10)$$

określonym z odpowiednimi stałymi modelu,

Γ_k oraz Γ_ω oznaczają odpowiednio efektywną dyfuzyjność k i ω , określone zależnościami

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (11)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (12)$$

w których σ_k i σ_ω określają odpowiednio turbulentną liczbę Prandtla dla k i ω , Y_k i Y_ω oznaczają dyssypację k i ω ,

$$Y_k = \alpha\beta^*k\omega \quad (13)$$

$$Y_\omega = \alpha\beta^*\omega^2 \quad (14)$$

a z kolei człon D_ω oznacza dyfuzję wzajemną (*cross-diffusion*) określona jako

$$D_\omega = 2(1 - F_1)\rho\sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (15)$$

Dodatkowy czynnik który musiał zostać zmodyfikowany w przypadku rozpatrywania przepływu turbulentnego pojawił się w równaniu transportu i -tego składnika mieszaniny – równanie (4). Był nim strumień dyfuzji \vec{J}_i , który w rozpatrywanym przypadku przybrał postać:

$$\vec{J}_i = - \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_i \quad (16)$$

Jak łatwo można zauważyć równanie (16) jest rozszerzone o dodatkowy człon $\frac{\mu_t}{Sc_t}$, w którym

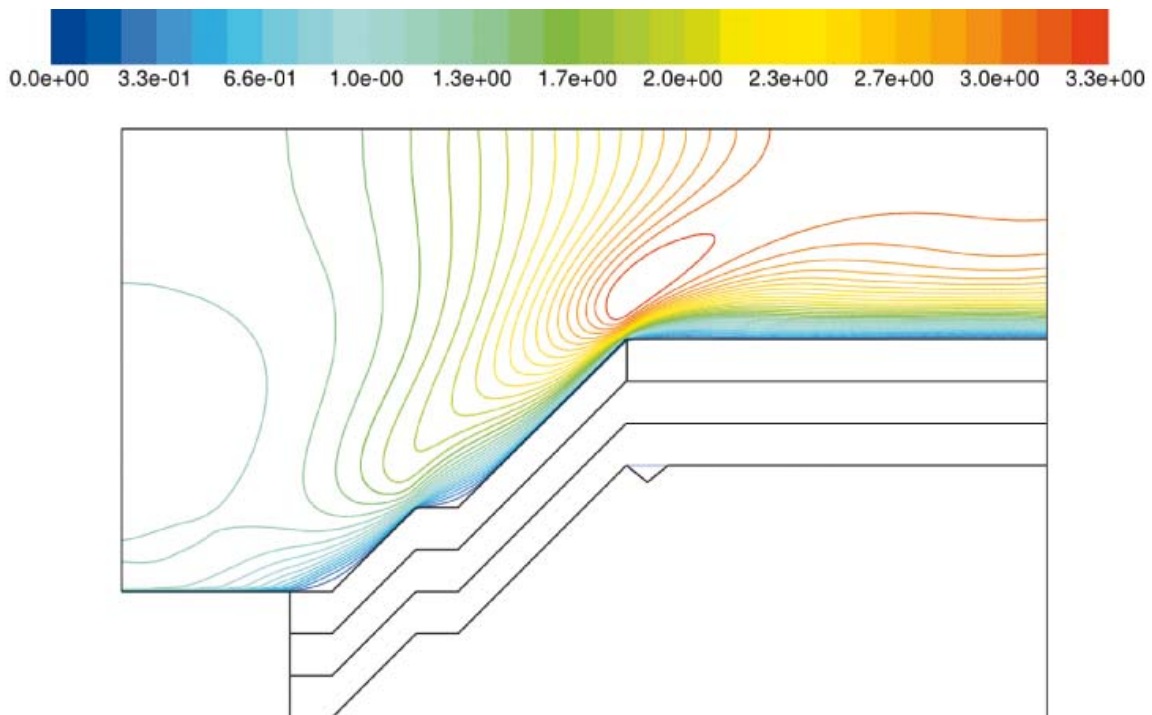
- μ_t – określa lepkość turbulentną,
- Sc_t – jest turbulentną liczbą Schmidta.

Analiza wyników – model zmodyfikowany

Wyniki obliczeń podobnie jak w poprzednim przykładzie umieszczono na rysunkach w postaci izolinii poszczególnych wartości obliczeniowych.

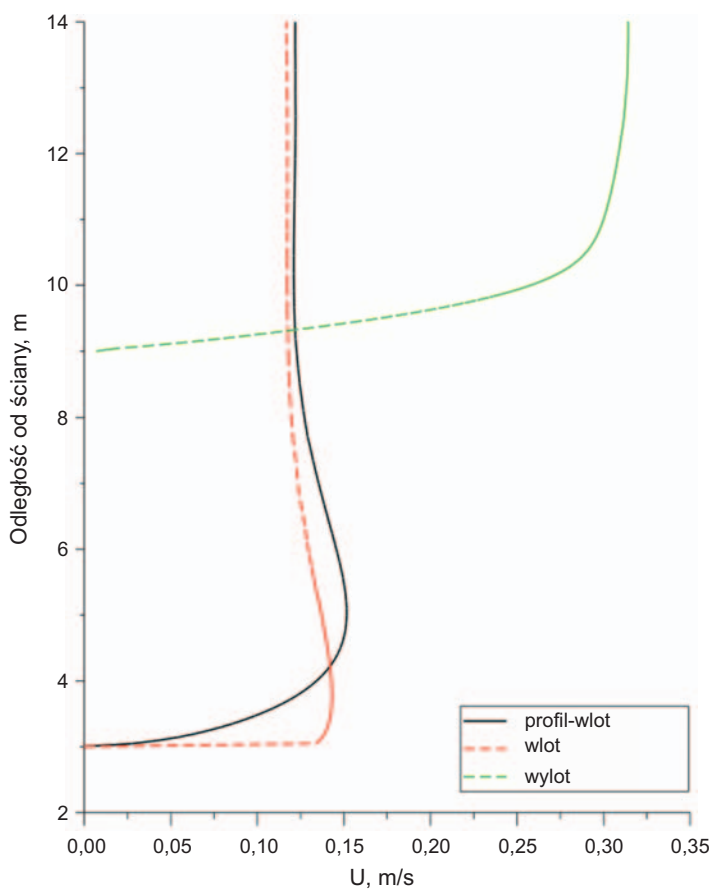
Rozkład prędkości średniej mieszaniny powietrzno-gazowej omywającej zwałowisko został przedstawiony na rysunku 14. Uwagę zwraca bardzo równomierny rozkład wartości wektora prędkości. Osiągnięto to dzięki zagęszczeniu siatki obliczeniowej w strefie przyściennej. Ponadto korzystając z doświadczeń z poprzednich analiz modelu trójwymiarowego (Skotniczny, 2006) wybór przekroju został dokonany w miejscu, w którym fluktuacje wektora prędkości były najmniejsze, a co za tym idzie przepływ bardziej ustabilizowany.

Liniami przerywanymi zaznaczono przekroje kontrolne w których analizowano profile prędkości mieszaniny.



Rys. 14. Rozkład modułu prędkości mieszanki omywającej zwałowisko, skala m/s.

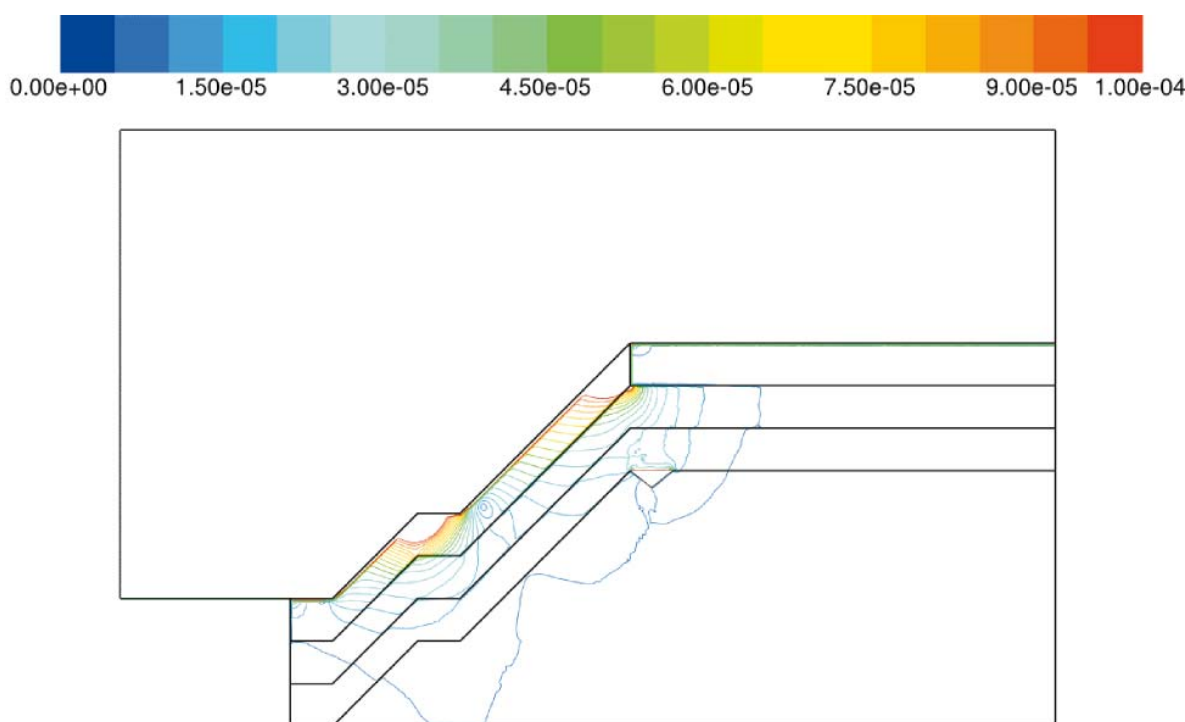
Jakość uzyskanych pól prędkości w przepływie mieszanki powietrzno-gazowej wokół zwałowiska obrazują profile modułu prędkości U (rysunek 15) sporządzone dla trzech przekrojów, zaznaczonych na rysunku 14 liniami przerywanymi.



Rys. 15. Profile prędkości dla 3 przekrojów, opis w tekście

Jak można zaobserwować na rysunku 15 profil prędkości mieszaniny rozwija się od wlotu aż do przekroju kontrolnego „profil-wlot” znajdującego się przed zwałowiskiem, gdzie można go uznać za w pełni rozwinięty. Otrzymany profil prędkości średniej można być przyrównany swoim kształtem do profilu tworzącego się w atmosferycznej warstwie przyściennej (Bartzis i in., 2004; Badr i in., 2005).

Na kolejnym rysunku, 16 zamieszczono izolinie rozkładów modułu prędkości mieszaniny wewnątrz zwałowiska. Podane wielkości są filtrowane w zakresie $0-10^{-4}$ m/s. Porównując wartości prędkości oraz ich zasięg z rozkładami zamieszczonymi na rysunku 6 można zauważyć, że wprowadzenie w poprzednim przykładzie profilów ciśnień całkowitych mogło spowodować nieprawidłowe warunki przepływowe w materiale porowatym polegające na większych wartościach wektora prędkości przez co człon inercyjny w równaniu (2) mógł mieć niezerową wartość, powodując błędne wyznaczanie wartości prędkości, szczególnie w warstwie p_1 .



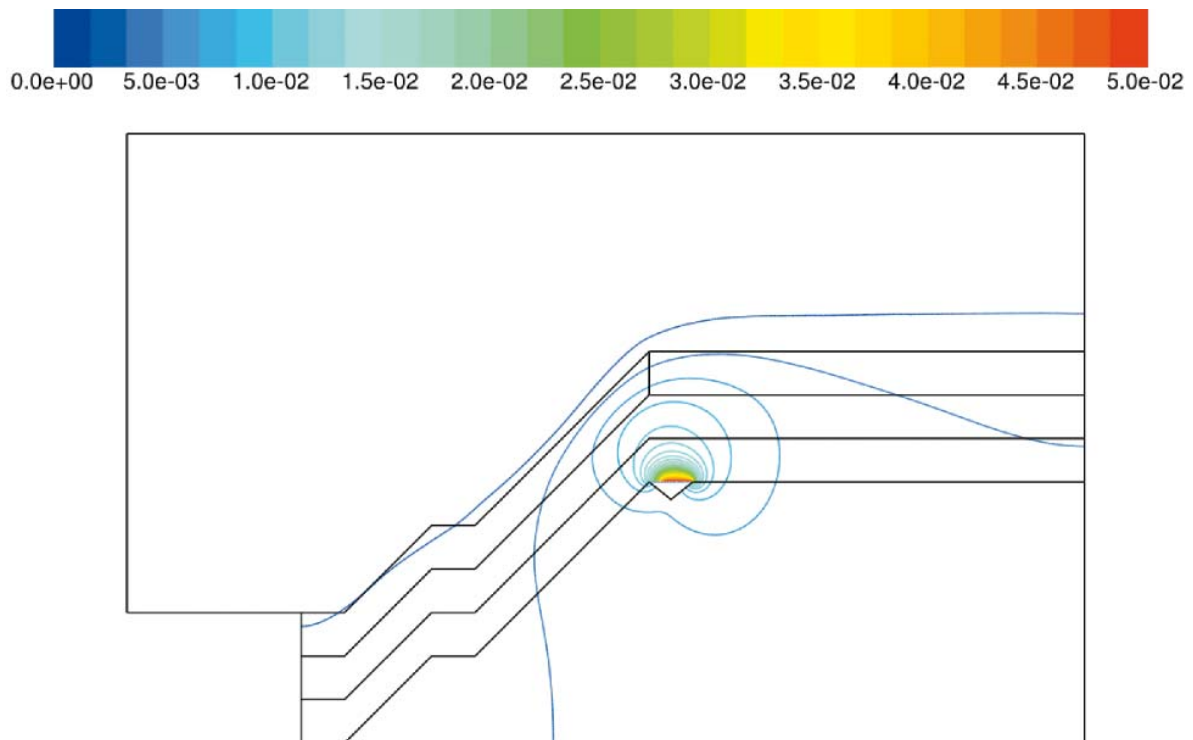
Rys. 16. Rozkład modułu prędkości mieszaniny wewnątrz zwałowiska, model II, skala m/s

Kolejną cechą skłaniającą ku bieżącemu rozwiązaniu jest rozkład prędkości o wartościach większych od 10^{-4} , które zajmują mniejszy obszar niż w poprzednio omawianym przypadku i są zgodne co do miejsca i zasięgu występowania z wartościami prędkości uzyskanymi dla przepływu trójwymiarowego (Skotniczny, 2006).

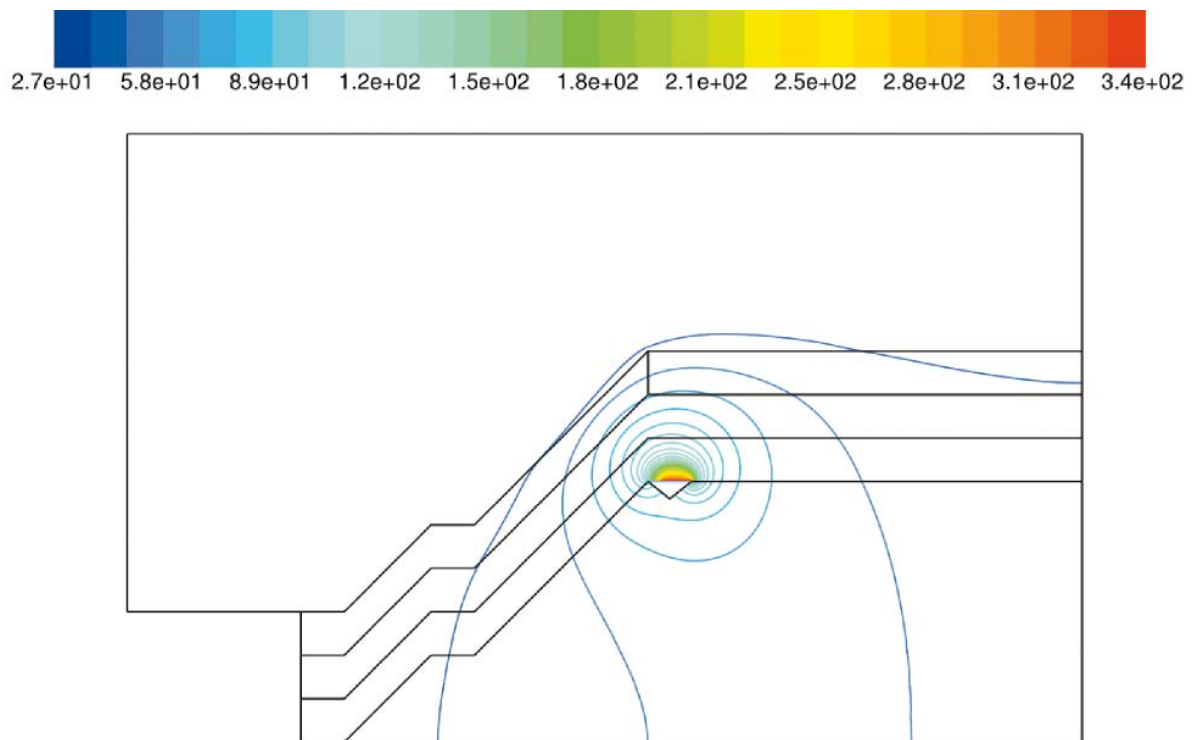
Podobnie w przypadku rozkładu stężeń tlenu węgla. Zastosowanie dodatkowej strefy przepływu swobodnego spowodowało konwekcyjno-dyfuzyjny transport tlenu z obszaru zwałowiska do otaczającego go powietrza co w efekcie spowodowało zmniejszenie wartości koncentracji gazu na powierzchni zwałowiska (rysunek 17).

Ponadto na rysunku 17 można zauważyć efekt pokrycia zwałowiska warstwą mieszaniny gazów o stężeniu CO rzędu $5e^{-3}$. Pojawienie się tlenu od strony „nawietrznej” zwałowiska może być wytłumaczone działaniem dyfuzji, z kolei zmiana grubości warstwy spowodowana jest wzrostem przewagi konwekcji nad dyfuzją w obrębie modelowanej warstwy przyściennej (Elsner, 1987).

Rozkład temperatur wewnątrz oraz na zewnątrz materiału zwałowiska zaprezentowano na rysunku 18. W tym przypadku, również można zauważyć duże różnice w stosunku do poprzedniego rozwiązania. Wprowadzenie do układu konwekcji poprzez wprowadzenie strefy powietrza omywającego zwałowisko spowodowało intensyfikację wymiany ciepła co z kolei zaowocowało spadkiem wartości temperatur na powierzchni do około 50°C . Wartość temperatury powierzchni zgadza się z wartością zmierzoną podczas pomiarów na zwałowisku.



Rys. 17. Rozkład stężenia tlenku węgla wewnątrz i na zewnątrz zwałowiska - model II, skala -



Rys. 18. Rozkład temperatur wewnątrz i na zewnątrz zwałowiska - model II, skala °C

Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono wyniki symulacji komputerowej procesu wymiany masy i energii na aktywnym termicznie zwałowisku odpadów pogórnich.

W wyniku wstępnych analiz zagadnienia stwierdzono konieczność redukcji stopnia komplikacji zadania, polegającej na zastąpieniu stosowanego do tej pory modelu trójwymiarowego reprezentatywnym modelem dwuwymiarowym. Na podstawie wcześniejszych rozwiązań określono obszar o największym prawdopodobieństwie wystąpienia niekorzystnego zjawiska napowietrzenia materiału składowanego.

Wyniki analizy przypadku nieuwzględniającego wymianę energii i masy z otoczeniem zostały odrzucona ze względu na zbyt wysokie wartości temperatur oraz stężeń tlenu węgla na powierzchni zwałowiska. W kolejnym kroku stworzono geometrię rozszerzoną o strefę powietrza omywającego zwałowisko. Wyniki uzyskane z obliczeń nowej geometrii zostały uznane za prawdopodobne.

Weryfikacja wyników analizy numerycznej opisywanego przypadku wymaga zaangażowania dużych środków zarówno finansowych jak i ludzkich, ponadto czas prowadzenia eksperymentu weryfikującego liczyć można w miesiącach. Istnieje jednak metoda pozwalająca na przybliżoną ocenę wiarygodności analizy numerycznej – jednorazowy pomiar temperatur zwałowiska i jego powierzchni. W lipcu 2006 wykonano taki pomiar używając do tego celu wielokanałowego loggera temperatury THERM95. Podczas jednodniowej sesji przeprowadzono pomiary temperatur wewnątrz zwałowiska – korzystając z przygotowanych otworów badawczych, oraz temperatur wierzchołki na głębokości 5 cm. Warunki atmosferyczne w dniu pomiarów wynosiły:

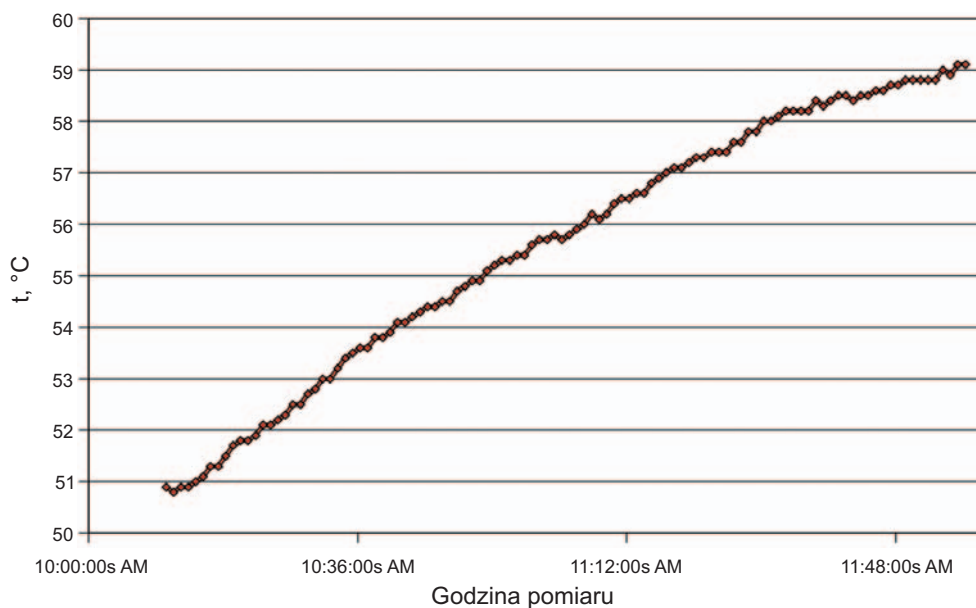
- t_o – temperatura powietrza = 31°C,
- p_{at} – ciśnienie atmosferyczne = 998 hPa z tendencją zwyżkową,
- U_w – średnia prędkość wiatru = 1,92 m/s, kierunek S-E zmienny.

Fotografię przenośnego stanowiska pomiarowe zaprezentowano na rysunku 19.



Rys. 19. Fotografia przenośnego stanowiska pomiarowego

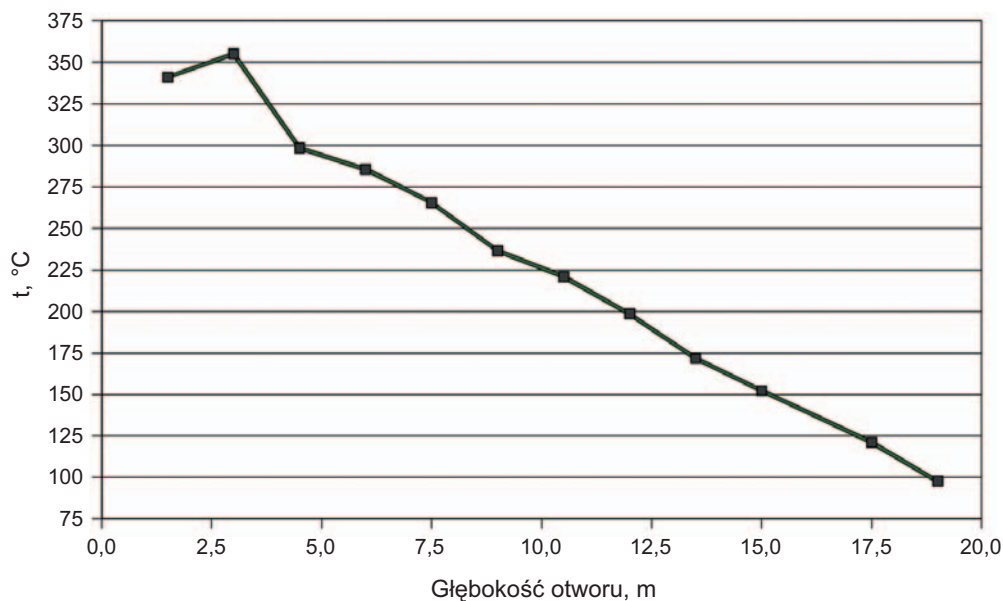
Wyniki pomiarów w postaci wykresów temperatur zamieszczono na kolejnych rysunkach.



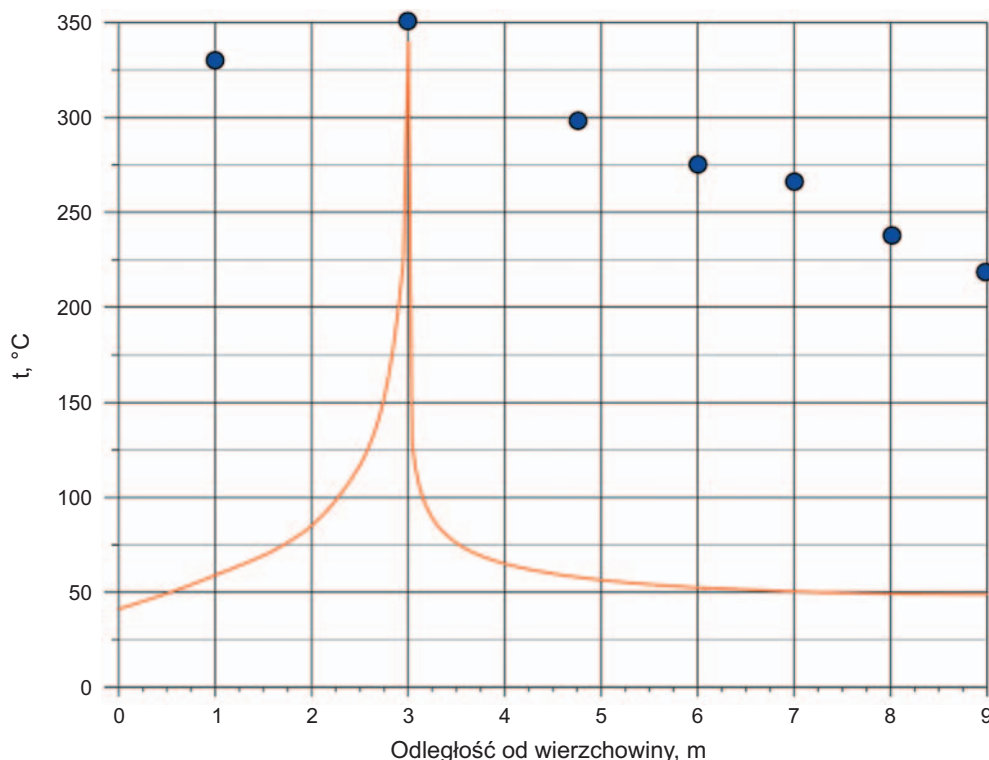
Rys. 20. Zmiana temperatury wierzchołkowej w czasie

Rysunek 20 przedstawia wykres zmienności temperatury materiału wierzchołkowej zwałowiska w funkcji czasu. Wzrost temperatury w trakcie trwania pomiaru tłumaczy się zyskiem energii pochodzącej od promieniowania słonecznego. Ponieważ obliczenia numeryczne dotyczyły stanu ustalonego dla temperatury otoczenia $t_o = 26^\circ\text{C}$ można przyjąć, że temperatura z początku pomiarów, czyli z około godziny 10:00 odpowiada temperaturze wyznaczonej z obliczeń równej 46°C .

Znacznie gorzej prezentuje się rozkład temperatury zmierzonej wzdłuż otworu badawczego. Zamieszczony na rysunku 21 wykres wyraźnie wskazuje na zdecydowanie wyższe temperatury we wnętrzu zwałowiska niż odpowiadające im wartości wyliczone. Dla porównania na rysunku 22 zamieszczono krzywą rozkładu pionowego temperatury wewnątrz zwałowiska, obliczonej w przykładzie II z naniesionymi punktami rozkładu temperatury z pomiarów.



Rys. 21. Profil temperatury w otworze badawczym



Rys. 22. Porównanie profili temperatury obliczonego z pomiarowym na linii pionowej przechodzącej przez źródło.
linia ciągła – wartości obliczone, punkty – wartości zmierzone

Przyczyn rozbieżności może być kilka. Jako najbardziej prawdopodobną przyjmuje się większy wpływ konwekcyjnego unoszenia ciepła w otworze badawczym niż w „nieperforowanym” materiale zwałowiska, w którym dominującym mechanizmem transportu energii była dyfuzja. Ponadto, w przypadku rzeczywistym na wartości mierzonych temperatur mogła mieć wpływ obecność sąsiednich źródeł ciepła wewnątrz zwałowiska, lub źródło ciepła nie miało charakteru skupionego. Niestety na chwilę obecną nie ma skutecznego a przede wszystkim efektywnego sposobu sprawdzenia tych hipotez.

Analizując przedstawione wyniki badań modelowych i eksperymentalnych można sformułować następujące wnioski

1. Modelowanie procesów termicznych zachodzących w zwałowisku nie mogą być ograniczone wyłącznie do procesów zachodzących wewnątrz zwałowiska,
2. Wprowadzanie profili ciśnień całkowitych wyznaczonych z analizy przepływu wokół materiału nieprzepuszczalnego generuje zbyt wysokie gradienty ciśnień w stosunku do opływu materiału porowatego,
3. Parametry siatki (liczba elementów ich skośność itp.) mają istotny wpływ na jakość uzyskiwanych wyników w szczególności na wartości lokalnych stężeń składników mieszaniny,
4. Należy opracować metodologię pomiarów *in situ* parametrów składowanego materiału, takich jak przewodność cieplna λ , porowatość ε , współczynnik filtracji f ,
5. Wykonanie wielomiesięcznych pomiarów parametrów termicznych zwałowiska zdecydowanie ułatwiłoby proces analizy numerycznej.

Pracę wykonano w ramach pracy statutowej realizowanej w IMG PAN Kraków w roku 2007, finansowanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- 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 pogórnich*, Prace IMG, t. 7, nr 1-2, s. 135-151.

Numerical simulation of temperature and combustion gases distributions inside coal waste dumps

Abstract

The analysis of numerical simulation fire phenomena inside coal waste dump was presented in article. Discussed results are derived from 2D simulation of mass and energy exchange inside porous material of the dump. Full 3D analysis, for the sake of dimensions of the dump is hard to perform due to extremely long time of calculations. Presented case is an extension of previously executed work.

Keywords: mass and heat transfer inside porous media, coal waste dumps

Recenzent: Prof. dr hab. inż. *Wacław Trutwin*, IMG PAN, Kraków