

Jan Wachowicz , Tomasz Janoszek**

KOMPUTEROWE MODELOWANIE POŻARU TAŚMY PRZENOŚNIKOWEJ Z WYKORZYSTANIEM METODY CFD

Streszczenie

Powszechne stosowanie w kopalniach taśm przenośnikowych do transportu urobku stwarza zagrożenie powstania pożaru egzogenicznego i związanych z nim zagrożeń toksycznymi produktami spalania, jak również zakłóceń w procesie przewietrzania wyrobisk. W artykule przedstawiono badania nad prognozowaniem wpływu wybranych parametrów determinujących przebieg emisji produktów spalania powstających podczas pożaru taśm przenośnikowych z wykorzystaniem oprogramowania inżynierskiego CFD (Ansys-CFX). Omówiono podstawy i sposób uzyskiwania numerycznego rozwiązania analizowanego pożaru taśmy przenośnikowej, przedstawiono równania mechaniki płynów i termodynamiki wykorzystywane w badaniach ruchu powietrza w wyrobiskach górniczych, wspomaganych techniką komputerową CFD. Przedstawiono sposób opracowywania modelu geometrycznego badanego obiektu oraz sposób opracowania siatki numerycznej. Po zdefiniowaniu warunków brzegowych przedstawiono numeryczne rozwiązanie problemu w postaci wyników symulacji ilościowej i jakościowej zmian temperatury powietrza i gazów pożarowych oraz zmian stężenia tlenu i dwutlenku węgla na podstawie wybranych parametrów badań taśmy przenośnikowej za pomocą kalorymetru stożkowego (czas zapłonu, jednostkowa szybkość ubytku masy). Zaprezentowane w artykule możliwości modelowania pozwalają na stwierdzenie, że może być ono pomocne w prognozowaniu potencjalnych zagrożeń związanych ze stosowaniem taśm przenośnikowych w kopalniach.

Computer modelling of conveyer belt fire with taking advantage of CFD method

Abstract

Common application of conveyer belts in mines in order to output underground transport creates the hazard of exogenous fire development and related to it toxic combustion products as well as ventilation disturbances in the process of excavation ventilation. In this article research of prediction of the influence of selected parameters defining the course of combustion products emission arising during conveyer belt fire with taking advantage of CFD engineer software (Ansys-CFX). The bases and the way of obtaining numerical solution to analyzed conveyer belt fire have been discussed and liquid mechanics and thermodynamics equations have been presented. They are used in air movement tests in mining excavations aided by CFD computer technology. The way of tested object geometrical model has been presented as well as the way of numerical network elaboration. After defining boundary conditions the numerical solution to the problem in the form of quantitative and qualitative simulation results of air and fire gas temperature changes as well as oxygen and carbon dioxide concentration changes on the basis of selected parameters of conveyer belt tests with the aid of conic calorimeter (ignition time, unit defect mass speed). Presented in the article possibilities of modelling allow one to state that it may be helpful in prediction of potential hazards related to the application in mines of conveyer belts.

* Główny Instytut Górnictwa.

WPROWADZENIE

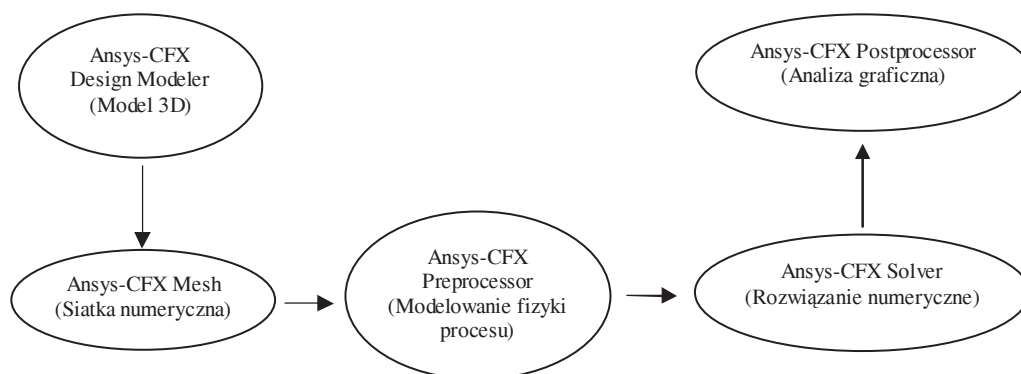
Szczególnie dużym zagrożeniem dla górników pracujących pod ziemią są pożary egzogeniczne, podczas których zapaleniu mogą ulec wszystkie palne materiały znajdujące się w kopalni, będące elementami maszyn górniczych lub spotykane w różnorodnych rozwiązaniach technicznych stosowanych w eksploatacji węgla (taśmy przenośnikowe, przewody i kable elektryczne, przewody hydrauliczne, lutnie elastyczne, tkaniny podsadzkowe, oleje mineralne, rury z tworzyw sztucznych, spoiwa organiczne itp.) (Wachowicz 2004).

Największą grupę wyrobów z materiałów organicznych, stosowanych w podziemnych wyrobiskach górniczych, stanowią taśmy przenośnikowe. Pomimo wymagań stosowania w kopalniach taśm trudno palnych i zaostzonych środków bezpieczeństwa, ciągle występuje zagrożenie pożarowe związane, np. ze skłonnością do samozagrzewania produktów ścierania bieżników gumowych taśm przenośnikowych (Wachowicz 2003, 2004). Pożary podziemne powodują zaburzenia w procesie przepływu mieszaniny powietrza i gazów pożarowych wzdłuż wyrobiska chodnikowego (Dziurzyński, Krawczyk 2001; Dziurzyński, Pałka 2001). Obecny stan wiedzy o sieci wentylacyjnej kopalni oraz współczesna technika komputerowa umożliwiają rozpatrywanie zjawisk zachodzących w kopalniach głębinowych w coraz szerszym zakresie (Dziurzyński 1998).

Do numerycznego rozwiązywania układów równań różniczkowych, tworzących model matematyczny procesów transportu w płynach, mogą być stosowane metody numerycznej mechaniki płynów CFD (*Computational Fluid Dynamics*), do których należy zaliczyć oprogramowanie Ansys-CFX. Należy podkreślić, że numeryczna mechanika płynów w zadowalającym stopniu uzupełnia podejście teoretyczne i eksperymentalne, ale nie zastępuje ich. Ponadto, ze względu na kosztowne badania eksperymentalne, stosowanie techniki komputerowej do analizy określonego zagadnienia, stwarza nowe wyzwania i możliwości dla współczesnej aerologii górniczej. Charakteryzując bardzo ogólnie metody CFD należy stwierdzić, że zamiast rozwiązania analitycznego, uzyskiwanego w mechanice teoretycznej, otrzymuje się rozwiązanie numeryczne, przechodząc od funkcji ciągłych do dyskretnych, co określa się mianem dyskretyzacji (Jaworski 2005).

W badaniach prognozowania wpływu wybranych parametrów determinujących przebieg emisji produktów spalania, powstających podczas pożarów egzogenicznych w kopalniach węgla kamiennego, został wykorzystany program Ansys-CFX. Ansys-CFX jest inżynierskim oprogramowaniem CFD, będącym na wyposażeniu Głównego Instytutu Górnictwa. Strukturę programu stanowią moduły, uszeregowane w kolejności zgodnej z wymaganym przepływem informacji, aby właściwie zdefiniować modelowane zagadnienie CFD, co schematycznie pokazano na rysunku 1 (Janoszek 2009).

Niezaprzeczalną zaletą techniki komputerowej jest niewielki koszt budowy modeli obiektów, łatwość modyfikacji oraz fakt uzyskiwania całych pól opływu, co upraszcza analizę badanego zagadnienia. Rola metod numerycznej mechaniki płynów stale wzrasta, czego dowodem jest obszerna literatura dotycząca metod obliczeniowych oraz organizowanie cyklicznych konferencji poświęconych tylko tym zagadnieniom (Jaworski 2005).



Rys. 1. Modelowanie zagadnienia w systemie Ansys-CFX

Fig. 1. Problem modelling in Ansys-CFX system

1. SYMULACJA ZAGROŻENIA POŻAROWEGO Z WYKORZYSTANIEM PROGRAMU ANSYS-CFX

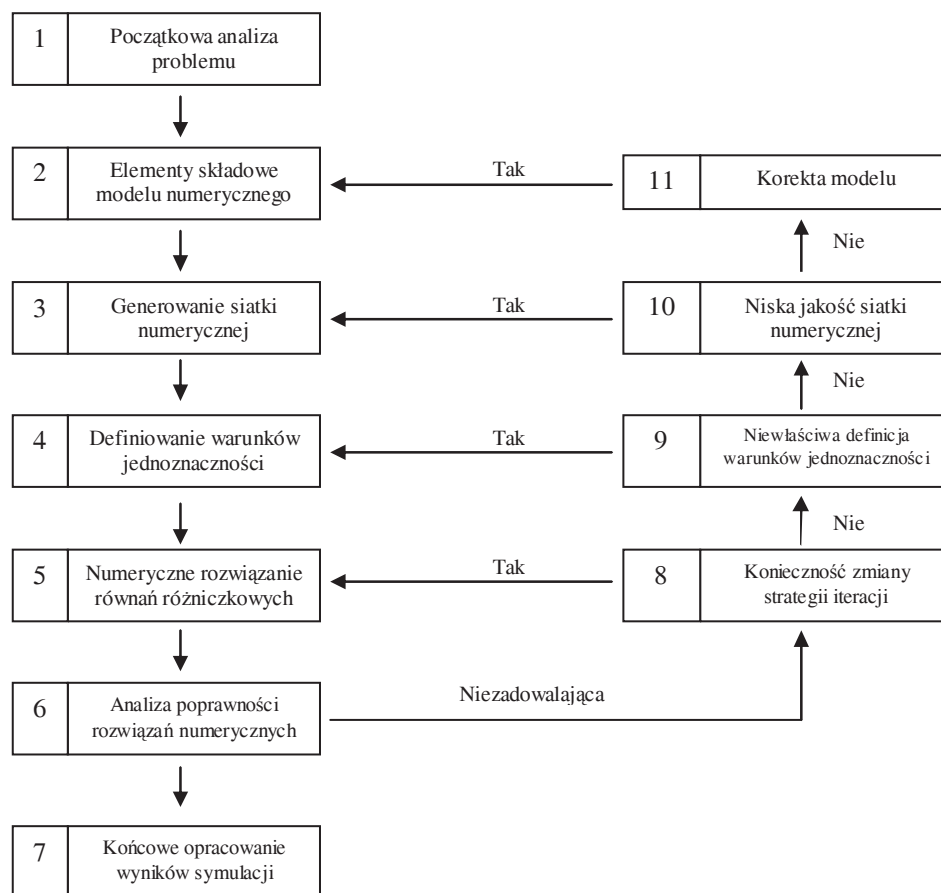
1.1. Opis badań numerycznych

Uzyskanie numerycznego rozwiązania w przypadku analizowanego pożaru od taśm przenośnikowych w programie Ansys-CFX, jest złożone i ustalone. Schemat jego podstawowych etapów przedstawiono na rysunku 2. Zgodnie z nim najpierw należy ustalić wszystkie wielkości występujące w złożonym obiekcie badań, takie jak:

- wielkości wejściowe obserwowalne, mierzalne i sterowalne, umożliwiające celowe oddziaływanie na obiekt badań – prędkość płynu na wlocie do badanego układu, właściwości fizyczne płynu, właściwości fizykochemiczne substancji palnej, geometria badanego obiektu, właściwości fizyczne ścian wyrobiska, czas zjawiska, schemat reakcji chemicznej spalania,
- wielkości wejściowe nieobserwowalne i niesterowalne, powodujące zakłócenie obiektu badań – straty ciepła przez konwekcję i promieniowanie,
- wielkości wyjściowe obserwowalne i mierzalne, które są rezultatem przyjętych wartości stałych, zakłóceń, zmiany stężenia tlenu i składników gazów pożarowych oraz zmian temperatury mieszaniny powietrza i gazów pożarowych.

Drugim etapem jest zdefiniowanie elementów składowych modelu numerycznego z wykorzystaniem modelu geometrycznego wyrobiska. Na określonych powierzchniach tworzących model, przyjmuje się warunki początkowe i brzegowe. Po zdefiniowaniu elementów składowych modelu numerycznego dokonuje się dyskretyzacji modelu geometrycznego przez wygenerowanie odpowiedniej siatki numerycznej o określonej gęstości komórek obliczeniowych, stanowiących otoczenie punktu, będących wierzchołkami wirtualnej siatki numerycznej. Po zdefiniowaniu warunków brzegowych i początkowych, jest realizowany proces numerycznego rozwiązania z zastosowaniem metody objętości skończonych. W efekcie końcowym uzyskuje się wartości zmiennych zależnych w dyskretnym zbiorze punktów, tworzących siatkę

numeryczną. Najważniejsza jest jednak interpretacja wyników rozwiązania i analizy pod kątem poprawności (etap 6), wymagających wiedzy z zakresu modelowania i zastosowanych metod numerycznych (Jaworski 2005).



Rys. 2. Etapy analizy numerycznej CFD (Jaworski 2005)

Fig. 2. Stages of CFD numerical analysis (Jaworski 2005)

W obliczeniach związanych z modelowaniem i obliczeniową analizą układów fizycznych należy się liczyć z dwoma podstawowymi rodzajami błędów, a mianowicie (Wojciech 1999):

- 1) popełnianymi przy matematycznym formułowaniu zagadnienia, wynikającymi z dwóch podstawowych powodów:
 - model matematyczny jest zazwyczaj przybliżeniem zjawiska fizycznego,
 - dane dotyczące obiektu fizycznego są niedokładne;
- 2) popełnianymi podczas wykonywania obliczeń; rozróżnia się:
 - błędy metody (błędy obcięcia),
 - błędy operacji arytmetycznych (zaokrąglenia).

1.2. Równania transportu w płynach

W większości publikacji poruszających problematykę transportu w płynach z wykorzystaniem techniki komputerowej CFD, zagadnienia związane z ruchem powietrza w wyrobiskach górniczych rozwiązuje się na podstawie równań mechaniki płynów i termodynamiki:

- równania zachowania masy

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

gdzie:

- ρ – lokalna gęstość płynu, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;
- v_i – liniowa prędkość płynu w i -tym kierunku przemieszczania, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;
- x_i – współrzędna przestrzenna położenia i -tej cząsteczki, m;

- równania zachowania ruchu

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_{v_i} \quad (2)$$

gdzie:

- v_i – liniowa prędkość płynu w i -tym kierunku przemieszczania, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;
- v_j – liniowa prędkość płynu w j -tym kierunku przemieszczania, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;
- τ_{ij} – składowa tensora naprężeń stycznych (wartość naprężenia stycznego), $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$;
- P – lokalna gęstość płynu, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;
- t – czas, s;
- x_i – współrzędna przestrzenna położenia i -tej cząsteczki, m;
- x_j – współrzędna przestrzenna położenia j -tej cząsteczki, m;
- S_{v_i} – składowa prędkości odkształceń i -tej cząsteczki, $\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$;

- równania zachowania energii

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j h)}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial t} + v_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{\text{Pr}} + \frac{\mu_t}{\text{Pr}} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right] + S_h \quad (3)$$

gdzie:

- h – entalpia właściwa, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$;
- m – dynamiczny współczynnik lepkości płynu, $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$;
- μ_t – turbulenta lepkość dynamiczna, $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$;
- Pr – bezwymiarowa liczba Prandtla;
- S_h – ilość generowanego ciepła na jednostkę objętości, $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$;
- t – czas, s;
- p – ciśnienie, Pa;
- x_j – współrzędna przestrzenna położenia j -tej cząsteczki, m;
- v_j – liniowa prędkość płynu w j -tym kierunku przemieszczania, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;

- równania reakcji chemicznej

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_j Y_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_i}{Sc_i} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \right] + \dot{\omega} \quad (4)$$

gdzie:

Sc – laminarna liczba Schmidta;

Sc_i – turbulentna liczba Schmidta;

$\dot{\omega}$ – strumień masy przez jednostkę objętości, $\text{kg} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$;

Y_i – udział molowy i -tego składnika;

- równania skalarnego

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_j \phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right] + S_\phi \quad (5)$$

gdzie:

ϕ – skalar ilościowy masy, uogólniona, skalarna zmienna intensywna;

S_ϕ – wyrażenie źródłowe w równaniach bilansowych transportu;

Γ – dynamiczny współczynnik dyfuzji (lepkość);

- równania stanu gazu

$$p = \rho RT \quad (6)$$

gdzie:

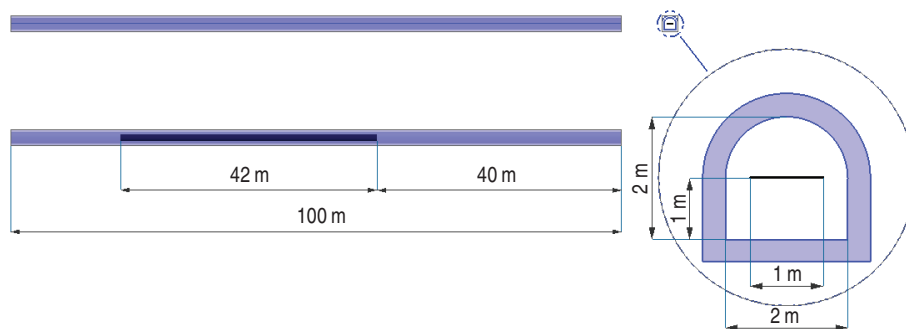
R – uniwersalna stała gazowa, $\text{J} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;

T – temperatura, K.

1.3. Model geometryczny obiektu opracowany w Ansys-Design Modeler

Przed przystąpieniem do analizy pożaru taśmy przenośnikowej z wykorzystaniem Ansys-CFX, należy przygotować model geometryczny, w skład którego wchodzi model bryłowy wyrobiska i model taśmy przenośnikowej. Do konstrukcji modelu można zastosować Ansys-Design Modeler. Model geometryczny przedstawiony na rysunku 3 został utworzony z podstawowych brył, takich jak: prostopadłościan, walec itp. Obecnie etap sporządzania modelu można uprościć przez zastosowanie operacji Boole'a na elementarnych bryłach przestrzennych definiowanych przez użytkownika. Większość preprocesorów umożliwia również import geometrii obiektu z programów CAD (Winkler 1997).

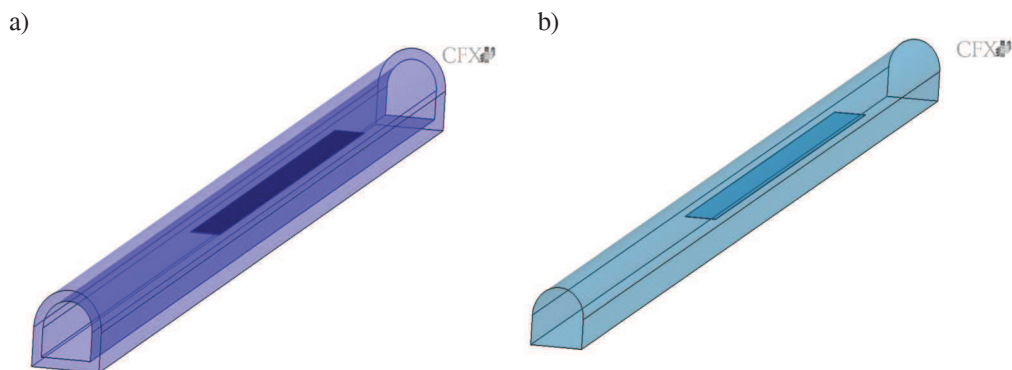
Opracowany model geometryczny (rys. 3) badanego obiektu odpowiada rzeczywistym wymiarom sztolni pożarowej zlokalizowanej w Łaziskach Średnich, pod względem wymiarów geometrycznych, struktury przepływu i głównych zjawisk towarzyszących, o czym szerzej w pracy (Wachowicz 2000).



Rys. 3. Wymiary geometryczne opracowanego modelu badanego układu

Fig. 3. Geometrical dimensions of elaborated tested system model

Proces tworzenia geometrycznego obszaru całkowania, a więc objętości zajmowanej przez płyn, uzyskano przez wyodrębnienie z gotowego modelu geometrycznego badanego obiektu (rys. 4) na podstawie operacji logicznych Boole'a całego zajmowanego obszaru, uzyskując w ten sposób model bryłowy, służący do opracowania siatki numerycznej.



Rys. 4. Etapy wyodrębniania elementu płynu do rozwiązania numerycznego CFD: a – model bryłowy obiektu, b – wyodrębniony model płynu

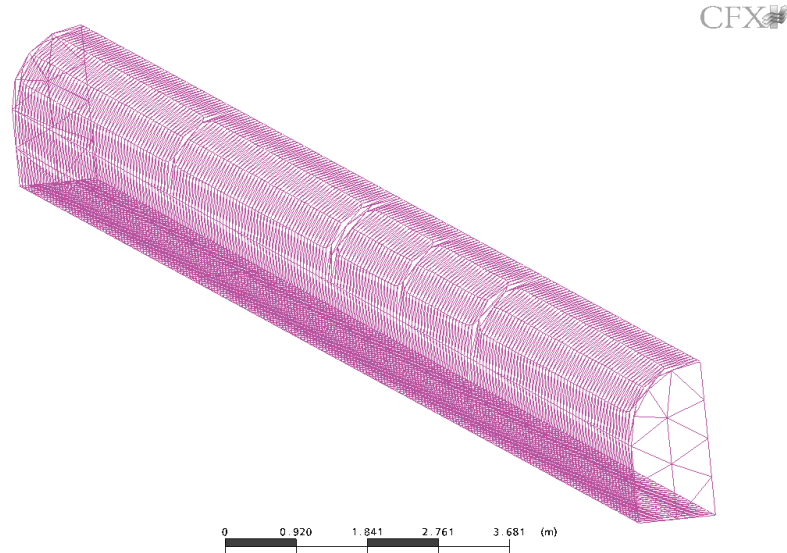
Fig. 4. Stages of liquid element isolation for the CFD numerical solution: a – solid object model, b – isolated model liquid

1.4. Generowanie siatki numerycznej w Ansys-CFX Mesh

Siatkę numeryczną tworzą węzły, w których są obliczane przybliżone wartości zmiennych zależnych, wiernie odwzorowujących obszar zajmowany przez płyn. Do tego celu wykorzystano specjalistyczny moduł przygotowania danych Ansys-CFX Mesh. Zastosowanie wspomnianego modułu pozwala na znaczne skrócenie łącznego czasu pracy użytkownika programu CFD potrzebnego do uzyskania numerycznego rozwiązania złożonych zagadnień transportu.

Poprawność wyników rozwiązania numerycznego zależy w głównej mierze od właściwego podziału modelu obiektu na układ elementów połączonych w węzłach.

W analizowanym przypadku zastosowano siatkę niestrukturalną, utworzoną z elementów geometrycznych, bazującą na trójkątach, zapewniającą uzyskanie komórki obliczeniowej o foremnych kształtach i jednakowej wielkości. Efekty wygenerowanej siatki numerycznej przedstawiono na rysunku 5. Z uwagi na oszczędność niezbędnej mocy obliczeniowej komputera, dokonano podziału modelu bryłowego płynu płaszczyzną wzdłuż modelu, stanowiącą odbicie zwierciadlane (Jaworski 2005; Janoszek 2009).



Rys. 5. Wygenerowana siatka niestrukturalna do opracowanego modelu bryłowego płynu – składająca się z 3816 punktów węzłowych połączonych 12 408 odcinkami prostymi

Fig. 5. Generated non-structural network for solid liquid model elaboration that consists of 3816 nodal points linked with 12 408 straight sections

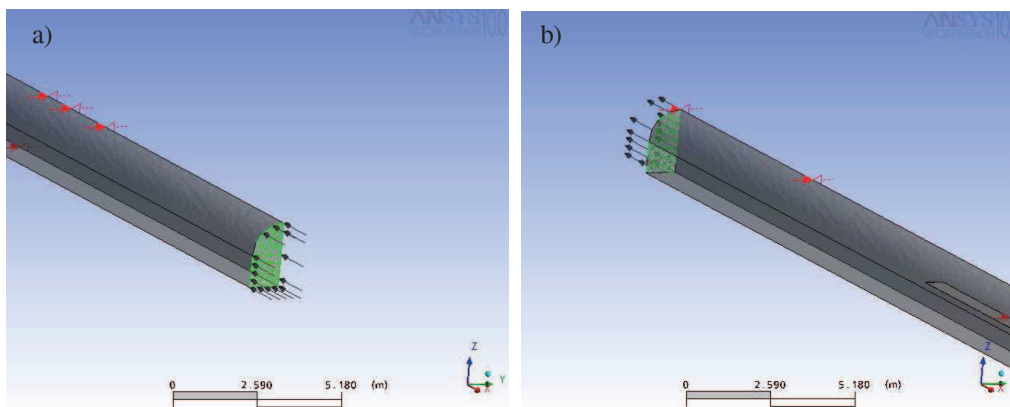
Przed przystąpieniem do opracowywania siatki numerycznej należy kierować się odpowiednimi zasadami, a mianowicie siatka numeryczna powinna wiernie odtwarzać cały obszar zajmowany przez płyn, przez zapewnienie odpowiedniej smukłości kształtu i jednakowej wielkości komórki obliczeniowej, mając na uwadze uzyskanie kompromisu między stopniem szczegółowości a liczbą węzłów w siatce numerycznej.

Dokładność uzyskanego rozwiązania numerycznego w głównej mierze zależy od gęstości siatki numerycznej oraz kształtu poszczególnych elementów geometrycznych odwzorowujących model bryłowy. Zagęszczenie siatki numerycznej gwarantuje zwiększenie dokładności obliczeń w wyniku aproksymowania funkcji na krótszych odcinkach, kosztem zwiększenia czasu niezbędnego do przeprowadzenia obliczeń (Jaworski 2005; Janoszek 2009).

1.5. Realizacja warunków brzegowych i początkowych w module Ansys-CFX Preprocessor

W celu przeprowadzenia analizy pożaru wywołanego przez taśmy przenośnikowe należy zdefiniować i wprowadzić warunki brzegowe oraz początkowe warunki geometryczne. Jest to jeden z ważniejszych etapów stosowania metody CFD, gdyż jakość warunków początkowych i brzegowych ma duży wpływ na jakość uzyskiwanego rozwiązania numerycznego.

W analizowanym zagadnieniu ograniczono się do zdefiniowania standardowych zestawów warunków brzegowych. Najpierw zdefiniowano warunki brzegowe „wlot” (*inlet*) oraz „wylot” (*outlet*) określane mianem warunku brzegowego typu „płyn”. W tym celu z modelu płynu wydzielono powierzchnie, które w systemie Ansys-CFX są określane regionami (*composite regions*), schematycznie przedstawione na rysunku 6. Powierzchnie te są uznawane w systemie za granice, na których definiuje się wybrane wielkości wejściowe mierzalne i obserwowalne. Na granicy typu wlot (rys. 6a) zdefiniowano całkowite warunki brzegowe, czyli prędkość powietrza na wlocie $1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, temperaturę powietrza 25°C ($298,15 \text{ K}$), stężenie tlenu O_2 oraz dwutlenku węgla CO_2 w powietrzu dopływającym. Dla granic typu wylot (rys. 6b) przyjęto stałe ciśnienie statyczne oraz zerowe gradienty wszystkich zmiennych zależnych, prostopadłych do tej powierzchni (Jaworski 2005; Janoszek 2009).



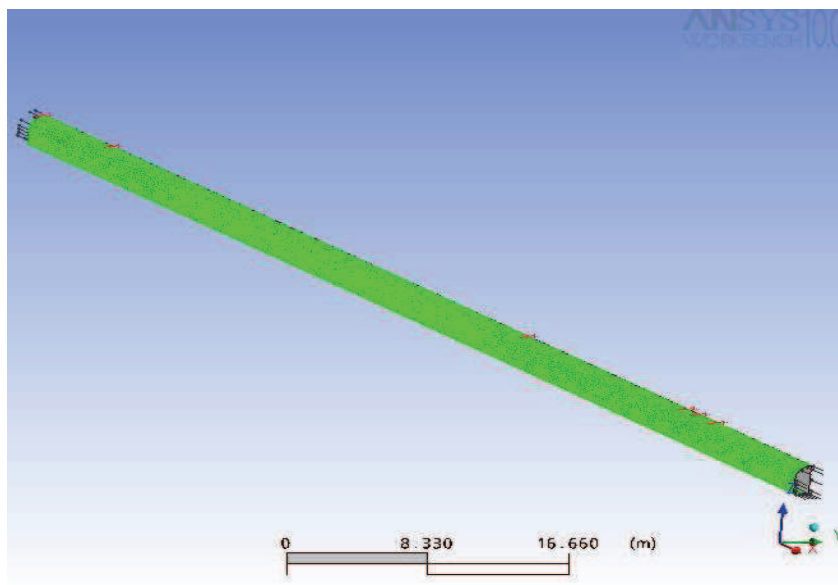
Rys. 6. Wyodrębnione elementy składowe modelu numerycznego: a – warunek brzegowy typu wlot, b – warunek brzegowy typu wylot

Fig. 6. Isolated numerical model constituent elements: a – boundary condition of input type, b – boundary condition of outlet type

Kolejnym warunkiem brzegowym przyjętym w systemie był brzeg typu „krawędzie i powierzchnie symetrii” (rys. 5). W tym przypadku wykorzystano warunek symetrii modelu (geometryczne odbicie zwierciadlane) oraz podobne relacje uzyskiwanych wyników już na etapie rozwiązywania numerycznego (Jaworski 2005; Janoszek 2009).

Ostatnią deklarowaną granicą w programie Ansys-CFX był brzeg typu „ściana” przedstawiony na rysunku 7, a odzwierciedlający granicę ciała stałe – płyn. W przy-

padku tej granicy wykorzystano warunek braku poślizgu płynu lepkiego (w programie Ansys-CFX ukryta pod opcją *no slip*), zakładając, że przebieg zmian dwóch składowych prędkości płynu względem ściany równoległej ma wartość zero ($u_n = 0$), a względem normalnej ($u_p \neq 0$) – różną od zera, przy czym prędkość obu tych składowych dla warstwy płynu nieskończenie blisko ściany jest równa zero (Jaworski 2005).



Rys. 7. Wyodrębniony element składowy modelu numerycznego dla warunku brzegowe typu „ściana”

Fig. 7. Isolated numerical model constituent element for boundary condition of “wall” type

Uwzględniono następujące warunki początkowe, niezmiennie dla wszystkich obliczeń numerycznych w Ansys-CFX, a mianowicie (Janoszek 2009):

- stan ustalony,
- płyn zastosowany w obliczeniach: powietrze traktowane jako gaz doskonały (brak danych dla gazu rzeczywistego),
- model wymiany ciepła: równanie bilansu energii,
- model reakcji i spalania: *Eddy Dissipation*,
- model turbulencji: *k-epsilon*,
- liczba iteracji: 100,
- krok czasowy zjawiska: 36 s,
- energia aktywacji: *reakcja termooksydacji polichloroprenu*



- przedział czasu zjawiska: 3600 s,
- chropowatość względna górotworu: 0,1 m,
- zbieżność obliczeń: $1 \cdot 10^{-4}$.

Pozostałe ustawienia są automatyczne.

W przypadku większej liczby iteracji sytuacja nie ulegała zmianie, a jedynie wydłużał się czas obliczeń.

Podsumowując, rozpatrzono następujące warunki brzegowe dla każdego przypadku obliczeń:

- prędkość i temperaturę powietrza na wlocie: $v_0 = 1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $T_0 = 298,15 \text{ K}$,
- ciepło właściwe powietrza: $1005 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,
- udział molowy tlenu w powietrzu dopływającym do pożaru: 0,2095,
- uwzględniono wymianę ciepła przez ściany wyrobiska.

W każdym analizowanym przypadku osobno uwzględniono dwa parametry, tj. szybkość ubytku masy i czas upływający do zapłonu badanej próbki taśmy przenośnikowej, charakteryzujące zachowanie się badanego materiału organicznego podczas pożaru, które zostały wyznaczone za pomocą kalorymetru stożkowego. Uzyskane wartości tych parametrów dla próbki taśmy przenośnikowej, oznaczonej symbolem 69/97, były wynikiem badań zawartych w publikacji (Wachowicz 2000); wyniki tych badań zamieszczono w tabelicy 1.

Tablica. 1. Wyniki badania palności metodą kalorymetru stożkowego próbki 69/97 – natężenie promieniowania $50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ i $75 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$

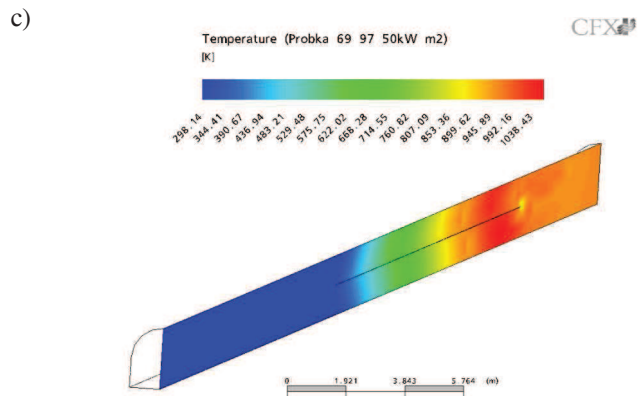
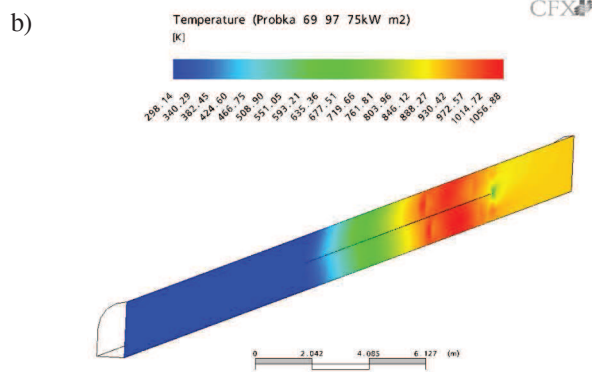
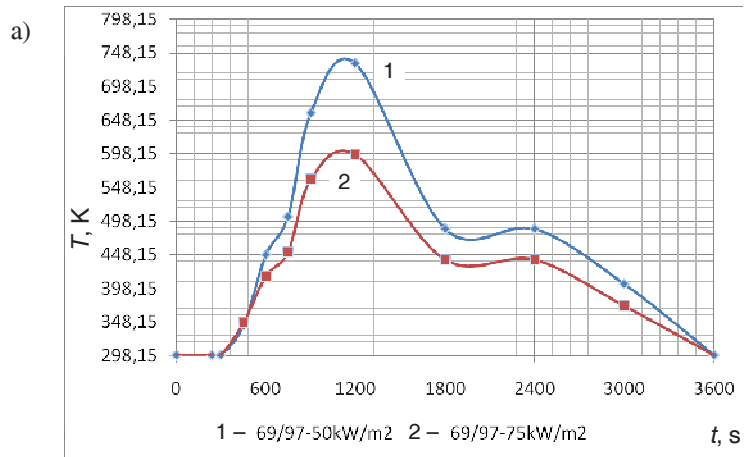
Parametr pomiaru	Wartość średnia z trzech pomiarów	
	69/97	
	$50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$	$75 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$
Czas zapłonu t_i , s	51,14	17,89
Jednostkowa szybkość ubytku masy $k_{c,i}$, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	5,01	5,49

1.6. Rozwiązanie numeryczne w module Ansys-CFX Postprocessor

Ostatnim etapem było uzyskanie rozwiązania numerycznego na obszarze dyskretyzacji, którą stanowi wygenerowana siatka numeryczna. Proces ten przeprowadzono w module Ansys-CFX Solver Manager.

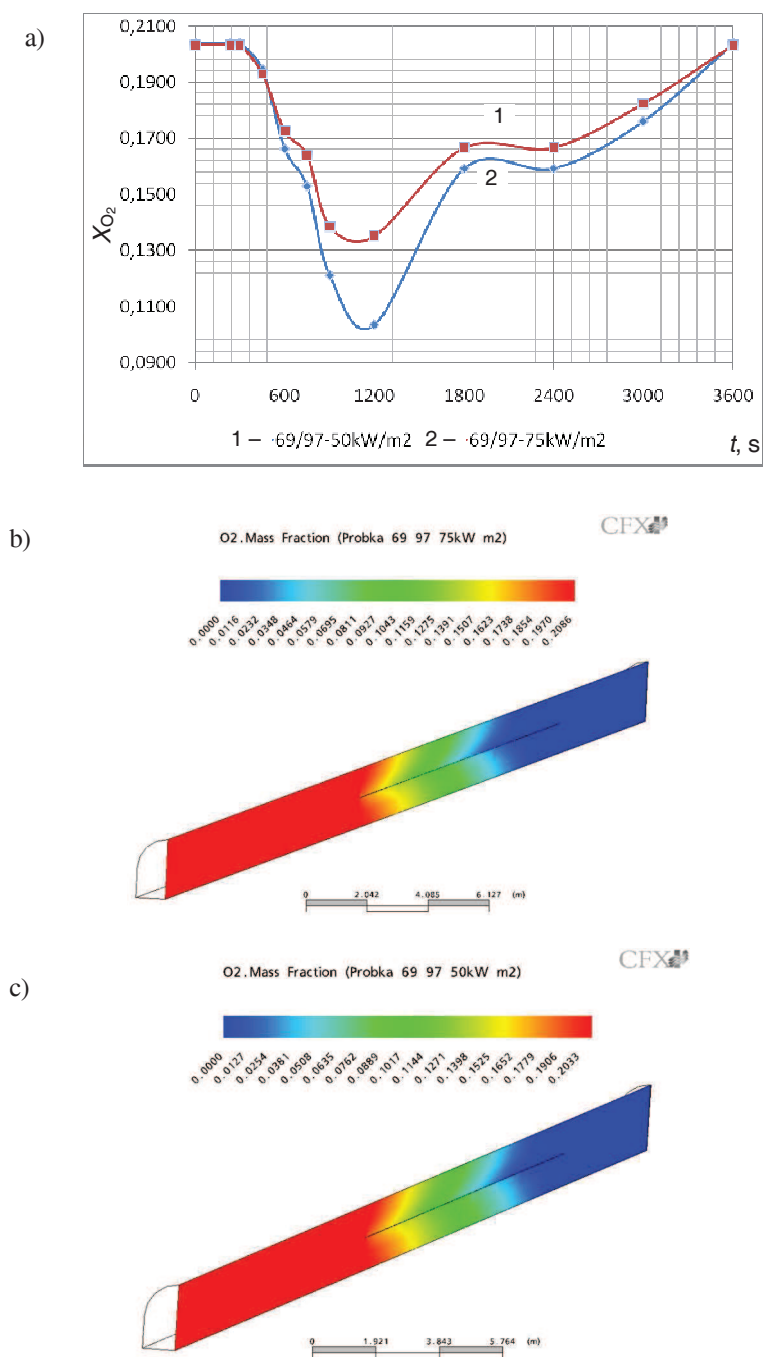
Na rysunkach 8–10 przedstawiono wyniki symulacji ilościowej i jakościowej zmian temperatury mieszaniny powietrza i gazów pożarowych oraz zmian stężenia tlenu i dwutlenku węgla, emitowanych do przepływającego powietrza niezależnego, w wyniku reakcji termooksydacji na podstawie wyników badań kalorymetrem stożkowym dla wybranej próbki taśmy przenośnikowej, uzyskane w module Ansys-CFX Postprocessor.

Po uzyskaniu wyniku analizy jakościowej bardzo istotne jest, aby należycie oszacować dokładność symulacji i uwzględnić ją w interpretacji uzyskanych rozwiązań. W analizie poprawności rozwiązania ważne jest uwzględnienie możliwości wpływu innych błędów, w szczególności wynikających ze sposobu przekształcania danych w punktach dyskretyzacji na analizowane obrazy (Jaworski 2005).



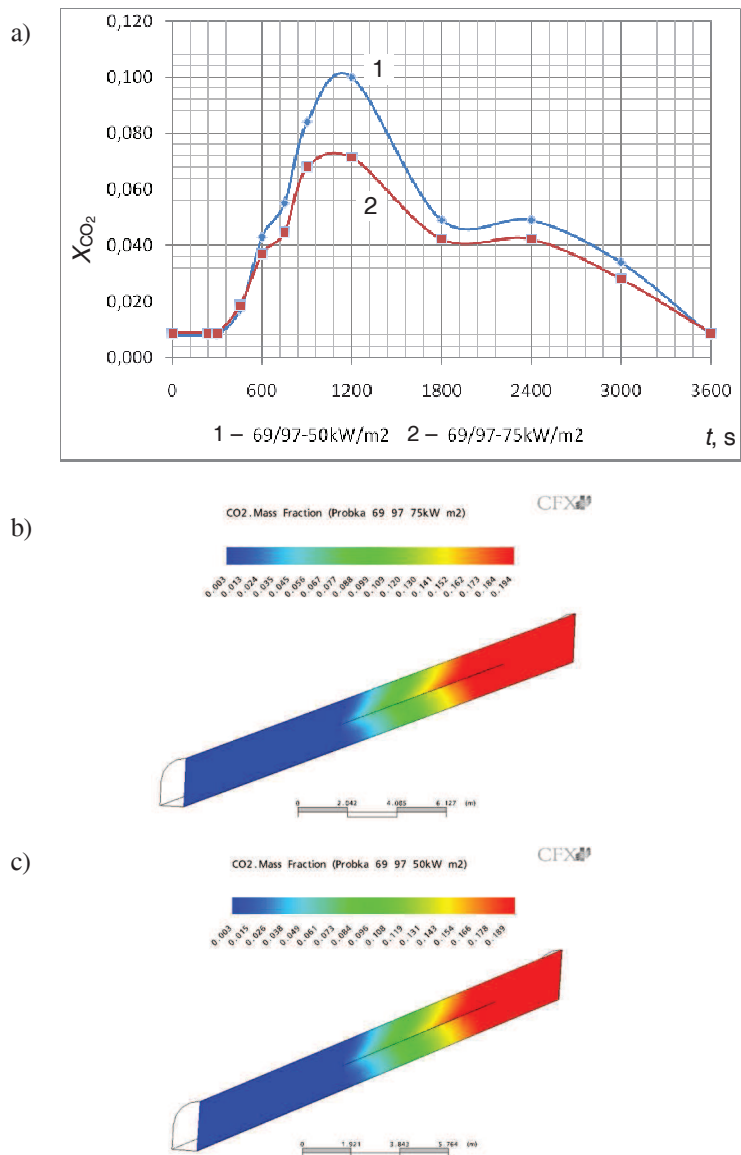
Rys. 8. Charakterystyka ilościowa (a) i jakościowa (b, c) zmian temperatury mieszaniny powietrza i gazów pożarowych: 1 – gęstość strumienia ciepła 75 kW·m⁻², 2 – gęstość strumienia ciepła 50 kW·m⁻²; t – czas, T – temperatura

Fig. 8. Quantitative (a) and qualitative (b, c) characteristic of changes of fire gases and air mixture: 1 – density of heat stream 75 kW·m⁻², 2 – density of heat stream 50 kW·m⁻²; t – time, T – temperature



Rys. 9. Charakterystyka ilościowa (a) i jakościowa (b, c) zmian udziału molowego tlenu X_{O_2} : 1 – gęstość strumienia ciepła $75 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, 2 – gęstość strumienia ciepła $50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$; t – czas

Fig. 9. Quantitative (a) and qualitative (b, c) characteristic of changes of X_{O_2} molar oxygen participation: 1 – density of heat stream $75 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, 2 – density of heat stream $50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$; t – time



Rys. 10. Charakterystyka ilościowa (a) i jakościowa (b, c) zmian udziału molowego dwutlenku węgla X_{CO_2} :
 1 – gęstość strumienia ciepła 75 kW·m⁻², 2 – gęstość strumienia ciepła 50 kW·m⁻²; t – czas

Fig. 10. Quantitative (a) and qualitative (b, c) characteristic of changes of X_{CO_2} carbon dioxide molar participation:
 1 – density of heat stream 75 kW·m⁻², 2 – density of heat stream 50 kW·m⁻²; t – time

WNIOSKI

Opisane możliwości modelowania i wizualizacji w programie Ansys-CFX potencjalnych symulowanych zagrożeń, jakie towarzyszą pożarowi taśm przenośnikowych, pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- uzyskane metodami rozwiązania numerycznego wartości zmiennych wyjściowych pozwalają na prostą i łatwą interpretację zachodzących zjawisk i mogą być pomocne przy prognozowaniu zagrożeń związanych ze stosowaniem w kopalniach taśm przenośnikowych,
- wykorzystanie metody numerycznej mechaniki płynów CFD stanowi uniwersalne narzędzie ułatwiające analizowanie zagrożeń związanych z eksploatacją taśm przenośnikowych przez ilościowe i jakościowe prognozowanie podstawowych parametrów bezpośrednio determinujących dynamikę pożaru,
- metoda CFD nie zastępuje w pełni podejścia eksperymentalnego, a stanowi jedynie jego uzupełnienie, gdzie w miejsce rozwiązań analitycznych uzyskuje się przybliżone rozwiązanie numeryczne,
- przedstawiona metoda może przyczynić się, w znaczący sposób, do skrócenia czasu i obniżenia kosztów prognozy wystąpienia zagrożeń związanych z pożarami egzogenicznymi.

Literatura

1. Dziurzyński W. (1998): Prognozowanie procesu przewietrzania kopalni głębinowej w warunkach pożaru podziemnego. Kraków, Wydaw. Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN z. 56.
2. Dziurzyński W., Krawczyk J. (2001): Nieustalony przepływ gazów pożarowych w kopalnianej sieci wentylacyjnej – symulacja numeryczna. Archives of Mining Sciences vol. 46, issue 2.
3. Dziurzyński W., Pałka T. (2001): Komputerowa symulacja wpływu pożaru podziemnego na rozkład potencjału sieci wentylacyjnej kopalni. Archives of Mining Sciences vol. 46, issue 2.
4. Edwards J.C., Hwang C.C. (1999): CFD Analysis on mine fire smoke spread and reverse flow conditions. Proceedings of the Eighth U.S. Mine Ventilation Symposium. Tien J.C., ed. Rolla, MO, University of Missouri-Rolla Press, s. 417–422.
5. Janoszek T. (2009): Model pożaru taśm przenośnikowych w wyrobiskach chodnikowych kopalń. Praca doktorska. Katowice, GIG.
6. Jaworski Z. (2005): Numeryczna mechanika płynów w inżynierii chemicznej i procesowej. Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT.
7. Wachowicz J. (2000): Palność taśm przenośnikowych jako czynnik zagrożenia pożarowego w kopalniach węgla kamiennego. Prace Naukowe GIG nr 843.
8. Wachowicz J., Wypiór K. (2003): Samozagrzewanie produktów ścierania okładek gumowych taśm przenośnikowych. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko nr 4.
9. Wachowicz J. (2004): Zarządzanie bezpieczeństwem pracy w górnictwie, część 13: Zagrożenie pożarowe związane ze stosowaniem w kopalniach materiałów niemetalowych pochodzenia organicznego. Wiadomości Górnicze nr 9.
10. Wachowicz J., Wypiór K. (2004): Samozagrzewanie startego bieżnika taśm przenośnikowych – zagrożenie pożarowe. Materiały XII Międzynarodowego Sympozjum pt. „Nowe rozwiązania i doświadczenia w budowie i bezpiecznej eksploatacji urządzeń kompleksowej odstawy urobku przenośnikami taśmowymi”, Zakopane.
11. Winkler T. (1997): Wspomaganie komputerowe CAD/CAM. Warszawa, WNT.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Adam Lipowczan