

Obciążenie cieplne układu wylotowego górniczych napędów spalinowych w aspekcie zastosowania reaktora katalitycznego

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki symulacji numerycznych, z wykorzystaniem metod CFD (Computational Fluid Dynamics), przepływu spalin przez reaktor katalityczny zabudowany w układzie wylotowym górniczego napędu spalinowego. Symulacje przeprowadzono pod kątem analizy wpływu zabezpieczenia temperaturowego powierzchni zewnętrznych układu na rozkład temperatury w rdzeniu katalitycznym.

Summary

The results of numerical simulation of exhaust gases flow through catalytic reactor installed in the exhaust system of mining diesel drive, using the Computational Fluid Dynamics method is presented in the paper. The simulation was made to analyze impact of protection against excessive temperature of external surface of the system on temperature distribution in catalytic core.

1. Wstęp

Silniki spalinowe są powszechnie stosowane w kopalniach węgla kamiennego. Zastosowanie ich w warunkach dołowych nie jest obojętne dla atmosfery kopalnianej, gdyż emitowane do niej toksyczne składniki zawarte w spalinach stanowią zagrożenie dla zdrowia pracowników. Należy podkreślić, że górnicze napędy spalinowe pracują w przestrzeniach o ograniczonej kubaturze, korzystając przy tym z tego samego zasobu powietrza, z jakiego korzysta załoga górnicza. Emitowane przez napędy spalinowe związki toksyczne unoszone są z prądem powietrza w kierunku szybu wylotowego, przemierzając wyrobiska korytarzowe oddziałują szkodliwie na pracującą tam załogę. Ekspozycja załóg górniczych na szkodliwe substancje zawarte w spalinach szeroko poruszana jest w literaturze [1, 5, 6].

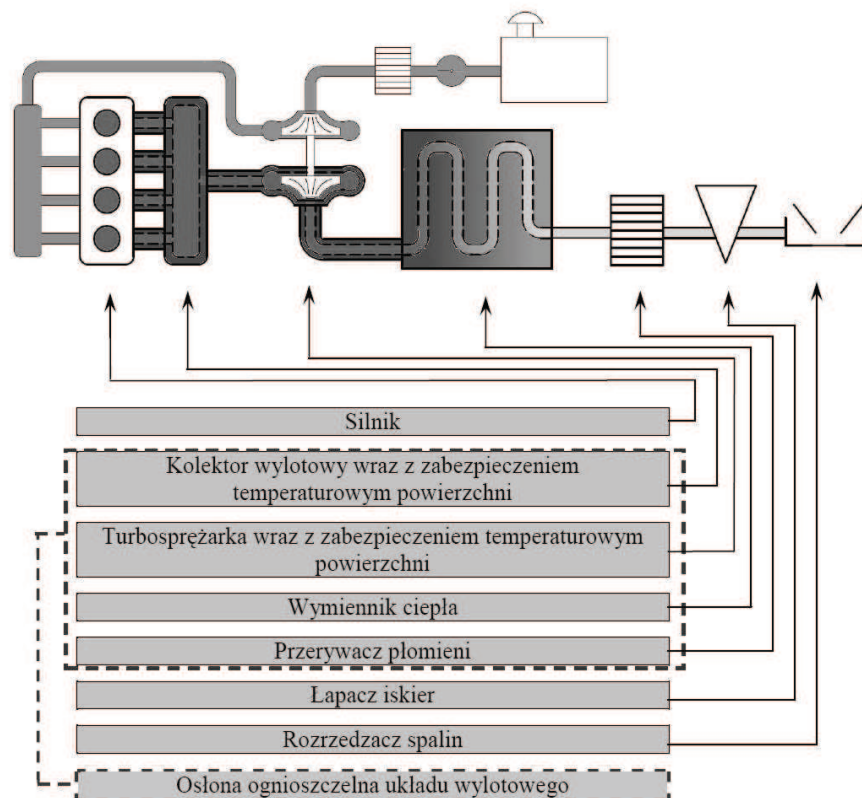
Zespołem odpowiedzialnym za odprowadzenie spalin z silnika do otaczającej atmosfery jest układ wylotowy. Zmniejszenie skutków negatywnego oddziaływania spalin na środowisko kopalniane jest możliwe poprzez wprowadzenie zmian konstrukcyjnych w tym układzie. Zmiany nie mogą jednakże wpływać negatywnie na podstawowe funkcje bezpieczeństwa, jakie spełnia układ wylotowy eksploatowany w przestrzeniach zagrożonych atmosferą wybuchową [2].

W poniższym artykule przedstawiono analizę oraz obliczenia numeryczne obciążenia cieplnego układu wylotowego górniczego napędu spalinowego pod kątem możliwości zabudowy reaktora katalitycznego w części ognioszczelnej układu.

2. Wymagania dotyczące układ wylotowego górniczego napędu spalinowego

W skład układu wylotowego wchodzi elementy odprowadzające spaliny. Układ taki powinien być wyposażony w przerywacz płomieni oraz łapacz iskier. Maksymalna wartość temperatury powierzchni zewnętrznych układu wylotowego, znajdujących się w atmosferze kopalnianej i występowania palnego pyłu, w najbardziej niekorzystnych warunkach pracy nie powinna przekraczać 150°C. Wymóg ten dotyczy również temperatury spalin bezpośrednio za przerywaczem płomieni. W przypadku eksploatacji urządzenia w wyrobiskach podziemnych, w których nie występuje pył palny, maksymalna temperatura powierzchni i spalin, nie powinna przekraczać 450°C. W przypadku kopalń węgla kamiennego pył węglowy znajduje się praktycznie w każdym wyrobisku kopalnianym, co stwarza wymóg, aby maksymalna temperatura nie przekraczała 150°C. Część układu wylotowego pomiędzy przerywaczem płomieni, a silnikiem powinna spełniać dodatkowo wymagania dotyczące osłony ognioszczelnej.

Osłona ognioszczelna powinna być zaprojektowana zgodnie z wymaganiami dotyczącymi gazu grupy I, określonymi w normie EN 50014:1997. Przepisy dotyczące napędów spalinowych wymagają również, aby układ wylotowy wyposażony był na swym końcu w zespół powodujący rozrzedzenie spalin. Na rysunku 1 przedstawiono elementy układu wylotowego górniczego napędu spalinowego.



Rys.1. Elementy układu wylotowego górniczego napędu spalinowego [3]

W górnich napędach spalinowych stosowane są dwa rodzaje wymienników ciepła. Pierwszym jest „Mokry wymiennik ciepła” (płuczka wodna), w którym spaliny mają bezpośredni kontakt z czynnikiem chłodzącym. W wymienniku tym woda odbiera spalynom dużą ilość energii w postaci ciepła parowania, co z punktu widzenia teoretycznego jest najbardziej efektywnym sposobem wykorzystania wody, gdyż jej ciepło parowania jest bardzo duże - wynosi 2250 kJ/kg, gdy dla porównania przy chłodzeniu obiegowym zdolność absorbowania ciepła przez wodę nie przekracza 40 kJ/kg [4]. Niedogodność w stosowaniu płuczki wodnej związana jest z ciągłym ubytkiem wody, którą należy cyklicznie uzupełniać. Strumień ciepła przejęty od spalin na odparowanie wody w płuczce można wyznaczyć z prostej zależności:

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_s \cdot c_{ps} \cdot (t_{s2} - t_{s1}) \quad (1)$$

gdzie:

- Q_s – strumień ciepła [J/s],
- m_s – natężenie przepływu spalin [kg/s],
- c_{ps} – ciepło właściwe spalin [J/(kg·K)],
- t_{s2}, t_{s1} – temperatury spalin na wejściu, wyjściu [°C].

Przykładowo dla silnika stosowanego w górnich napędach spalinowych o mocy 81 kW, przy maksymalnym momencie obrotowym, ciepło jakie należy odebrać spalynom wynosi $Q_s = 99827$ kJ/h, co

odpowiada ilości odparowanej wody równej $r = 44$ kg/h. W rzeczywistości ubytek wody, nie tylko odparowanej, ale i „wypchanej” z płuczki ciśnieniem spalin, może się różnić od teoretycznego ze względu na konstrukcję i miejsce zabudowy płuczki oraz zmienny charakter pracy napędu spalinowego. Ze względów bezpieczeństwa wymagane jest stałe monitorowanie poziomu wody tak, aby poziom minimalny nie został przekroczony, co jest utrudnione ze względu na burzliwy przepływ spalin przez płuczki. Niedogodności te powodują, że coraz powszechniej spotykanym rozwiązaniem obniżenia temperatury spalin jest zastosowanie „suchego wymiennika ciepła” (drugi rodzaj wymiennika), w którym przepływ ciepła od spalin do czynnika chłodzącego następuje poprzez przegrodę rozdzielającą oba czynniki. W takim układzie czynnik chłodzący krąży w obiegu zamkniętym, pobierając ciepło od spalin w układzie suchego wymiennika ciepła i oddając go do otaczającego powietrza poprzez chłodnicę, przez którą przepływ powietrza wymuszony jest wentylatorem.

Końcowym elementem osłony ognioszczelnej jest przerwywacz płomieni, który wykorzystuje gaszące własności szczeliny powietrznej. Dopuszcza się również stosowanie przerwywaczy wodnych, jednakże w wyniku analogicznych utrudnień, jakie spotykane są w przypadku płuczki wodnej, nie są stosowane. Łapacz iskier zabudowany za przerwywaczem płomieni ma za zadanie zabezpieczenie przed gorącymi cząstkami. Wyróżniamy suche oraz mokre łapacze iskier. Suche

łapacze iskier mogą być typu zbierającego oraz gaszącego. Przedstawiony opis elementów układu wylotowego górniczego napędu spalinowego wskazuje, że w przypadku eliminacji wad płuczki wodnej, związanej z ubytkiem wody oraz pomiarem jej poziomu, mogłaby ona dodatkowo pełnić funkcję przerywacza płomieni oraz łapacza iskier.

3. Układ wylotowy z reaktorem katalitycznym oraz suchym wymiennikiem ciepła

Wprowadzenie zmian lub zastosowanie dodatkowych zespołów w obrębie osłony ognioszczelnej układu wylotowego, takich jak suchy wymiennik ciepła oraz reaktor katalityczny wymagają przeprowadzenia obliczeń obciążenia termicznego tych elementów.

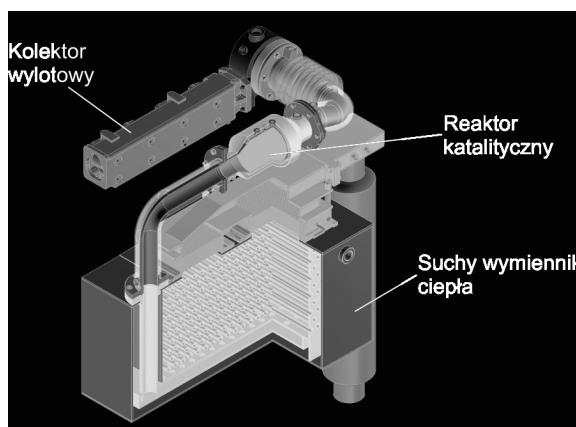
Na rysunku 2 przedstawiano model przestrzenny układu wylotowego z suchym wymiennikiem ciepła oraz zabudowanym reaktorem katalitycznym.

Opracowanie postaci konstrukcyjnej, która spełniała kryteria ciepłno-wytrzymałościowe wiąże się z wykonaniem wielu analiz. Przeprowadzenie analizy dla

pojedynczego przypadku można wykonać w oparciu o badania stanowiskowe, obliczenia analityczne lub obliczenia numeryczne. W zależności od złożoności zadania dobiera się odpowiednią metodę. W tabeli 1 przedstawiono wady i zalety stosowanych metod.

Jak wynika z przedstawionych danych w tabeli 1 przeprowadzenie badań stanowiskowych na modelu rzeczywistym daje najdokładniejsze wyniki, lecz czas realizacji i koszt badań nie pozwalają, aby stosować je dla każdej, prototypowej postaci konstrukcyjnej. Alternatywą są obliczenia numeryczne, dzięki którym możliwe jest przeprowadzenie obliczeń w dość krótkim czasie, nawet dla bardzo skomplikowanych geometrii. Algorytmy, które opisują rzeczywiste zjawiska, zawarte w dedykowanych programach, są coraz lepiej opisane i pozwalają na poprawne odwzorowanie rzeczywistych zjawisk. Najbardziej rozpowszechnionym do przeprowadzania obliczeń CFD (Computational Fluid Dynamics), w którym możliwa jest symulacja przepływu płynów i gazów oraz wymiany ciepła jest program Ansys Fluent.

Umożliwia on przeprowadzanie obliczeń dla różnych rodzajów przepływów w warunkach ustalonych



Rys.2. Model przestrzenny układu wylotowego [3]

Metody przeprowadzenia badań

Tabela 1

Metoda	Zalety	Wady
Badania stanowiskowe	Dokładne wyniki badań	Długi czas badania jednego wariantu, koszt wytworzenia modelu i przeprowadzenia badań
Obliczenia analityczne	Szybkość obliczeń	Obliczenia obarczone dużym błędem, ze względu na zastosowanie uproszczeń.
Obliczenia numeryczne	Szybkość i wielowariantowość obliczeń	Dla skomplikowanych modeli wymagana walidacja na obiekcie rzeczywistym

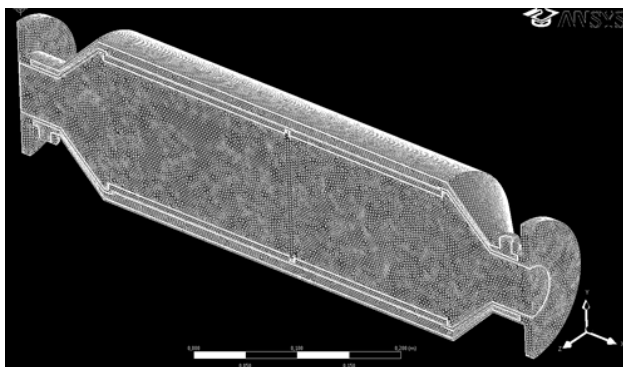
Dane wejściowe do modelu [7]

Tabela 2

Nazwa	Wartość	Jednostka
Natężenie przepływu spalin	364,8	kg/h
Natężenie przepływu wody	126	l/min
Temperatura spalin	550	°C
Temperatura wody	80	°C

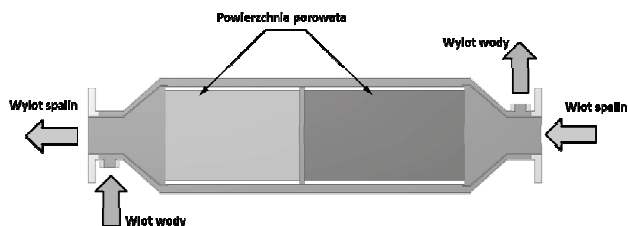
i nieustalonych dla przepływów nielepkich, laminarnych i turbulentnych oraz przepływów newtonowskich i nienewtonowskich. Przy włączonym równaniu energii możliwe jest również określenie transportu ciepła.

Do modelowania zjawisk zachodzących w reaktorze katalitycznym wykorzystano dla stanu ustalonego model turbulentny k-epsilon, włączono równanie energii i zamodelowano warstwę wewnątrz reaktora, jako warstwę porowatą, aktywując opcję porus media. W obliczeniach nie uwzględniono reakcji chemicznych zachodzących w reaktorze. Siatkę numeryczną wykonano w programie Ansys Mesh. Zbudowano model numeryczny reaktora katalitycznego dla połowy modelu geometrycznego, zakładając płaszczyznę symetrii wzdłuż przepływu spalin i wody (rysunek 3).



Rys.3. Model numeryczny reaktora katalitycznego [7]

Poniżej przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych reaktora dla punktu pracy napędu spalinowego o teoretyczne maksymalnych parametrach strumienia spalin. Dane wejściowe do obliczeń przedstawiono w tabeli 2. Warunki brzegowe przypisane do modelu przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Warunki brzegowe dla modelu reaktora katalitycznego [7]

Na podstawie danych wejściowych zawartych w tabeli 2, wyznaczono na podstawie wzoru (2) prędkość przepływu spalin i wody. Ponadto, na podstawie wzorów (3, 4) wyznaczono liczbę Reynoldsa oraz współczynniki turbulencji.

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2)$$

gdzie:

- m – natężenie przepływu [kg/s],
- ρ – masa własna (gęstość) [kg/m³],

A – pole przekroju [m²].

$$Re_e = \frac{v \cdot D}{\nu} = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu} \quad (3)$$

gdzie:

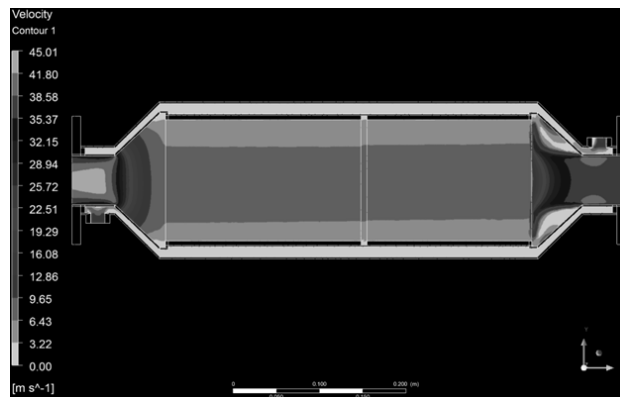
- v – prędkość przepływu [m/s],
- D – średnica wlotu [m],
- ν – lepkość kinematyczna [m²·s⁻¹],
- μ – lepkość dynamiczna [kg/ms],
- ρ – masa własna (gęstość) [kg/m³].

$$I = 0,16(Re_{DH})^{-\frac{1}{3}} \quad (4)$$

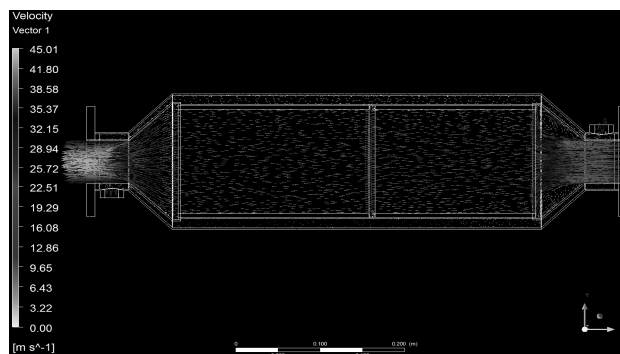
gdzie:

Re_{DH} – liczba Reynoldsa dla średnicy hydraulicznej.

Przeprowadzone obliczenia numeryczne pozwoliły uzyskać informacje dotyczące rozkładu temperatury oraz prędkości spalin i wody w analizowanym reaktorze katalitycznym (rys. 5 i 6).



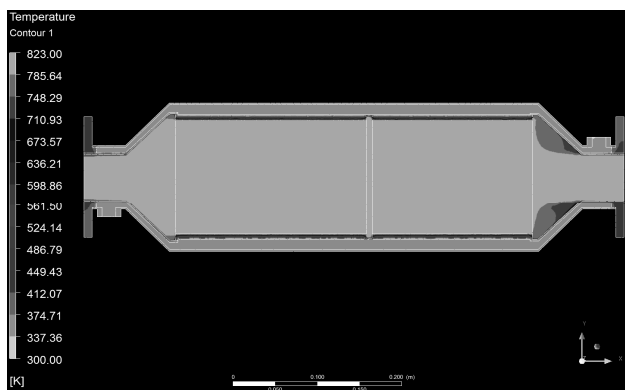
Rys. 5. Rozkład prędkości spalin i wody chłodzącej w reaktorze katalitycznym [7]



Rys. 6. Wektory prędkości spalin i wody chłodzącej w reaktorze katalitycznym [7]

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że możliwe jest symulowanie powierzchni półprzepuszczalnej (materiał katalizujący), na której można zaobserwować wyraźny spadek prędkości spalin. Zaobserwowano powstawanie wirów na styku przepływających spalin, materiału katalizującego. Nie stwierdzono występowania przegrzewania się płaszcza wodnego (rys. 7), co świadczy, że zastosowana izolacja i prędkość wody

chłodzącej została odpowiednio dobrana. Nie zaobserwowano również wpływu płaszcza wodnego na rozkład temperatury w rdzeniu reaktora. Wyniki symulacji pozwalają stwierdzić, że w całym przekroju poprzecznym rdzenia katalitycznego wartość temperatury była taka sama, a tym samym warunki dla reakcji konwersji toksycznych składników spalin były takie same. Można również zaobserwować dwa obszary prędkości strumienia spalin w obszarze reaktora katalitycznego. Wyższą prędkość zaobserwowano w obszarze środkowym przekroju poprzecznego. Zjawisko to związane jest ze zmianą średnicy na drodze przepływu spalin.



Rys. 7. Rozkład temperatury w reaktorze katalitycznym [7]

4. Podsumowanie

Drogą do poprawy warunków środowiska pracy i ograniczenia zagrożenia wynikającego z emisji toksycznych składników spalin górniczego napędu spalinowego jest, między innymi zastosowanie w układzie wylotowym górniczego napędu spalinowego reaktora katalitycznego. Wszystkie zespoły wchodzące w skład układu wylotowego powinny spełniać wymagania związane z eksploatacją w przestrzeniach zagrożonych atmosferą wybuchową. W artykule przedstawiono symulacje przepływu spalin w obszarze układu wylotowego reaktora katalitycznego z wykorzystaniem metod numerycznych w środowisku Ansys Fluent. Jako warunki brzegowe przyjęto teoretycznie najbardziej niekorzystne warunki pracy silnika spalinowego. Wyniki symulacji pozwoliły stwierdzić, że zabezpieczenie reaktora płaszczem wodnym nie wpływa negatywnie na pracę rdzenia

katalitycznego. Wykonane obliczenia zostaną poddane walidacji na modelu rzeczywistym, w celu sprawdzenia poprawności zastosowanego modelu numerycznego. Wykonanie badań doświadczalnych na stanowisku badawczym pozwoli na określenie porowatości materiału katalizującego i współczynnika przepuszczalności. Uzyskane dane z badań pozwolą również na dokładne odwzorowanie zachowania się strugi spalin w przewodzie reaktora.

Literatura

1. Gicala B., Turewicz A.: Metoda numerycznej mechaniki płynów w projektowaniu maszyn i urządzeń górniczych. *Maszyny Górnicze* 2011, nr 4, s. 3-9.
2. Kaczmarczyk K.: Napędy spalinowe w wyrobiskach górniczych zagrożonych atmosferą wybuchową. W: IV International Kongres on Combustion Engines, Radom 16-17 czerwiec 2011, PTNSS-2011-SC-170.
3. Kaczmarczyk K.: Obróbka spalin na drodze układu wylotowego górniczego napędu spalinowego. ITG KOMAG Gliwice 2012 (materiały nie publikowane).
4. Ogrodzki A.: Chłodzenie trakcyjnych silników spalinowych. WKiŁ, Warszawa 1974.
5. Szlązak N., Borowski M.: Zanieczyszczenie powietrza spalinami w wyrobiskach drażnionych z wykorzystaniem maszyn napędzanych silnikami Diesla. *Budownictwo Górnicze i Tunelowe* 2005, nr 4, s. 19-25.
6. Sporysz G., Szlązak N.: Wpływ podziemnych pojazdów górniczych z napędem spalinowym na stan zagrożenia atmosfery kopalnianej. W: VII Międzynarodowa konferencja, Bezpieczeństwo Pracy Urzędzeń Transportowych w Górnictwie, Ustroń 8-10 listopad 2011.
7. Turewicz A.: Obliczenia numeryczne parametrów spalin oraz cieczy chłodzącej na drodze układu wylotowego ITG KOMAG Gliwice 2012 (materiały nie publikowane).

Artykuł wpłynął do redakcji w sierpniu 2013 r.