

Kazimierz BANYŚ¹
Ryszard MICHAŁOWSKI²
Marcin TKACZYK³

POMIARY POLIGONOWE I BADANIA NUMERYCZNE UKŁADU DOLOTOWEGO SILNIKA ADAPTOWANEGO DO ZASILANIA CNG

W artykule zamieszczono treści dotyczące możliwości zastosowania sprężonego gazu ziemnego jako paliwa alternatywnego do zasilania silników spalinowych stosowanych w ciężkim transporcie górniczym. Przedstawiono sposób pomiarów wykonanych na jednym z grupy wymienionych pojazdów. Uzyskane wyniki pomiarów posłużyły następnie jako warunki wejściowe do badań numerycznych, mających na celu określenie jakości stosowanych instalacji CNG. Prace numeryczne sprowadzono do symulacji pól stężeń substratów w mieszaninie zasilającej cylindry silnika spalinowego. Analizując stężenia substratów określono nieprawidłowości w funkcjonowaniu instalacji CNG oraz konsekwencje dla warunków pracy silnika spalinowego.

1. WSTĘP

Do pracy przy załadunku i odstawie surowców kopalnianych, na dzień dzisiejszy, w dużym stopniu stosowane są oponowe maszyny górnicze z napędem spalinowym na olej napędowy (rys. 1). Problem to niebagatelny, gdyż spalanie ogromnych ilości oleju napędowego pociąga za sobą niekorzystne zjawisko pogorszenia warunków ekologicznych na skutek dużej emisji zanieczyszczeń powietrza pochodzących ze spalin emitowanych przez te pojazdy. W rzeczywistości w procesach obok nieszkodliwych składników spalin takich jak:

- azot (N₂),
- woda (H₂O),
- dwutlenek węgla (CO₂),

powstają też:

- produkt niezupełnego procesu spalania-tlenek węgla (CO),
- produkt niecałkowitego i niezupełnego spalania – węglowodory (HC),
- tlenki azotu (NO_x),
- dwutlenek siarki (SO₂),
- sadza.

¹ Instytutu Maszyn Budowlanych INSMASZBUD we Wrocławiu

² PGNiG SA, Dolnośląski Oddział Obrotu Gazem we Wrocławiu

³ Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska



Rys. 1. Maszyna robocza z otwartą przestrzenią silnikową
Fig. 1. Working machine with open motor space

Praca pojazdów powoduje emisję, dużej ilości szkodliwych składników spalin, które niekorzystnie wpływają na środowisko. To, jakie składniki szkodliwe spalin powstają i w jakich ilościach, zależy od przebiegu procesu spalania, ale przede wszystkim od rodzaju paliwa, jakie zastosujemy do zasilania tłokowych silników spalinowych pojazdów.

Tłokowy silnik spalinowy jest maszyną cieplną (termodynamiczną), w której energia chemiczna paliwa jest zamieniana na energię cieplną, a ta z kolei na energię mechaniczną. Uzyskanie jak najlepszych wskaźników pracy silnika spalinowego skupiało uwagę konstruktorów od pierwszych lat jego powstania. Początkowo wyrażało się to dążeniem do zwiększenia mocy i sprawności ogólnej silnika. W miarę upływu czasu dążenia te stały się bardziej wyrafinowane i dotyczyły większej liczby parametrów roboczych silnika. Podstawowym problemem pozostała jednak poprawa napełnienia cylindra czynnikiem roboczym [8].

Układ dolotowy odgrywa istotną rolę w procesie napełnienia cylindra. Dlatego też podejmowano próby obliczeniowego ujęcia procesu napełnienia cylindra silnika spalinowego, realizowane poprzez opis zjawisk w układach dolotowych. Wszystkie próby obliczeniowego ujęcia procesu napełnienia silnika spalinowego opierające się na założeniach upraszczających, cechowały się niską zgodnością z wynikami weryfikacji praktycznych. Skomplikowany charakter równań opisujących zasady zachowania masy, energii i pędu przeszkadzał w uzyskaniu poprawnych wyników obliczeniowych [9]. Jednak rozwój metod numerycznych połączony z szybkim postępem maszyn roboczych i maszyn cyfrowych umożliwił ich przybliżone rozwiązania, a w następstwie symulację przepływu w układach dolotowych.

Najnowsze sposoby wyznaczania napełnienia cylindra silnika spalinowego, uwzględniające wpływ układu dolotowego, można sprowadzić do wyznaczenia oporów przepływu oraz drgań słupa gazu w układzie dolotowym metodami CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Programy CFD bazują najczęściej na metodzie elementów skończonych MES [1],[12],[13],[16] lub na metodzie objętości skończonych MOS [4],[5]. Programy te wyznaczają pole prędkości i pole ciśnień powstające podczas przepływu czynnika w układzie dolotowym. Umożliwiają one wyznaczenie przepływu z uwzględnieniem geometrii, tarcia o ścianki przewodu, lepkości czynnika oraz wymiany ciepła.

Aby wykonać obliczenia należy przygotować kształt numeryczny układu dolotowego, następnie dyskretyzować obszar obliczeniowy, np. z użyciem programu Gambit [3]. Dla tak przygotowanych danych przyjmuje się warunki brzegowe i początkowe i wybiera parametry obliczeń. Metody CFD są metodami stosunkowo tanimi, nie licząc zakupu sprzętu i oprogramowania. Niektóre parametry charakteryzujące przepływ są dokładniej wyznaczane niż metodami pomiarowymi, jak np.: pole prędkości, rozkład ciśnień, co metodami obliczeniowymi teoretycznie jest możliwe, lecz w praktyce niestosowane ze względu na duże koszty.

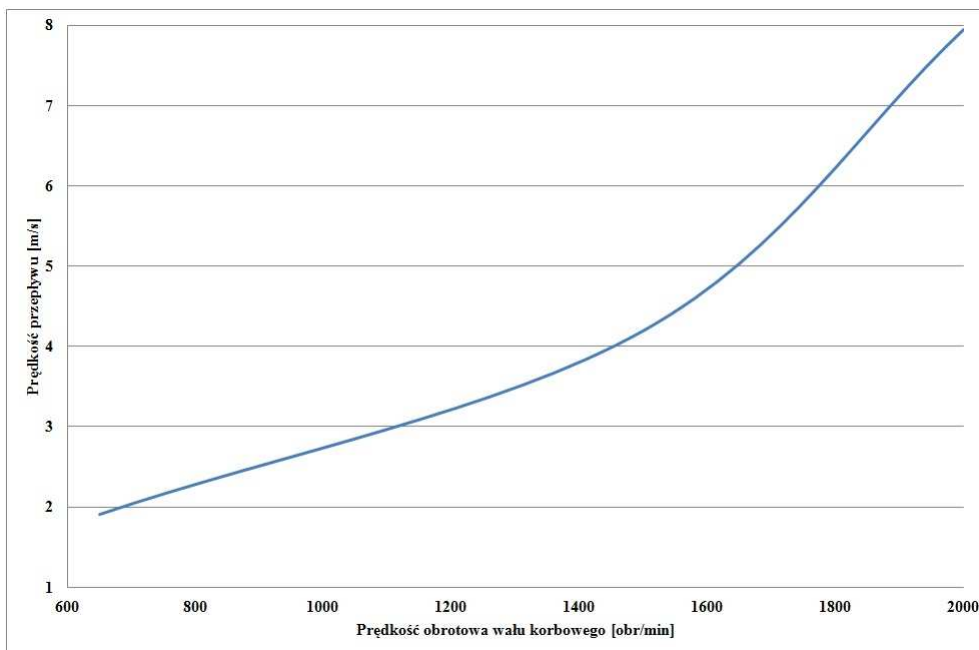
Poprawne przygotowanie siatki wymaga przestrzegania zasad [1],[2],[11],[14],[15] i pewnego doświadczenia. Podobnie jak założenie odpowiednich warunków brzegowych i początkowych oraz wybór pozostałych parametrów obliczeń [1],[2],[10],[12],[16]. Czas obliczeń przepływu stacjonarnego jest stosunkowo krótki na dostępnym sprzęcie komputerowym i dochodzi do kilkunastu godzin w przypadku układu dolotu powietrza w silniku spalinowym. Obliczenia niestacjonarne (z uwzględnieniem całego suwu ssania) trwają do kilkudziesięciu dni. Uwzględniając szybki rozwój sprzętu komputerowego należy sądzić, iż metoda ta, będzie coraz powszechniejsza. Obecnie możemy znaleźć wiele programów liczących, a utrudnieniami jakie występują jest wymiana danych między nimi [6]. W metodach CFD problemem jest interpretacja wyników, komputer bowiem „policzy wszystko”, niestety nie zawsze zgodnie z uwzględnieniem fizycznych cech zjawiska. Wymaga to umiejętnej interpretacji wyników. Do obliczeń przepływu korzystano z systemu obliczeniowego FLUENT, uznawanego za jeden z najlepszych programów komercyjnych dostępnych na rynku.

2. POMIARY PRZEPIYU POWIETRZA W UKŁADZIE DOLOTOWYM SILNIKA

Przeprowadzenie badań numerycznych układu dolotowego tłokowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym (rys. 1), symulacyjnie przystosowanego do zasilania gazem ziemnym, wymaga wprowadzenia rzeczywistych danych wejściowych (warunków brzegowych). Celem wyznaczenia parametrów przepływowych istniejącego układu dolotowego, przeprowadzono pomiar prędkości powietrza (rys. 2) wpływającego do filtra powietrza dla obciążenia częściowego (rys. 3) w silniku spalinowym Volvo serii D12D.



Rys. 2. Widok obudowy filtra powietrza i anemometru pomiarowego
Fig. 2. View exterior air pre-cleaner filter and anemometer



Rys. 3. Wykres prędkości powietrza zasilającego silnik
Fig. 3. Graph of charge engine velocity air

3. BADANIA NUMERYCZNE SILNIKA MASZYNY ROBOCZEJ GÓRNICICTWA ODKRYWKOWEGO

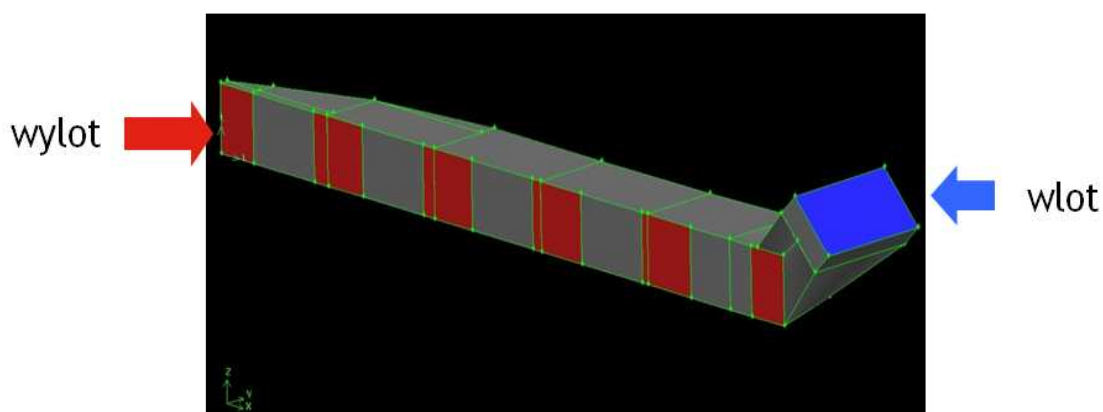
Celem badań było określenie poprawności działania obecnie stosowanych instalacji zasilających silnik w CNG. Badania zawężono do obserwacji strumienia paliwa doprowadzanego zaworem (rys. 4), zamontowanym na przeciwległej do kanałów dolotowych głowicy płaszczyźnie kolektora (rys. 6). Wymieniony sposób montażu zaworu gazowego jest obecnie dominującym trendem w instalacjach CNG, oczywiście uzależnionym od warunków technicznych jak budowa kolektora dolotowego i zabudowa komory silnikowej.



Rys. 4. Zawór gazu dozowanego do układu dolotowego silnika
Fig. 4. Valve CNG injection in inlet engine

3.1. TRANSLACJA GEOMETRII KOLEKTORA DO POSTACI NUMERYCZNEJ

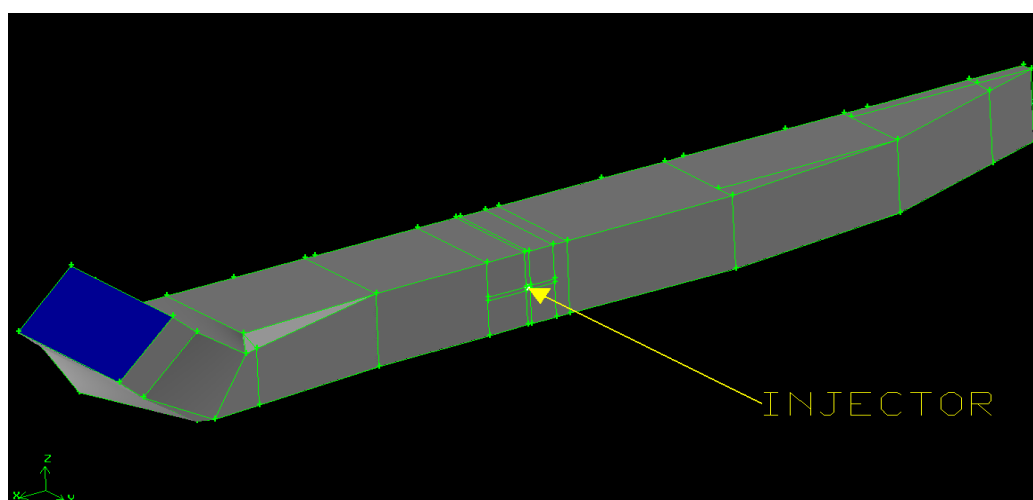
Metodyka stosowana do translacji geometrii badanego obiektu i stworzenia modelu dyskretnego szczegółowo została opisana w pracy [7]. Poniżej zostaną zacytowane tylko elementy niezbędne do wyjaśnienia treści niniejszego opracowania.



Rys. 5. Model geometryczny widok od strony głowicy silnika

Fig. 5. Geometric model - view from side head engine

Budowę modelu geometrycznego rozpoczęto od pomiarów geometrii kolektora dolotowego następnie wymiary sprowadzono do postaci numerycznej z użyciem interfejsu graficznego programu Gambit, stanowiącego PreProcessor systemu obliczeniowego Fluent. Kolejnym krokiem było wstępne zdefiniowanie warunków brzegowych: wlot powietrza, wlot metanu (rys. 5, rys. 6) oraz wlot do cylindra w modelu geometrycznym. Dyskretyzację przestrzeni obliczeniowej przeprowadzono zgodnie z opisem w pracy[7].



Rys. 6. Model geometryczny widok od strony zaworu gazowego

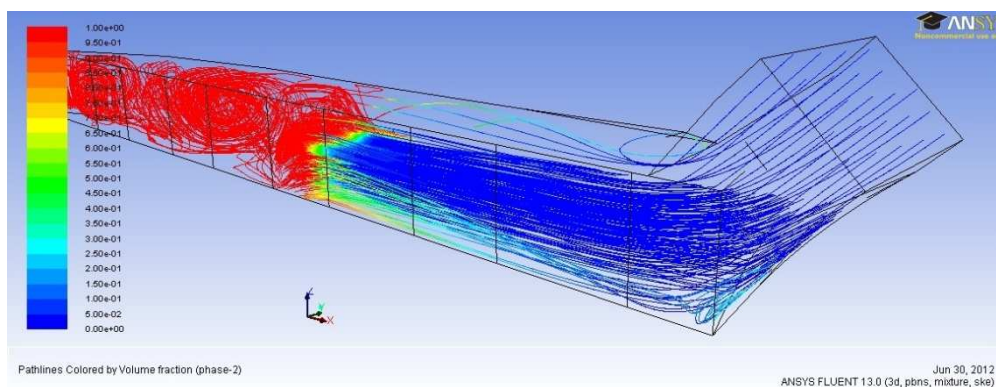
Fig. 6. Geometric model - view from side Valve CNG

3.2. WPROWADZENIE WARUNKÓW BRZEGOWYCH

Kolejnym krokiem był eksport dyskretnej postaci modelu geometrycznego z pliku typu „mesh”, a następnie import do „solvera” systemu obliczeniowego Fluent. Przeprowadzono skalowanie, wprowadzono model turbulencji (\tilde{k} - ϵ), zdefiniowano war. brzegowe: wartość prędkości w filtrze powietrza ($v = 7,86\text{m/s}$) oraz ciśnienie dostarczanego gazu ($p = 1\text{MPa}$). Następnie przeprowadzono obliczenia i po osiągnięciu zadowalającej zbieżności ($10 \cdot 10^{-5}$) do rozwiązania dokładnego zakończono iteracje.

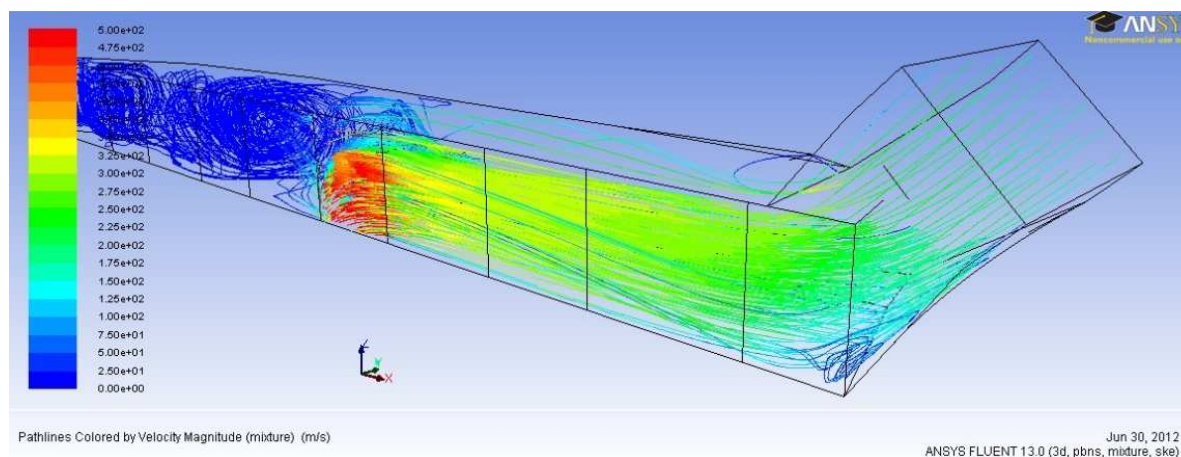
4. WYNIKI BADAŃ NUMERYCZNYCH

Efektorem badań numerycznych było otrzymanie pola prędkości, ciśnienia oraz stężeń metanu i tlenu w mieszaninie powietrze-gaz ziemny. Poniżej przedstawione rysunki wizualizują wartości pola najważniejszych parametrów:



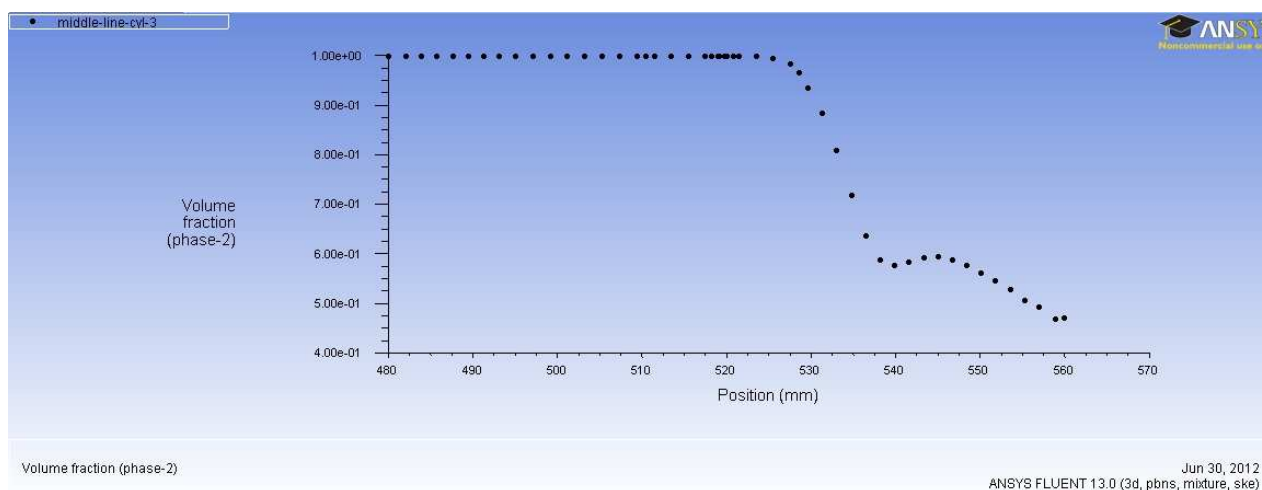
Rys. 7. Widok pola stężeń fazowych przepływu w kolektorze dolotowym
Fig. 7. View pathlines colored by volume fraction in inlet collector

Rysunek 7 ilustruje stężenia dwóch faz w mieszaninie powietrze – metan w momencie, gdy zawór gazowy jest otwarty i dystrybuje paliwo. Odpowiada to oczywiście jednej z sześciu chwil największego stężenia metanu (przypadek silnika sześć cylindrowego), w kolektorze dolotowym podczas cyklu pracy silnika. Na rys. 7 fazę nr 1 stanowi powietrze natomiast fazę nr 2 stanowi metan. Podczas analizy pola stężeń można zauważyć nagły wzrost udziału metanu w mieszaninie gazów. Wzbogacenie składające się do 100% udziału fazowego obejmuje cały obszar kolektora dolotowego od współrzędnych 525mm długości kolektora do początku kolektora (początek przyjęto od strony koła rozrządu). Wzbogacenie ma miejsce na skutek wpływu metanu z zaworu gazowego, który jest umieszczony prostopadle do przekroju poprzecznego kanału dolotowego, na wysokości współrzędnych odpowiadających centrum w/w przekroju cylindra czwartego.



Rys. 8. Widok pola prędkości przepływu w kolektorze dolotowym
 Fig. 8. View Pathlines colored by velocity magnitude in inlet collector

Analizując wartości prędkości (rys. 8.) w mieszaninie przepływającej przez kolektor można wyszczególnić kilka stref przepływu: pierwsza z nich ma miejsce od wlotu do kolektora w przestrzeni pomiędzy cylindrami 4 i 5, a wartość prędkości oscyluje poniżej $v < 300 \text{ m/s}$, natomiast w otoczeniu kanału dolotowego cylindra czwartego wartość prędkości wzrasta do $v \approx 500 \text{ m/s}$. Trzecią strefą jest przestrzeń rozpostarta między trzecim cylindrem a końcem kolektora, gdzie wartości prędkości są bardzo małe, zbliżone do $v \approx 0 \text{ m/s}$.



Rys. 9. Wykres udziału fazowego metanu w osi płaszczyzny kanału dolotowego do czwartego cylindra silnika
 Fig. 9. Graph of methane volume fraction in flow charge four cylinder

Efektom powyżej analizowanych pól stężeń i zwrotów wektorów prędkości, przemieszczających się strug mieszaniny gazów w kolektorze dolotowym, jest pole stężeń mieszaniny zasilającej czwarty cylinder przedstawione na rys. 9. Widoczne jest znaczne zróżnicowanie stężeń. Pole o 100% stężeniu metanu zajmuje około 60% powierzchni

przekroju poprzecznego kanału dolotowego głowicy i rozpoczyna się od 525mm długości kolektora, natomiast na długości kolektora 530mm do 560mm stężenie metanu spada do wartości 45% zawartości objętościowej metanu.

5. WNIOSKI

Podsumowując wyniki badań numerycznych można stwierdzić, iż umiejscowienie zaworu gazowego w ścianie kolektora dolotowego po przeciwnej stronie kanału dolotowego głowicy, nie jest właściwe, gdyż powietrze płynące w kolektorze dolotowym posiada na tyle duży pęd, iż zmienia kierunek wektorów prędkości dozowanego metanu, pomimo o rząd różnych wartości ciśnienia między utleniaczem a paliwem. Efektem wyżej opisanego zjawiska jest negatywny fakt częściowego, około 60% pola powierzchni, zasilania paliwem gazowym cylindra, do którego paliwo było dostarczane. Pozostała ilość paliwa przemieszcza się zgodnie z kierunkiem przepływu powietrza zasilając kolejne cylindry. Przy tak rozwiązany zasilaniu następuje negatywne zróżnicowanie w składzie mieszanki poszczególnych cylindrów, co prowadzi do nieprawidłowości w procesie spalania, a w następstwie do nierównomiernego obciążenia wału korbowego, niespalenia paliwa i emisji do otoczenia większej ilości szkodliwych związków łącznie z paliwem.

LITERATURA

- [1] Ansys. www.ansys.com, 2006.
- [2] ATKINS WS., *Consultants and Members of the NSC, Best practice guidelines for marine applications of computational fluid dynamics*, Sirehna, HSVA, FLOWTECH, VTT, Imperial College of Science & Technology, Germanischer Lloyd, Astilleros Espanoles, <http://pronet.wsatkins.co.uk/marnet/>
- [3] Fluent Inc., *Fluent 6.1 User's Guide*, 2003.
- [4] GRYBOŚ R., 1998, *Podstawy mechaniki płynów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- [5] JOHNSON R., 1998, *Fluid Dynamice*, CRC Press LLC, Floryda.
- [6] KHODOROVSKY A., 2001, *Experience in using various CAD systems for hull lines design. problems of CAD system integration into current design technology*, 14th International Conference on Hydrodynamics in Ship Design HYDRONAV 2001, Szczecin – Miedzyzdroje, September, 27-29.
- [7] MICHAŁOWSKI R., TKACZYK M., 2011, *Badania numeryczne układu dolotowego powietrza tłokowego silnika spalinowego Volvo typ D12DLBE3 zasilanego CNG*. Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze, 2, 40-44.
- [8] MYSŁOWSKI J., 1995, *Doładowanie bezsprężarkowe silników z zapłonem samoczynnym*, WNT, Warszawa.
- [9] MYSŁOWSKI J., 2002, *Doładowanie silników*, WKŁ, Warszawa.
- [10] OERTEL JR. H., LAURIEN E., 1995, *Numerische Stromungsmechanik*, Springer-Verlag, Berlin.
- [11] OLSEN N., 1999, *Computational fluid dynamics in hydraulic and sedimentation engineering*, The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- [12] PEYREAT R., TAYLOR T., 1983, *Computational methods for fluid flow*, Springer-Verlag, New York.
- [13] RUSIŃSKI E., CZMOCHOWSKI J, SMOLNICKI T., 2000, *Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- [14] RUSIŃSKI E., 2002, *Zasady projektowania konstrukcji nośnych pojazdów samochodowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- [15] THOMPSON J., WARSI Z., MASTIN C., 1985, *Numerical grid generation foundations and Applications*, Elsevier Science Publishing Co., Inc., New York.
- [16] WILCOX D., 2002, *Turbulence modeling for CFD*, KNI, Inc., Anaheim.
- [17] ZIENKIEWICZ O., 1972, *Metoda elementów skończonych*, Arkady, Warszawa.

EXPERIMENTAL MEASURING AND NUMERICAL SIMULATION OF A COMBUSTION ENGINE POWERED
BY COMPRESSIBLE NATURAL GAS

The paper presents results of investigations of such alternative fuel as Compressible Natural Gas (CNG) for Compression Ignition combustion engines used in heavy transportation for surface mining. What was characterized was a vehicle, its engine along with in-depth methodology of numerical investigation. Very Important data in numerical analysis are boundary conditions therefore the first part of this paper presents measuring air inflow of the cylinder existing combustion engines. The second part this paper presents the goal of the numerical tests was the determination of correctness in use of existing CNG systems. The outcome was to determine the fields of methane concentrations in a mixture supplying the cylinder of the internal combustion engine. Based on the concentration analysis, the irregularity in functioning of methane had been identified along with the consequences in operation of the combustion engines.