

Zdenek KOVAR\*  
Celestyn SCHOLZ  
Stanislav BEROUN  
Milan NYDRLE  
Hynek DROZDA  
Josef BLAZEK  
Miroslav SVOBODA

## Silniki tłokowe zasilane paliwem wodorowym: badania i rozwój, doświadczenia

*W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych silników zasilanych wodorem obejmujące: tworzenie mieszanki palnej, spalanie mieszanki powietrza i wodoru dla różnego jej składu, tworzenie tlenków azotu, parametry pracy silnika. Prace badawczo-rozwojowe przeprowadzono na jednocylindrowym silniku doświadczalnym (wolnossącym i doładowanym) oraz na turbodoładowanym sześciocylindrowym silniku doświadczalnym.*

Słowa kluczowe: silnik, wodór, mieszanka

### Hydrogen piston engines: R&D, experiences

*Results of experimental works on hydrogen testing engines are presented in the paper: mixture forming, burning of air-hydrogen mixtures with different air/fuel ratio, NOx production, power parameters. The R&D works were realized on a single cylinder test engine (both natural aspirated and supercharged) and on a turbocharged six cylinder test engine as well.*

Key words: engine, hydrogen, mixture

### 1. Wprowadzenie

Niewątpliwie wodór stanowi najbardziej prawdopodobną alternatywę na przyszłość dla paliw opartych na cząstce węgla, tj. paliwo wodorowe będzie bez wątpienia jedynym odpowiednim środkiem służącym do przekazywania energii w erze wtórnych paliw kopalnych. W tym kontekście sądzimy, że silniki spalinowe zasilane paliwem wodorowym stanowią (równolegle do ogniw paliwowych) jedno z możliwych rozwiązań osiągnięcia długookresowej ciągłej użyteczności, zwłaszcza w zakresie transportu.

Katedra Maszyn Drogowych Politechniki w Libercu od ponad 20 lat specjalizuje się w paliwach alternatywnych (CNG, LPG). Nasze badania w obecnej chwili są prowadzone także nad zastosowaniem wodoru jako paliwa do silników spalinowych o zapłonie iskrowym z bezpośrednim wtryskiem paliwa.

Pierwsze próby badań były zorientowane na rozwój sekwencyjnych układów wtrysku paliwa i dotyczyły studiów nad wtryskiwaczem elektromagnetycznym dla paliwa gazowego [1]. Badanym obiektem był jednocylindrowy silnik przekształcony z silnika stosowanego do laboratoryjnych badań liczby oktanowej (OKC-Octane, czeska wersja dobrze znanej maszyny CFR-Waukesha stosowanej do badania paliw). W badanym silniku jednocylindrowym dokonywano oceny warunków spalania skrajnie ubogiej mieszanki wodoru i powietrza, włącznie z symulacją doładowania silnika za pomocą urządzenia doładowującego własnej konstrukcji.

W drugiej serii badań zorientowanych na optymalizację parametrów roboczych silnika zastosowano sześciocylindrowy silnik typu LIAZ ML637ENEh wraz z komutatorowym

### 1. Introduction

It is indubitable that hydrogen is the most probable alternative to carbon-based fuels for the future, i.e. hydrogen will be undoubtedly the only applicable energy-transfer medium for the post fossil-fuel era. In this context we feel, that hydrogen-fuelled internal combustion engines are (in parallel with fuel cells) one of the positive possibilities to achieve a long-term sustainable mobility, especially in surface transportation.

The Department of Transport Machines of Liberec Technical University is specialized in alternative fuels (CNG, LPG) for the past 20 years or so. Our research is now being conducted on the use of hydrogen as well; hydrogen as a fuel for spark internal combustion engines with direct injection.

The first series of experiments has been oriented in the development of timed injection systems and a study of special electromagnetic gas injector [1]. The testing engine has been a single-cylinder engine based on a converted OKC-octane laboratory measuring engine (which is a Czech production of the well known CFR-Waukesha fuel-testing machine). In the testing single-cylinder engine, there have been tested regimes of combustion of extremely lean mixtures of hydrogen & air, including the simulation of supercharging the engine by means of a filling unit of our own design.

In the second series of experiments, oriented on the optimisation of operating engine-parameters, a six-cylinder LIAZ ML637ENEh with a commutator electric dynamometer has been used [2]. The engine is a CNG-fuelled and hydrogen-fuelled respectively, spark ignited one, based on a laboratory version of a series-produced supercharged Diesel engine.

hamulcem elektrycznym [2]. Badany silnik o zapłonie iskrowym jest zasilany paliwem CNG i paliwem wodorowym, i jest oparty na wersji laboratoryjnej produkowanego seryjnie silnika o zapłonie samoczynnym z doładowaniem.

Zastosowany w obu przypadkach system wewnętrznego tworzenia mieszanki palnej umożliwia sterowanie dostarczaniem paliwa niezależnie od regulacji czasu ruchu zaworu dolotowego silnika; taka koncepcja zmniejsza ryzyko wystąpienia przedwczesnego zapłonu mieszanki na odcinku jej dlotu do cylindra silnika.

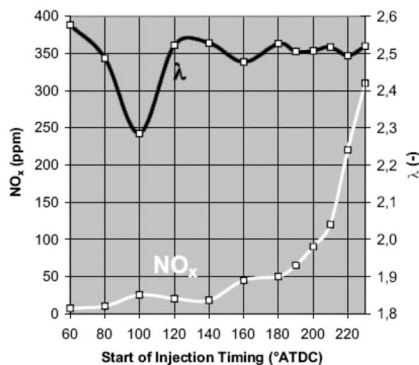
**2. Badania silnika jednocylindrowego**

Badania przeprowadzone na jednocylindrowym silniku badawczym zmierzały przede wszystkim do opanowania procesu tworzenia mieszanki wodoru i powietrza, i jej spa-

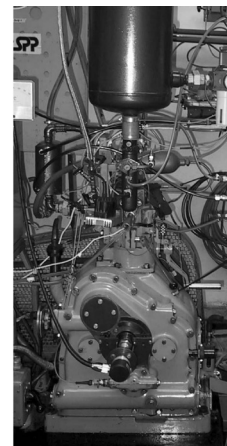
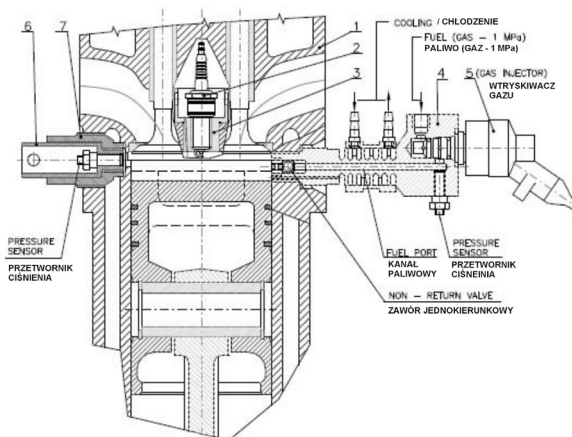
Tabela 1. Dane silnika  
Table 1. Engine parameters

Objętość skokowa silnika / Engine displacement	0,61 dm <sup>3</sup>
Stopień sprężania / Compression ratio	8
Kąt wyprzedzenia zapłonu / Ignition advance	15° przed GMP / 15 CA before TDC
Kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa / Start of injection	260° przed GMP / 260 CA before TDC

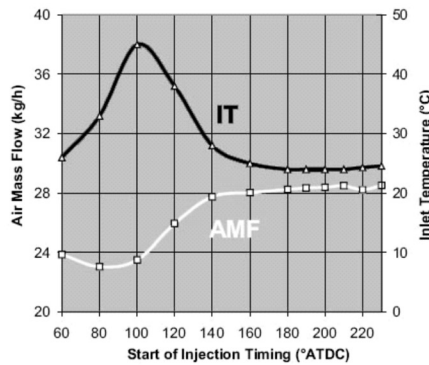
lania z uwzględnieniem wymagania tworzenia minimalnej ilości składników szkodliwych spalin. W rzeczywistości jedynymi szkodliwymi substancjami powstającymi w procesie spalania wodoru i powietrza są tlenki azotu. Nasze studia przeprowadzone do tej pory wskazują, że najlepszym sposobem uzyskania małej emisji składników szkodliwych w silniku na paliwo wodorowe jest wykorzystanie koncepcji spalania mieszanek skrajnie ubogich. Istotą jest uzyskanie niskiego poziomu pierwotnej koncentracji NO<sub>x</sub> w spalinach bez potrzeby stosowania reaktora katalitycznego w układzie wylotowym silnika. Szczegółowe



Rys. 2. Wpływ chwili rozpoczęcia dostarczania gazu do cylindra na wybrane parametry  
Fig. 2. Effect of the start of the blowing-in upon selected parameters



Rys. 1. Przekrój poprzeczny silnika OKC-Octane i jego widok na stanowisku badawczym  
Fig.1. Diagram of the arrangement of the engine OKC-Octane and its installation at the testing workplace



Unimportant changes in the NO<sub>x</sub> (in concentrations below 50 ppm) in the suction stroke are probably due to the change in the coefficient of the excess of air in the fuel mixture. In the compression stroke, there appears a steep increase of the concentration of NO<sub>x</sub> at the change of the start of injecting, with the values of the co-efficient of excess of air unchanged practically, that comply also with

pomiary przeprowadzone na jednocylindrowym silniku OKC-Octane obejmujące pomiary emisji składników szkodliwych spalin i szybkozmiennego ciśnienia w cylindrze (wraz z oceną termodynamiczną zarejestrowanych przebiegów ciśnień) dostarczyły dokładnych informacji na temat przebiegu procesu spalania i czynników wpływających na wymagane charakterystyki cyklu roboczego silnika.

Nieistotne zmiany koncentracji  $\text{NO}_x$  (poniżej 50 ppm) w suwie napełniania są prawdopodobnie spowodowane zmianą współczynnika nadmiaru powietrza. W suwie sprężania następuje gwałtowny wzrost stężenia  $\text{NO}_x$  przy zmianie początku wtrysku paliwa, bez zmiany współczynnika nadmiaru powietrza, co odpowiada stałemu strumieniowi masy powietrza i jego temperatury.

Jest oczywiste, że zmiany w suwie napełniania wpływają głównie na koniec spalania, natomiast podczas suwu sprężania – na jego początek. Zwiększona prędkość przebiegu procesu spalania częściowo tłumaczy tworzenie większej ilości  $\text{NO}_x$  w suwie sprężania. Dalsze wytłumaczenie może dotyczyć prawdopodobnie niewystarczającego czasu na wymieszanie powietrza i paliwa zanim nastąpi zapłon mieszanki.

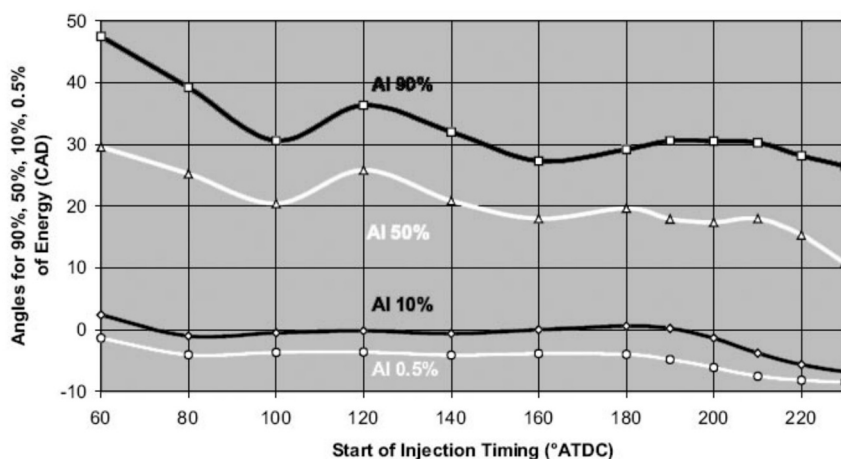
### 3. Badania sześciocylindrowego silnika zasilanego wodorem

Naturalnej wielkości silnik LIAZ ML637ENE jest silnikiem doładowanym o zapłonie iskrowym, sześciocylindrowym, dwurzędowym, o przeciwnym układzie cylindrów,

Tabela 2. Dane silnika

Table 2. Parameters of the engine

Średnica cylindra / Bore		130 mm
Skok tłoka / Stroke		150 mm
Objętość skokowa silnika / Engine displacement		11,946 dm <sup>3</sup>
Stopień sprężania / Compression ratio		12
Znamionowa moc użyteczna / Engine rating		160 kW
Prędkość obrotowa znamionowej mocy użytecznej / Nominal rpm		2000 obr/min / 2000 rpm
Fazy rozrządu / Valve timing	Otwarcie zaworu dolotowego / Inlet valve opening	3° przed GMP / 3 CA before TDC
	Zamknięcie zaworu dolotowego / Inlet valve closing	44° po DMP / 44 CA after BDC
	Otwarcie zaworu wylotowego / Exhaust valve opening	53° przed DMP / 53 CA before BDC
	Zamknięcie zaworu wylotowego / Exhaust valve closing	7° po GMP / 7 CA after TDC
Sprężarka doładowująca / Turbocharger		3467 MOA/17.21
Świece zapłonowe / Spark plugs		Brisk DR12YS



Rys. 3. Wyniki analizy procesu spalania, dotyczące prędkości spalania w jego kolejnych fazach, zdeterminowanej odległością w °OWK od rozpoczęcia spalania aż do chwili, do której została spalona określona w % ilość dostarczonego paliwa (AI 0,5%, AI 10%, AI 50%, AI 90%)

Fig. 3. The results of an analysis of the combustion concerning the burning speed in its individual phases, determined by the length in °ATDC since the start of burning till the point where a certain percentage of the supplied fuel has been combusted (AI 0.5%, AI 10%, AI 50%, AI 90%)

an unchanging course of the amount of air AMF and its temperature IT.

It is evident that in the suction stroke the changes affect the end of the combustion mainly, meanwhile in the compression stroke, its beginning. The increased burning velocity partly explains a higher production of  $\text{NO}_x$  emissions in the compression stroke. A further explanation can consist in the probably insufficient time for mixing up the mixture of air and fuel before the ignition itself.

### 3. Testing of the hydrogen fueled six-cylinder engine

The full-size ENE engine is a supercharged spark ignition flat six cylinder engine employing gas fuels, with the gas being blown into the cylinder directly. The engine is provided with a supercharger controlled by a by-pass of the combustion products outside of the turbine (waste-gate) and a cooler of the compressed air.

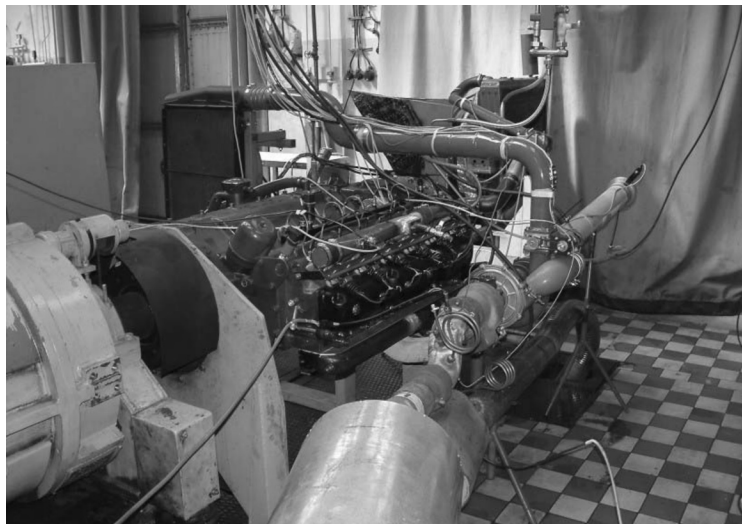
The employed system of in-cylinder formation of the fuel-air mixture allows to control the start of delivery of the fuel independently upon the timing of the movement of suction valve; this concept reduces the risk of a premature ignition of the mixture in the suction section of the engine and gives especially the possibility to study the influences of mixing mechanism.

Thanks to the possibility of accurate measuring of instantaneous flow rates, the design of the distribution of gases to the ENE-engine allows for mutual mixing of the natural gas and the hydrogen. The concept of adding hydrogen to natural gas is studied widely at present, with the aim to improve the characteristics of the cheaper natural gas in comparison with hydrogen which is relatively expensive now. The expression “improvement of characteristics” stands mainly for the re-

zasilanym paliwami gazowymi, w którym gaz jest dostarczany do cylindra w sposób bezpośredni. Silnik jest wyposażony w sprężarkę doładowującą, której sterowanie jest realizowane przez upust spalin sprzed turbiny (zawór upustowy spalin), i w chłodnicę powietrza doładowanego.

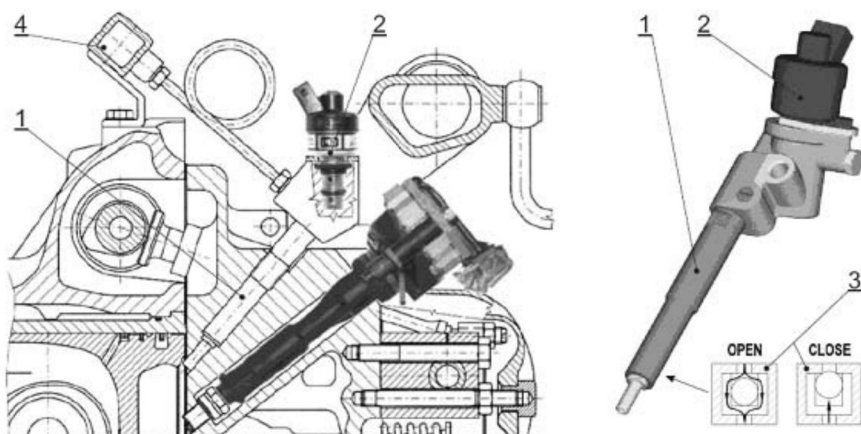
Zastosowany system tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej wewnątrz cylindra umożliwia sterowanie początkiem dostarczania paliwa niezależnie od regulacji czasu ruchu zaworu dolotowego; taka koncepcja zmniejsza ryzyko przedwczesnego zapłonu mieszanki na odcinku jej dołotu do cylindra silnika i umożliwia wyznaczenie czynników wpływających na mechanizm mieszania.

Dzięki możliwości dokładnego pomiaru chwilowych wartości natężenia przepływu, projekt rozprządzenia gazów w silniku ENE uwzględnia wzajemne mieszanie gazu ziemnego i wodoru. Pojęcie dodawania wodoru do gazu ziemnego



Rys. 4. Widok silnika LIAZ ENE na stanowisku badawczym

Fig. 4. Installation of the LIAZ ENE engine on the test-bed



Rys. 5. Układ zasilania paliwem silnika

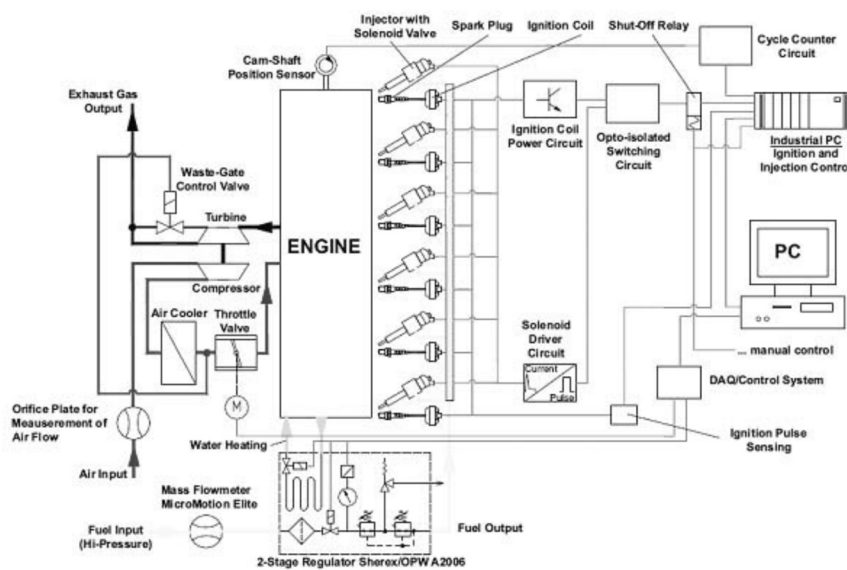
Fig. 5. The fuel-delivery system

duction of harmful emissions, resulting evidently from the simple reduction of the mass contents of carbon in the mixture of gases. Other effects include the lowering of the ignition temperature in the aim to reduce  $\text{NO}_x$  emissions and an increase of the calorific value, maintaining the necessary detonation resistance of the fuel at the same time.

The fuel system of our own design (see Fig. 5) consists of six independent blow-in units (1) with the dosing of the gas fuel by the electromagnetic valve BKM Servojet SP-010 (2). An important part of the blow-in unit is a non-return relief valve (3), which protects the electro-

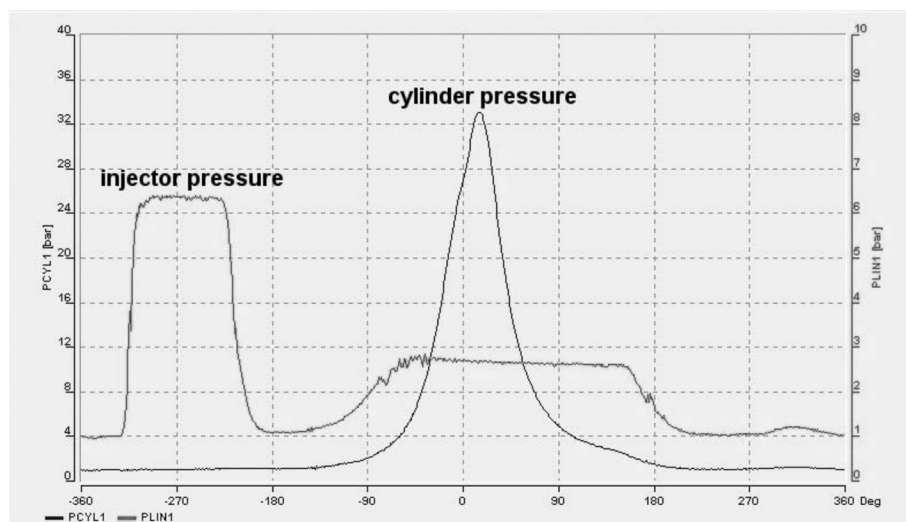
obecnie szeroko się bada pod względem uzyskania poprawy właściwości gazu ziemnego tańszego w porównaniu do relatywnie drogiego wodoru. Wyrażenie „poprawa właściwości” oznacza głównie zmniejszenie emisji szkodliwych składników spalin, które wynika z prostego zmniejszenia masowej zawartości węgla w mieszaninie gazów. Kolejne efekty dotyczą obniżenia temperatury zapłonu w celu zmniejszenia emisji  $\text{NO}_x$  i wzrost wartości opałowej, przy jednoczesnym zachowaniu koniecznej odporności paliwa na spalanie stukowe.

Zaprojektowany przez nas układ zasilania paliwem silnika (rys. 5) zawiera sześć niezależnych wtryskiwaczy gazu, w których dawkowanie paliwa gazowego jest realizowane za



Rys. 6. Elektroniczny układ sterowania zasilaniem

Fig. 6. The electronic control system of engine fuelling



Rys. 7. Przebieg ciśnienia w cylindrze i ciśnienia paliwa we wtryskiwaczu podczas spalania wodoru dla 30% obciążenia

Fig. 7. Course of the two-channel indication of the combustion pressure and the pressure of fuel in the injector when combusting hydrogen and under 30% load

magnetic valve from the combustion room in the moment of a steep increase of the combustion pressure, protecting it from high mechanical and thermal loads. The valve is situated immediately after the jet of the blow-in device, close to the combustion room. The gas is brought to the blow-in units by means of a distribution line (4).

A very important part of the testing-engine accessories is the electronic control system. Owing to the specific requirements upon the electronic control of the hydrogen-driven engine with in-cylinder formation of the mixture, high requirements are raised upon this mechanism, in particular concerning its precise and fast reaction and the reliability of its operation. The

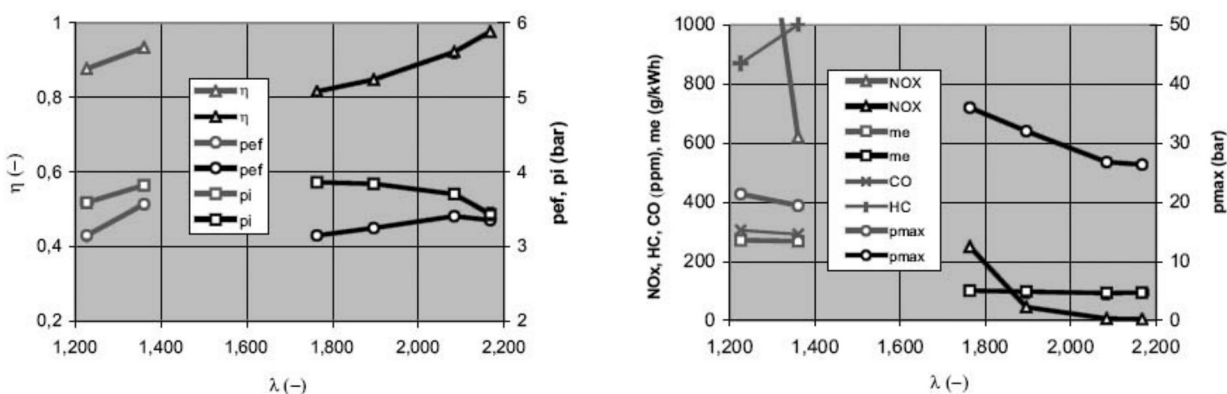
unit controlling the blowing-in of gas has been completed with a control circuit governing the electromagnetic valves, the so-called solenoid driver unit of our own design, which converts the voltage pulse at the output of the control unit into the current course of a convenient shape. The ignition system is of a modular type. Each cylinder is provided with a separate ignition coil Bosch with integrated high voltage lines.

unit controlling the blowing-in of gas has been completed with a control circuit governing the electromagnetic valves, the so-called solenoid driver unit of our own design, which converts the voltage pulse at the output of the control unit into the current course of a convenient shape. The ignition system is of a modular type. Each cylinder is provided with a separate ignition coil Bosch with integrated high voltage lines.

In the first test the engine has run without any problem; there have been detected problems with the electronic control of the engine only in higher load regimes. The power circuits of the valves of the blow-in units have not been dimensioned sufficiently; this fault has been suppressed by employing control circuits of our own design with a controlled course of the electric circuit.

Ważną częścią dodatkowego wyposażenia badanego silnika jest elektroniczny układ sterowania. Ścisłe określone wymagania w odniesieniu do elektronicznego sterowania silnika zasilanego paliwem wodorowym, w którym tworzenie mieszanki palnej następuje wewnątrz cylindra, w szczególności dotyczyły precyzyjnej i szybkiej reakcji oraz niezawodności działania tego układu. Jednostka sterująca dostarczaniem gazu do cylindra została wyposażona w obwód zarządzający pracą zaworów elektromagnetycznych, tak zwaną wzbudnicę elektromagnesu własnej konstrukcji, któ-

Further complications have been caused by an intense electromagnetic interference, coming from the ignition system mainly. The reason was faults in the timing of the fuel injecting, and has complicated the employment of a sensitive measuring apparatus for the indication of the combus-



Rys. 8. Pierwsze wyniki pracy silnika zasilanego wodorem i metanem dla tych samych warunków pracy i parametrów regulacyjnych

Fig. 8. First results of the operation with hydrogen and methane under similar conditions and adjustments

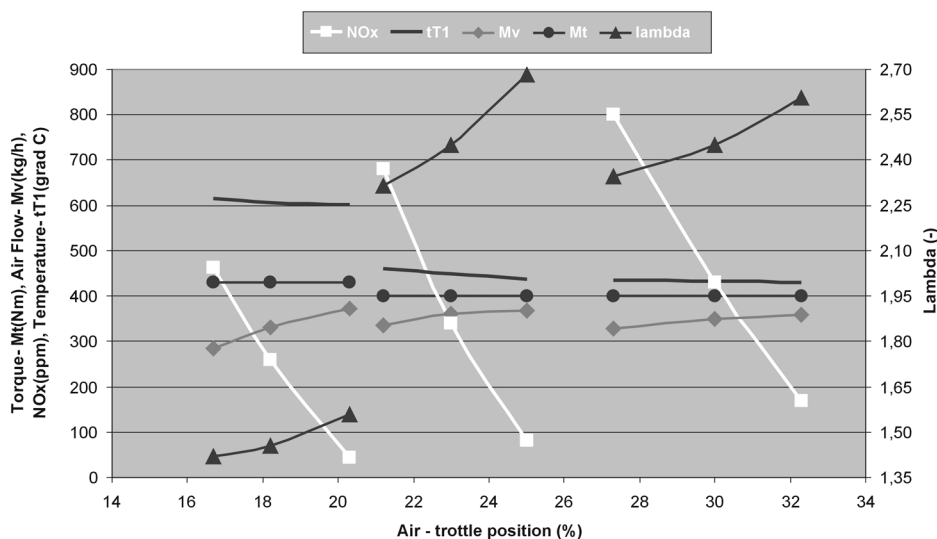
ra zamienia impuls napięciowy na wyjściu z jednostki sterującej w przebieg prądowy o korzystnym kształcie zmian sygnału. Układ zapłonowy jest typu modułowego. Każdy cylinder posiada osobną cewkę zapłonową firmy Bosch wraz z zintegrowanymi przewodami wysokonapięciowymi.

Podczas pierwszego testu silnik pracował bez zakłóceń; stwierdzono zakłócenia związane z elektronicznym sterowaniem silnika jedynie podczas pracy w zakresie dużych obciążeń. Obwody elektroenergetyczne zaworów wtryskiwaczy nie były poprawnie zaprojektowane pod względem ich wymiarów; wada ta została usunięta przez zastosowanie obwodów sterowania własnej konstrukcji wraz z regulowanym obiegiem obwodu elektrycznego.

Dalsze komplikacje były spowodowane dużą interferencją elektromagnetyczną pochodzącą głównie od układu zapłonowego silnika. W jej wyniku odnotowano błędy w regulacji wtrysku paliwa i spowodowała ona trudności w zastosowaniu dokładnej aparatury pomiarowej do indykowania silnika. Zmniejszenie interferencji osiągnięto przez adaptację źródła energii do jednostek sterujących, pasywną ochronę mierzonych wielkości itd.

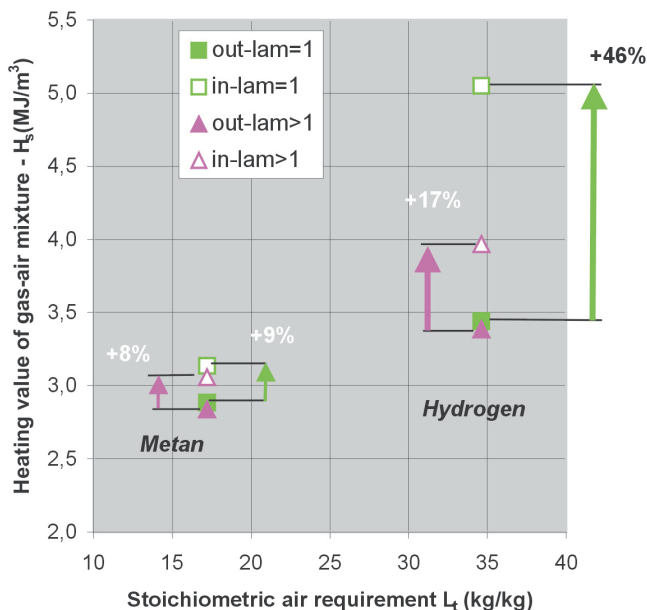
Podczas uruchamiania programu, przebiegi ważnych funkcji sterujących były rejestrowane z dużą częstotliwością próbkowania za pomocą dwukanałowego oscyloskopu firmy Hewlett Packard. Przebiegi te były zapisywane za pomocą urządzenia typu AVL Indimeter wraz z sygnałami ciśnienia w cylindrze silnika i ciśnienia paliwa za zaworem elektromagnetycznym w zależności od położenia kąтового wału korbowego silnika; uzyskane pomiary potwierdziły w sposób wiarygodny prawidłowe ustawienie zapłonu i wtryskiwania gazu do cylindra.

Zarówno ze względu na bezpieczeństwo, jak i z powodów ekonomicznych, pierwsze próby na silniku przeprowa-



Rys. 10. Wpływ rodzaju turbosprężarki i paliwa na parametry pracy silnika M1636 ENE dla:  $n = 1200$  obr/min, 40% obciążenia, kąta wyprzedzenia zapłonu  $-17^\circ$  przed GMP, początku wtrysku paliwa  $-50^\circ$  po GMP w suwie napełniania, kąta wtrysku paliwa  $60-63^\circ$

Fig. 10. Influence of the turbochargers and of the fuel upon the data of the engine M1636 ENE. Engine speed 1200 rpm, load 40%, spark advance  $17^\circ$  BTDC, start of fuel injection  $50^\circ$  from the beginning of the suction stroke, and the last of the injection maintained in an interval of  $60-63^\circ$



Rys. 9. Wartości opalowe mieszanki dwóch paliw dla zewnętrznego i wewnętrznego tworzenia mieszanki dla  $\lambda = 1$  i  $\lambda > 1$

Fig. 9. Calorific values of a mixture of two fuels at the outside and inside formation of the mixture, and at the coefficient of the air ratio excess  $\lambda = 1$  and  $\lambda > 1$

tion pressures. The suppression or, better said, the attenuation of the interference has been achieved by adapting the power supply to the control units, passive shielding of the sensed quantities etc.

During debugging, the courses of important control functions have been followed with a two-channel oscilloscope Hewlett Packard with a high sampling frequency. The courses also have been recorded together with the pressure in the engine cylinder and the pressure behind the electromagnetic

valve for the fuel by means of the indicating apparatus AVL Indimeter in dependence upon the turning of the crank shaft: the effected measuring has confirmed reliably the proper timing of both the ignition and the blow-in of the gas.

Both from safety and economic reasons, the first tests of the engine have been effected by combusting natural gas. At present, our experiments concentrate upon the optimization of the control parameters of the engine, especially in the case of combustion of hydrogen.

It can be seen that in comparison with natural gas, the same mean effective pressure ( $p_{ef}$ ) approximately has been reached with hydrogen at higher coefficients of the excess of

dzono spalając gaz ziemny. Obecnie nasze badania koncentrują się wokół optymalizacji parametrów pracy silnika, zwłaszcza w przypadku spalania wodoru.

Można zauważyć, iż w porównaniu z gazem ziemnym, wartość średniego ciśnienia użytecznego wzrosła przy zasilaniu wodorem dla większych wartości współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  i przy znacznie mniejszym stężeniu tlenków azotu ( $\text{NO}_x$ ).

Wskazane jest osiągnięcie maksymalnej wartości opałowej mieszanki przy tej samej ilości powietrza. Dostrzec można, że silnik spalinowy zasilany wodorem, z wewnętrznym tworzeniem mieszanki palnej, ma największy potencjał w tym zakresie. W przypadku użycia metanu (CNG), który ma dużą gęstość, korzyść jest znacznie mniejsza. Jedyną uwagę: w całym bilansie nie wolno zapomnieć, że potencjał silników o wewnętrznym tworzeniu mieszanki zależy też od sprawności indukowanej.

Widoczne jest, że w przypadku bardzo ubogich mieszanek, dla tego samego otwarcia przepustnicy, bardziej odpowiednie dla uzyskiwania większej mocy silnika jest zastosowanie mniejszej turbosprężarki (typ K28). Zatem niezbędną ilość powietrza dla określonego obciążenia uzyskuje się w wyniku mniejszego otwarcia przepustnicy.

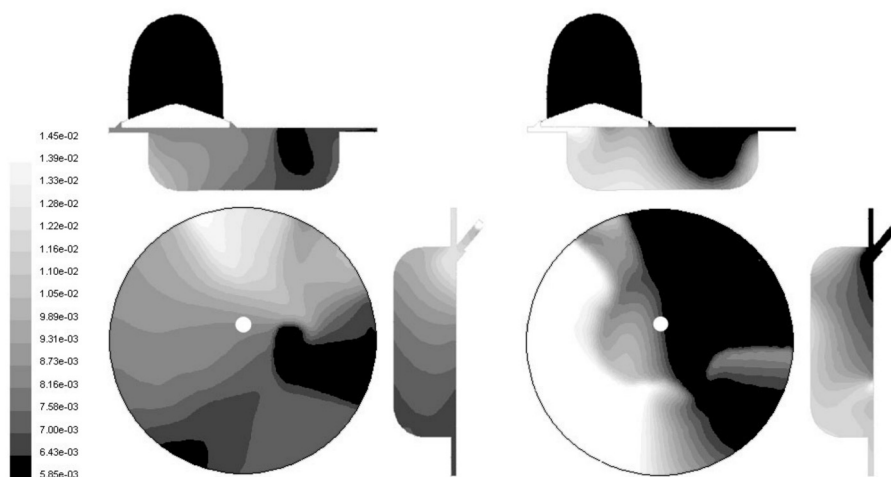
#### 4. Modelowanie wtrysku wodoru

W celu uproszczenia geometrii i wymagań podczas procesu obliczeń, nie modelowano całego czterosuwowego cyklu pracy silnika, a jedynie suwy napełnienia i sprężania wraz z ruchem zaworu dolotowego. Zaworu i przewodu wylotowego nie brano pod uwagę. W ten sposób nie uwzględniono pędu czynnika w cylindrze na początku suwu napełniania, który jest zależny od poprzedniego cyklu roboczego. Modelowanie przeprowadzono dla dwóch przypadków wtrysku paliwa:

- wtrysk paliwa w suwie napełniania,
  - wtrysk paliwa w suwie sprężania,
- dla warunków pracy silnika odpowiadających prędkości obrotowej  $n = 1200$  obr/min.

Uproszczoną geometrię przewodu dolotowego, zaworu dolotowego i komory spalania zamodelowano w programie ProEngineer. Tworzenie siatki obliczeniowej realizowano w środowisku programu Gambit, natomiast matematyczne rozwiązanie w programie Fluent. Do obliczeń przepływów niestacjonarnych zastosowano oddzielne narzędzie w programie Fluent oraz standardowy, dwurównaniowy model k-epsilon. Właściwości wymieszanych gazów (wodoru i powietrza) ustalono w oparciu o domyślne ustawienia zawarte w programie.

Na rysunku 12 przedstawiono wyniki symulacji wtrysku dla obu rozważanych paliw alternatywnych, dla położe-



Rys. 11. Warstwy rozkładu masy wodoru. Widok po lewej stronie: początek wtrysku paliwa 330° przed GMP, widok po prawej stronie: początek wtrysku paliwa 180° przed GMP

Fig. 11. Contours of mass fraction distribution of hydrogen. Left: start of injection 330° before TDC, right: start of injection 180° before TDC

air  $\lambda$  and with substantially lower concentrations of nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ).

It is desirable to achieve the maximum possible calorific value of the fuel mixture at the same quantity of the air. As it can be seen, a hydrogen engine with inside mixture formation has the best potential. However, in the case of employing methane (CNG), which has a high density, the benefit is much less. Only as a remark: In the overall balance, it must not be forgotten that the output potential of engines with inside mixture formation depends also on the indicated efficiency.

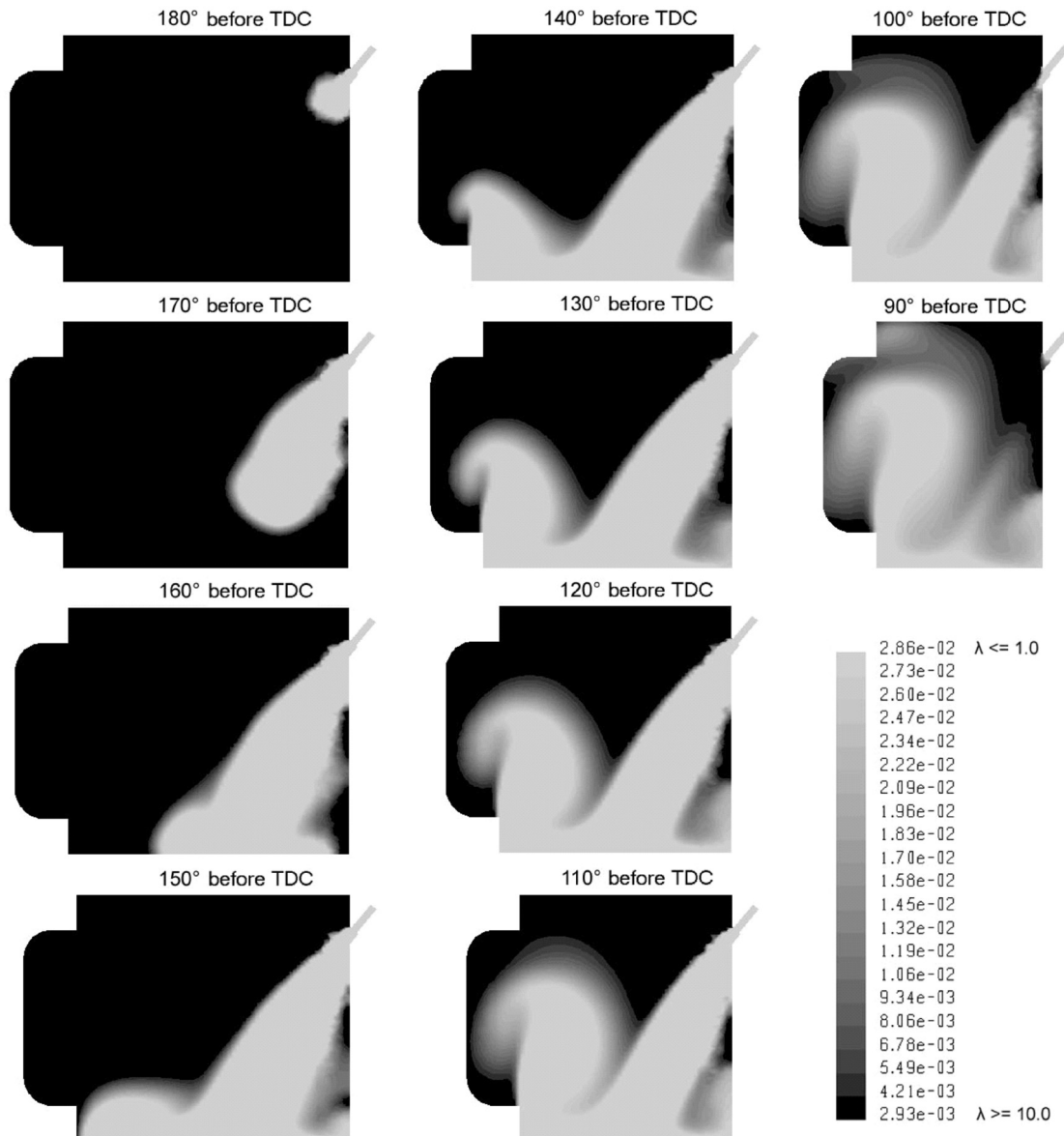
As it can be seen with very lean mixtures, a smaller turbocharger (type K28) is more suitable for a higher output potential, at the same opening position of the throttle valve. Therefore, the necessary amount of air for a determined load is reached with the throttle valve less opened.

#### 4. Simulate of hydrogen injection

In order to simplify the geometry and the demands on the calculation, there has not been simulated the whole four-stroke cycle of the engine, but the intake and compression strokes of the piston only, completed with the movement of the intake valve. The exhaust valve and the exhaust piping have been disregarded. In this way, there has been disregarded the momentum of the medium in the cylinder at the beginning of the intake stroke, which in fact is influenced by the preceding operating cycle. There have been simulated two alternatives of injection-timing of fuel at the engine speed of 1200 rpm:

- injection during the intake stroke,
- injection during the compression stroke.

A simplified geometry of a part of the suction tract, the valve and the combustion chamber has been created in the program ProEngineer. The creation of the calculating mesh has taken place in the environment of the program Gambit, and the numerical solution in the Fluent. For the non-stationary calculation of the flow, a segregated solver has been employed in the Fluent, and a standard two-equation k-epsilon



Rys. 12. Warstwy rozkładu masy wodoru podczas procesu wtrysku dla:  $n = 1200$  obr/min, kąta początku wtrysku paliwa  $-180^\circ$  przed GMP, kąta trwania wtrysku paliwa  $70^\circ$

Fig. 12. Contours of mass fraction distribution of hydrogen during injection: engine speed 1200 rpm, start of injection  $180^\circ$  before TDC, injection duration  $70^\circ$

nia tłoka odpowiadającego  $10^\circ$  przed GMP, to jest dla przypuszczalnej chwili wystąpienia zapłonu. Dostrzec można, że mieszanka wodoru i powietrza utworzona w procesie wtrysku paliwa w suwie napełniania charakteryzuje się bardziej jednorodnym rozkładem stężenia wodoru; mieszanka jest bardziej jednorodna. Mieszanka utworzona w suwie sprężania jest bardziej niejednorodna.

## 5. Podsumowanie

Silnik spalinowy zasilany paliwem wodorowym stanowi przyszłościowe rozwiązanie dla poszukiwań następcy dzisiejszego, względnie ekologicznego, chroniącego środowisko naturalne gazowego silnika zasilanego tradycyjnymi paliwami węglowodorowymi.

Podsumowując, powyższe wyniki i ich omówienie mogą być streszczone w następujący sposób:

lon model. The material characteristics of the mixed gases (hydrogen-air) have been maintained according to the implicit setting.

The figure 12 shows the results of the simulation of the injection of both the considered alternatives in the position of the piston  $10^\circ$  before its upper dead centre, i.e. in the supposed moment of ignition. It can be seen that the hydrogen & air mixture formed by the injection during the intake stroke is characterised by a more uniform distribution of the hydrogen concentration the mixture is more homogeneous. On the contrary, a mixture formed during the compression stroke is more heterogeneous.

## 5. Conclusion

The internal combustion hydrogen-fuelled engine is a prospective solution in the search for a successor to the ac-



- podstawowe problemy techniczne w rozwoju silnika zasilanego wodorem dotyczą uzyskiwanej zmniejszonej wartości mocy użytecznej z powodu mniejszej wolumetrycznej gęstości energii mieszanki wodoru i powietrza oraz problemów związanych z procesem spalania, takich jak zapłon wsteczny (w kanale dolotowym) i przedwczesny zapłon,
- koncepcja silnika, taka jak wyposażenie go w turbosprężarkę, chłodnicę powietrza doładowującego, układ wewnętrznego mieszania z równoważnym współczynnikiem paliwo/powietrze  $\Phi < 0,5$  może wpłynąć na wzrost mocy użytecznej przy jednocześnie skrajnie niskim poziomie emisji tlenków azotu ( $\text{NO}_x$ ),
- w systemie tworzenia mieszanki palnej wewnątrz cylindra, w którym do powietrza dostarczonego do cylindra jest wtryskiwany wodór, z uwagi na bezpieczeństwo najkorzystniejsze jest zastosowanie systemu sterowania dopływem wodoru. Podczas naszych badań laboratoryjnych (obejmowały one przypadki, w których wodór wtryskiwano przed zamknięciem zaworu dolotowego w zakresie niewielkiego ciśnienia wynoszącego około 1 MPa) nie odnotowano żadnych przypadków zapłonu wstecznego do kanału dolotowego.

## 6. Podziękowania

Prace naukowe były prowadzone w ramach projektu realizowanego dla Czeskiego Urzędu ds. Dotacji Naukowych (projekt badawczy nr: GACR 101/01/1114).

tual relatively ecological, environment protecting gas-driven engine combusting traditional hydrocarbon fuels.

In conclusion, the above results and their discussion can be summarized as follows:

- The primary technical problems in hydrogen engine development are (i) reduced power output, due to lower volumetric energy density of a hydrogen/air mixture and (ii) combustion related problems such as backfire and premature ignition.
- The engine concepts such as adding turbocharger, intercooler, internal mixing system with fuel/air equivalence ratio  $\Phi < 0.5$  can increase the power output even at extremely low levels of exhaust-emission of nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ).
- With the in-cylinder fuel mixing system in which air only is taken in first and then hydrogen is injected directly into the cylinder is the safest hydrogen-operated engine-system. Never any backfire were detected during our laboratory experiments (included cases, when hydrogen was injected before closing of the intake valve at a low pressure of around 1 MPa).

## 6. Acknowledgements

The study has been elaborated in the frame of a Czech Grant Agency Project (research project No. GACR 101/01/1114).

Artykuł recenzowany

## Literatura/Bibliography

- [1] Kovar Z., Beroun S., Scholz C., Blazek J., Drozda H., Zalhav Z.: Study on the Combustion of Hydrogen Lean Mixture in Experimental Direct Injection SI Engine. FISITA 2002 World Automotive Congress, Helsinki 2002.
- [2] Scholz C., Kovar Z., Beroun S., Drozda H., Blazek J.: Piston Engine for Combustion of Hydrogen. 6<sup>th</sup> International Conference and Exhibition: Traffic and Technologies for Sustainable Development. Karlove Vary 2003.

## Skróty i oznaczenia / Abbreviations and Nomenclature

AMF strumień masy powietrza / *Air Mass Flow*  
IT temperatura na wlocie / *Inlet Temperature*

Inż. Milan Nydrle – Katedra Maszyn Drogowych, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Politechnika w Libercu, Republika Czeska.

Mr Milan Nydrle, Eng – Department of Transport Machines, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Liberec, Czech Republic.



Inż. Hynek Drozda – Katedra Maszyn Drogowych, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Politechnika w Libercu, Republika Czeska.

Mr Hynek Drozda, Eng – Department of Transport Machines, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Liberec, Czech Republic.



Inż. Josef Blazek – Katedra Maszyn Drogowych, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Politechnika w Libercu, Republika Czeska.

Mr Josef Blazek, Eng – Department of Transport Machines, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Liberec, Czech Republic.



Doc. inż. Miroslav Svoboda – Katedra Maszyn Drogowych, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Politechnika w Libercu, Republika Czeska.

Mr Miroslav Svoboda, Doc, Eng – Department of Transport Machines, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Liberec, Czech Republic.



Prof. inż. Zdenek Kovar – Katedra Maszyn Drogowych, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Politechnika w Libercu, Republika Czeska.

Prof. Zdenek Kovar, Eng, CSc. – Department of Transport Machines, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Liberec, Czech Republic.



Doc. dr inż. Celestyn Scholz – Katedra Maszyn Drogowych, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Politechnika w Libercu, Republika Czeska.

Mr Celestyn Scholz, PhD, Eng – Department of Transport Machines, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Liberec, Czech Republic.



Prof. inż. Stanislav Beroun – Katedra Maszyn Drogowych, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Politechnika w Libercu, Republika Czeska.

Prof. Stanislav Beroun, Eng – Department of Transport Machines, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Liberec, Czech Republic.

