

Effect of the compression ratio on selected combustion process parameters in a natural gas fuelled compression ignition engine operating in a dual-fuel mode

Abstract: The present paper relates to the problem of the effect of compression ratio of a dual-fuel compression ignition engine fuelled with natural gas (CNG) on selected combustion process parameters. In the course of investigation, there were registered pressure values in the combustion chamber versus crankshaft angle for various compression ratios. The obtained characteristics enabled to determine such combustion process parameters as: maximum pressure P_{max} , mean rate of pressure rise $\left(\frac{\Delta p}{\Delta \alpha}\right)_{sr}$, maximum rate of pressure rise $\left(\frac{dp}{d\alpha}\right)_{max}$, versus torque M , as well as fuel burnout ratio x versus crankshaft angle α . Analysis of the results indicates strong relationship between the above mentioned parameters and the compression ratio ε of a dual-fuel engine.

Keywords: compression ratio, dual-fuel engine, combustion process, natural gas

Wpływ stopnia sprężania na wybrane parametry procesu spalania w silniku o zapłonie samoczynnym zasilanym dwupaliwowo gazem ziemnym i olejem napędowym

Streszczenie: Artykuł dotyczy zagadnień wpływu stopnia sprężania dwupaliwowego silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego gazem naturalnym CNG na wybrane parametry procesu spalania. W ramach badań dokonano rejestracji przebiegu ciśnień w komorze spalania w funkcji obrotu wału korbowego dla różnych wartości stopnia sprężania. Zarejestrowane charakterystyki pozwoliły na wyznaczenie takich parametrów procesu spalania jak: ciśnienie maksymalne P_{max} , średnia szybkość narastania ciśnienia $\left(\frac{\Delta p}{\Delta \alpha}\right)_{sr}$, maksymalna szybkość narastania ciśnienia $\left(\frac{dp}{d\alpha}\right)_{max}$, w funkcji momentu obrotowego M , oraz stopnia wypalenia dawki x w funkcji obrotu wału korbowego α . Analiza uzyskanych wyników wykazuje silną ich zależność od wartości stopnia sprężania ε silnika dwupaliwowego.

Słowa kluczowe: stopień sprężania, silnik dwupaliwowy, proces spalania, gaz naturalny

1. Wstęp

W niniejszym artykule podjęto próbę wyjaśnienia wpływu stopnia sprężania na przebieg procesu spalania w dwupaliwowym silniku o zapłonie samoczynnym zasilanym gazem ziemnym i olejem napędowym. Wybór gazu ziemnego spowodowany jest możliwością powszechnego zastosowania, ze względu na cenę i jego dostępność. Paliwo to w niedalekiej przyszłości według przewidywań stanowić będzie poważną alternatywę dla ciekłych paliw ropopochodnych [1, 2].

W ramach badań opisanego w artykule silnika dwupaliwowego rejestrowano przebiegi ciśnień w komorze spalania w funkcji kąta obrotu wału korbowego. Badania te prowadzono w celu oceny wpływu stopnia sprężania silnika dwupaliwowego na podstawowe parametry pracy takie jak: praca indykowana obiegu, wartości ciśnień maksymalnych, średnie i chwilowe szybkości narastania ciśnień $\left(\frac{\Delta p}{\Delta \alpha}\right)_{sr}$; $\left(\frac{dp}{d\alpha}\right)_{max}$.

2. Procedura badań

Po wstępnej analizie szeregu rozwiązań technicznych dotyczących zmienności stopnia sprężania w tłokowych silnikach spalinowych, uwzględnieniu możliwości przystosowania silnika badawczego do zmiany stopnia sprężania w warunkach laboratoryjnych zdecydowano, że zmiana tego parametru realizowana będzie najprostszym do wykonania sposobem przy wykorzystaniu tłoków o różnej wysokości. W metodzie tej każdorazowa zmiana stopnia sprężania wymaga demontażu silnika w celu wymiany wcześniej przygotowanego tłoka. Głównym powodem, dla którego wybrano tę metodę jest niewielka ingerencja w kształt komory spalania. Z badawczego punktu widzenia bardzo istotne jest by kształt komory spalania został zachowany bez względu na wielkość stopnia sprężania i możliwie w najmniejszym stopniu wpływał na zmianę procesu przygotowania i spalania mieszanki paliwowo powietrznej. Jest to szczególnie istotne w silniku

dwupaliwowym o zapłonie samoczynnym. Badania przeprowadzono dla czterech wartości stopnia sprężania $\varepsilon=17$, $\varepsilon=16$, $\varepsilon=15$, $\varepsilon=14$ na jednocylindrowym silniku 1HC 102 (rys. 1) wyposażonym w układ zasilania common rail.

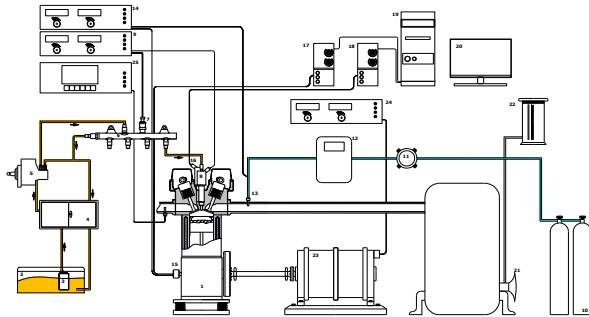


Fig. 1. Scheme of the test bench of a compression ignition dual-fuel engine operating on natural gas and diesel oil: 1-test engine, 2- diesel oil tank, 3- low pressure fuel pump, 4- diesel oil dosimeter, 5- high pressure fuel pump, Common Rail, 6- rail, 7- diesel oil pressure sensor, 8- diesel oil injector, 9- Common Rail controller, 10- CNG tank, 11- pressure reductor, 12- natural gas meter, 13- natural gas injector, 14- natural gas supply controller, 15- crankshaft position sensor, 16- cylinder pressure sensor, 17- amplifier of the signal from the crankshaft position sensor, 18- amplifier of the signal from the cylinder pressure sensor, 19- computer, 20- monitor, 21- lemniscate, 22- micromanometer, 23- electrrotational brake, 24- torque and engine speed measurement system, 25- exhaust gas analyzer

Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego dwupaliwowego silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego gazem ziemnym i olejem napędowym: 1 silnik badawczy, 2 zbiornik oleju napędowego, 3 pompa niskiego ciśnienia, 4 dawkomierz oleju napędowego, 5 pompa wysokiego ciśnienia common rail, 6 listwa zbiorcza, 7 czujnik ciśnienia oleju napędowego, 8 wtryskiwacz oleju napędowego, 9 sterownik systemu common rail, 10 zbiorniki sprężonego gazu ziemnego, 11 reduktor ciśnienia, 12 gazomierz, 13 wtryskiwacz gazu, 14 sterownik wtrysku gazu, 15 nadajnik kąta obrotu wału korbowego, 16 czujnik ciśnienia w cylindrze, 17 wzmacniacz sygnału nadajnika kąta, 18 wzmacniacz sygnału czujnika ciśnienia, 19 komputer z kartą pomiarową, 20 monitor, 21 lamniskata, 22 mikromanometr, 23 hamulec elektrowirowy, 24 układ pomiaru momentu i prędkości obrotowej, 25 analizator spalin.

Badania obejmowały sporządzenie charakterystyk obciążeniowych dla:

- czterech wartości stopnia sprężania $\varepsilon=14$, $\varepsilon=15$, $\varepsilon=16$, $\varepsilon=17$,
- czterech prędkości obrotowych silnika ($n=1200, 1600, 1900, 2200$ obr/min),
- dwóch wartości inicjującej zapłon dawki oleju napędowego $d_{ON I}$ i $d_{ON II}$

W wyniku tych badań sporządzono:

- charakterystyki przebiegu ciśnień w komorze spalania w funkcji prędkości obrotowej wału korbowego $P = f(\alpha^{\circ}OWK)$

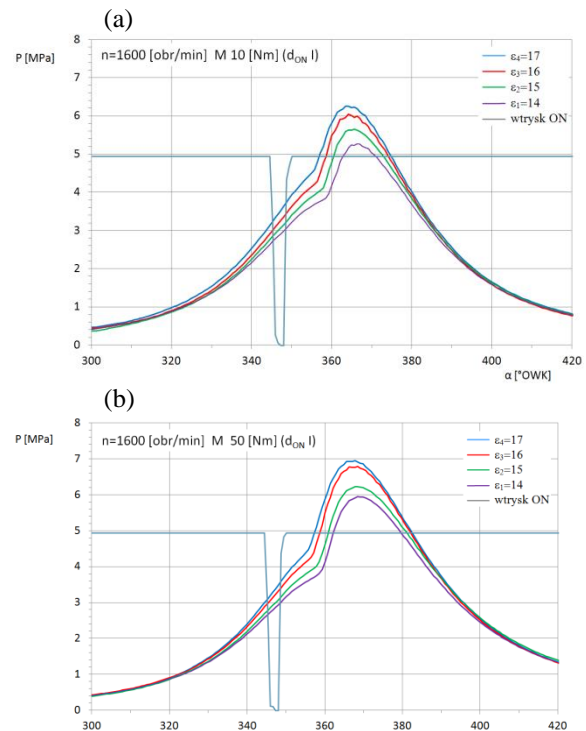


Fig. 2. Selected characteristics of fuel pressure course in the combustion chamber obtained for: four compression ratios: $\varepsilon_1=14$, $\varepsilon_2=15$, $\varepsilon_3=16$, $\varepsilon_4=17$, engine speed of 1600 rpm, pilot diesel oil dose ($d_{ON I}$) (a) for the load of 10 Nm, (b) for the load of 50 Nm

Rys. 2. Wybrane charakterystyki przebiegu ciśnienia w komorze spalania uzyskane dla:

- czterech stopni sprężania $\varepsilon_1=14$, $\varepsilon_2=15$, $\varepsilon_3=16$, $\varepsilon_4=17$,
- prędkości obrotowej silnika $n=1600$ [obr/min],
- wielkości inicjującej dawki oleju napędowego ($d_{ON I}$) (a) dla obciążenia 10 Nm, (b) dla obciążenia 50 Nm

3. Wyniki badań wpływu stopnia sprężania ε na podstawowe parametry pacy silnika

Zarejestrowane charakterystyki przebiegu ciśnień w komorze spalania pozwoliły na wykonanie analizy wpływu stopnia sprężania ε na podstawowe parametry procesu spalania takie jak:

- charakterystyk obciążeniowych ciśnień maksymalnych $P_{max}=f(M)$
 - charakterystyk obciążeniowych maksymalnej szybkości narastania ciśnienia $\left(\frac{dp}{d\alpha}\right)_{max} = f(M)$
 - charakterystyk obciążeniowych średniej szybkości narastania ciśnienia $\left(\frac{\Delta p}{\Delta \alpha}\right)_{sr} = f(M)$
 - charakterystyk zmienności wypalenia dawki paliwa w funkcji kąta obrotu wału korbowego
- Charakterystyki te zamieszczono na rysunkach 3,4.

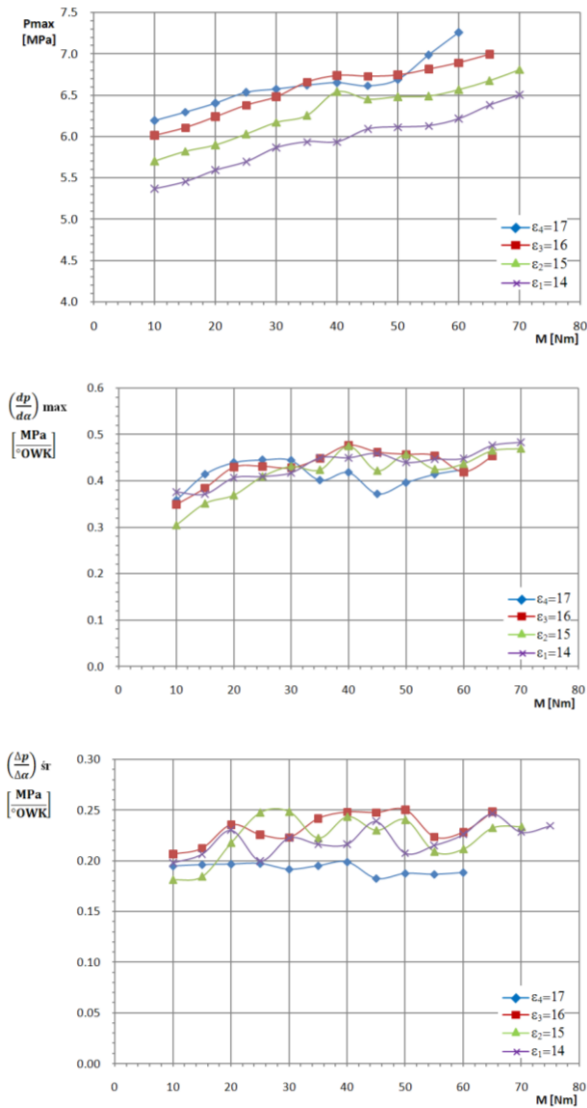


Fig. 3. Load characteristics of: maximum pressure $P_{max} = f(M)$, maximum momentary rate of pressure rise $(\frac{dp}{d\alpha})_{max} = f(M)$, mean rate of pressure rise $(\frac{\Delta p}{\Delta \alpha})_{sr} = f(M)$, prepared for the engine speed $n = 1600$ rpm and the pilot diesel oil dose ($d_{ON II}$)

Rys. 3. Charakterystyki obciążeniowe: maksymalnych ciśnień $P_{max} = f(M)$, maksymalnej chwilowej szybkości narastania ciśnienia $(\frac{dp}{d\alpha})_{max} = f(M)$, średniej szybkości narastania ciśnienia $(\frac{\Delta p}{\Delta \alpha})_{sr} = f(M)$, sporządzone dla prędkości obrotowej silnika $n = 1600$ [obr/min] oraz wielkości dawki inicjującej oleju napędowego ($d_{ON II}$)

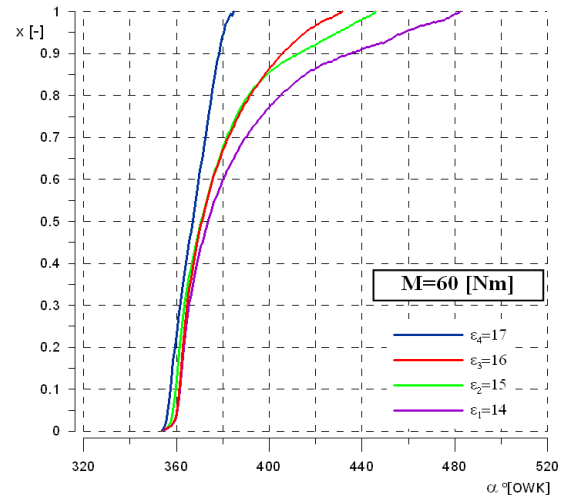


Fig. 4. Characteristics of the fuel burnout ratio variability versus crankshaft angle for the engine load of 60 Nm, the engine speed $n = 1600$ rpm and the pilot diesel oil dose $d_{ON II}$

Rys. 4. Przebieg charakterystyk zmienności stopnia wypalenia dawki paliwa w funkcji kąta obrotu wału korbowego dla obciążenia 60 [Nm], prędkości $n=1600$ [obr/min], dawka $d_{ON II}$

4. Wyniki badań wpływu stopnia sprężania ϵ na pracę indykowaną oraz sprawności cieplną η_c , mechaniczną η_m , i ogólnej η_o

Zarejestrowane przebiegi ciśnień w komorze spalania oraz pomierzone w trakcie badań wartości zużycia energii obu paliw a także osiągnięte wartości momentu obrotowego silnika pozwoliły na obliczenie podstawowych parametrów charakteryzujących obieg cieplny silnika dla różnych obciążeń M [Nm], oraz różnych stosowanych wartości stopnia sprężania ϵ 14÷17. Wyliczono wartości energii dostarczonej na jeden cykl pracy E_d [J/cykl], pracy indykowanej L_i [J/cykl], sprawności cieplnej obiegu η_c [%], pracy użytecznej L_u [J/cykl], sprawności mechanicznej η_m [%], oraz sprawności ogólnej η_o [%]. Charakterystyki te zamieszczono na rysunkach 5,6.

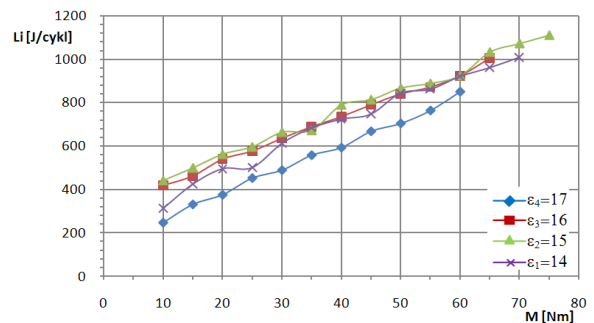


Fig. 5. Load characteristics of the indicated work prepared for the engine speed $n = 1600$ rpm and the pilot diesel oil dose ($d_{ON II}$)

Rys. 5. Charakterystyka obciążeniowa pracy indykowanej sporządzona dla prędkości obrotowej silnika $n = 1600$ [obr/min] oraz wielkości dawki inicjującej oleju napędowego ($d_{ON II}$)

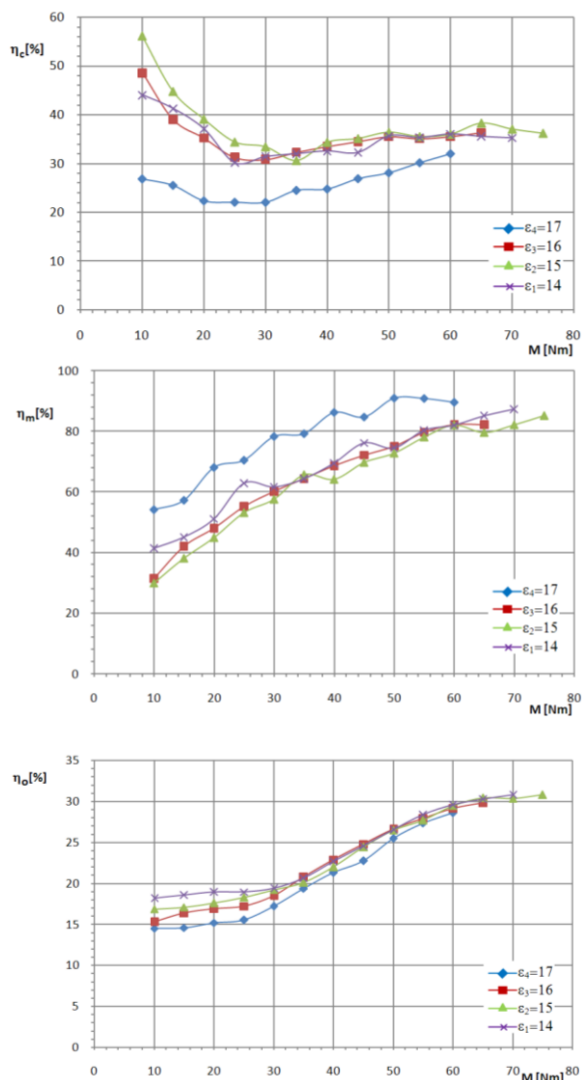


Fig. 6. Load characteristics of:
 - thermal efficiency η_c , - mechanical efficiency η_m ,
 - overall efficiency η_o
 prepared at various compression ratios $\epsilon_1=14$, $\epsilon_2=15$, $\epsilon_3=16$,
 $\epsilon_4=17$, engine speed $n = 1600$ rpm and the pilot diesel oil dose
 ($d_{ON II}$)

Rys. 6. Charakterystyki obciążeniowe:
 - sprawności cieplnej η_c , - sprawności mechanicznej η_m ,
 - sprawności ogólnej η_o
 sporządzone przy różnych wartościach stopnia sprężania $\epsilon_1=14$,
 $\epsilon_2=15$, $\epsilon_3=16$, $\epsilon_4=17$, prędkości obrotowej silnika $n=1600$
 [obr/min], wielkości dawki oleju napędowego ($d_{ON II}$).

5. Wnioski

1. Charakterystyki zmienności poszczególnych sprawności silnika (ogólnej η_o , cieplnej η_c , oraz mechanicznej η_m) wykazują że wraz ze wzrostem wartości stopnia sprężania maleje wartość sprawności cieplnej obiegu η_c . To zjawisko decyduje o spadku sprawności ogólnej silnika η_o pomimo wzrostu wartości mechanicznej η_m .

2. W wyniku badań zmienności podstawowych charakterystyk procesu spalania prowadzą do spostrzeżenia że wraz ze wzrostem wartości stopnia sprężania rośnie wartość maksymalnego ciśnienia obiegu P_{max} . Zjawisko to wydaje się być jednoznacznie zrozumiałe. Ponadto dla większych prędkości obrotowych silnika obserwuje się także wzrost wartości średnich i maksymalnych szybkości narastania ciśnienia $\frac{\Delta p}{\Delta \alpha}$ \bar{s}_r , $\frac{dp}{d\alpha}$ max.

3. Analiza wyników zmienności wartości pracy indykowanej obiegu L_i [J/cykl] (rys.5) prowadzi do spostrzeżenia że wraz ze wzrostem stopnia sprężania maleje wartość pracy indykowanej obiegu L_i . Wynika to z faktu przyjęcia stałej wartości kąta wyprzedzenia wtrysku α_w inicjującej zapłon dawki oleju napędowego dla wszystkich wartości stosowanego stopnia sprężania ϵ .

4. Za koniecznością wprowadzenia zmienności kąta wyprzedzenia wtrysku w zależności od wartości stopnia sprężania ϵ przemawiają przedstawione przebiegi charakterystyk zmienności stopnia wypalania dawki paliwa które silnie zależą od stopnia sprężania ϵ . Pokazują one także że od wartości stopnia sprężania ϵ zależy silnie czas zwłoki samozapłonu. Poprawny dobór kąta wyprzedzenia wtrysku inicjującej zapłon dawki oleju napędowego do wartości stosowanego stopnia sprężania silnika ϵ pozwoli na umiejscowienie przebiegu procesu spalania w korzystnym położeniu wału korbowego co skutkować będzie zwiększeniem pracy indykowanej obiegu L_i , poprawą jego sprawności cieplnej i w efekcie sprawności ogólnej η_o .

5. Przy doborze stopnia sprężania dwupaliwowego silnika o zapłonie samoczynnym konieczne jest przeprowadzenie badań nad doбором korzystnego kształtu komory spalania w celu uniknięcia niekorzystnych tendencji takich jak: (osiadania strugi oleju napędowego na ściankach komory spalania, niecałkowitego i niezupełnego spalania paliwa CNG w obszarach komory spalania odległych od wtryskiwacza, wygaszania płomienia itp).

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

CNG Compressed Natural Gas/sprężony gaz ziemny

Bibliography/Literatura

- [1] World Energy Outlook : Lescure Theol, 2009.
- [2] Warowny W.: Gaz ziemny i jego charakterystyka jako paliwa do pojazdów kołowych. Gaz Woda i Technika Sanitarna. 8, 2001, 267-272.
- [3] Stelmasiak Z.: Wpływ przebiegu spalania gazu na parametry procesu spalania dwupaliwowego silnika zasilanego gazem ziemnym i olejem napędowym. Kraków Komisja Naukowo-Probleмова Motoryzacji PAN Oddz. Kraków, nr 22, 2001.
- [4] Stelmasiak Z.: Ekologiczno-ekonomiczne aspekty zastosowania gazu w silnikach dwupaliwowych.: III Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna, Jedlnia-Letnisko, 5-6 czerwca 2001 /: Politechnika Radomska, 2001 s.459-466 Radom 2001.
- [5] Luft S.: Dobór regulacji dwupaliwowego silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego paliwami alternatywnymi z punktu widzenia odsunięcia niebezpieczeństwa występowania spalania stukowego oraz przedwczesnych samozapłonów mieszanki paliwa głównego z powietrzem.: grant nr NN 504301237

Prof. Sławomir Luft, DSc., DEng. – Profesor at the Faculty of Mechanical Engineering, University of Technology and Humanities in Radom.

Prof. dr hab. inż. Sławomir Luft – profesor na Wydziale Mechanicznym Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego w Radomiu.



Mr. Tomasz Skrzek – research worker in the Institute of Vehicle and Machine Exploitation, Faculty of Mechanical Engineering, University of Technology and Humanities in Radom.

Mgr inż. Tomasz Skrzek – pracownik naukowo techniczny Instytutu Eksploatacji Pojazdów i Maszyn na Wydziale Mechanicznym Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego w Radomiu.

