

Stabilizacja spalania rozpylonej strugi paliwa w wysokonapięciowym kanale plazmowym

Streszczenie. Przedstawiono wyniki prób stabilizacji płomienia podczas spalania rozpylonej strugi paliwa przy pomocy wysokonapięciowej plazmy łukowej o mocy do 170 VA. Badania wykonano na stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w komercyjny palnik olejowy. Analizowano wpływ działania plazmy łukowej na jakość spalania oleju opałowego (stabilizacja płomienia, temperatury procesu i zawartość CO w spalinach w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza λ). Sprawdzono możliwość „sztucznego” ($\lambda \gg 1$) utrzymywania płomienia, dzięki plazmowej stabilizacji.

Abstract. Results of the flame stabilization during combustion of sprayed fuel by a high voltage plasma arc with power up to 170 VA, were presented. The study was performed on test stand equipped with a commercial oil burner. The influence of plasma arc activities on the quality of fuel oil combustion (the flame stabilization, process temperature and CO content in the exhaust gas as the function of excess air ratio λ) were analyzed. Possibility of "artificial" ($\lambda \gg 1$) maintenance of the flame by effect of plasma stabilization was verified. (**Combustion stabilization of fuel spray by the high voltage plasma channel**)

Słowa kluczowe: plazma, paliwa ciekłe, jakość spalania, stabilizacja płomienia.

Keywords: plasma, liquid fuels, combustion quality, flame stabilization

doi:10.12915/pe.2014.10.13

Wstęp

Pomimo zauważalnego udziału odnawialnych źródeł energii w ogólnym bilansie energetycznym konsumpcja paliw kopalnych, w szczególności ropy naftowej, nadal rośnie. Szacuje się, że do 2035 roku popyt na ropę naftową wzrośnie o 25% i wyniesie 59 mln baryłek dziennie [1]. Dlatego nadal istotne są działania zmierzające do poprawy procesu spalania paliw ropopochodnych, co wprost przełoży się na zmniejszanie szkodliwego wpływu wytwarzanych spalin na środowisko naturalne. Spalanie paliw ropopochodnych w komorach spalania jest znane i praktykowane od ponad wieku, jednakże złożoność zachodzących procesów fizykochemicznych nawet dziś sprawia trudności z ich identyfikacją i opisem [2-4].

Zagadnienia stabilizacji spalania rozpylonej strugi paliwa są ważne dla zapewnienia ciągłej i bezawaryjnej pracy aparatów cieplnych takich jak energetyczne kotły na paliwa ciekłe, a w szczególności silniki lotnicze [2, 3]. Obecnie najczęściej stosowane sposoby stabilizacji spalania rozpylonej strugi paliw płynnych opierają się o rozwiązania technologiczne oparte na odpowiednim aerodynamicznym ukształtowaniu strugi [2-4, 5]. W zaproponowanej nowatorskiej metodzie do stabilizacji spalania rozpylonej strugi paliwa wykorzystano kanał plazmowy małej mocy (< 170 VA) powstający podczas wysokonapięciowego wyładowania łukowego prądu przemiennego o częstotliwości 50 Hz pomiędzy prętowymi elektrodami [5]. Otrzymał ją w ten sposób plazmę, na podstawie przeglądu prac [6, 7-9], zakwalifikowano jako termiczną plazmę niskotemperaturową (ang. *thermal plasma*). W trakcie prób badano wpływ działania kanału plazmowego na jakość spalania (stabilizacja płomienia, temperatury procesu i analiza udziału CO w spalinach w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza λ). Jak wykazały wstępne badania istnieje możliwość wykorzystania plazmy łukowej małej mocy do stabilizacji płomienia (efektywne zapobieganie zrywaniu zawirowanego płomienia) oraz istnieją przesłanki o poprawie jakości spalania ubogich mieszanek.

Stanowisko badawcze

Obecnie nie są znane autorom znormalizowane metody do badania stabilizacji spalania rozpylonej strugi paliwa. Przedstawione w pracy stanowisko jest konstrukcją nowatorską. Dobrej jakości stanowisko jako baza został wykorzystany komercyjny nadmuchiwy palnik olejowy typu LG-10 o regulowanej mocy cieplnej w zakresie 8-28 kW,

niemieckiego producenta Scheer Heiztechnik GmbH. Palnik został poddany modyfikacjom. Umożliwia on spalanie oleju opałowego lub alternatywnych paliw ciekłych, których lepkość kinematyczna w normalnych warunkach jest nie większa niż 10 mm²/s, w typowych urządzeniach grzewczych (kotły, piece) [10]. Do najważniejszych modyfikacji w palniku zaliczyć należy demontaż sterownika palnika (zlikwidowano blok automatyki). W jego miejsce zastosowano moduł operacyjny sterowany manualnie (co pozwala na dowolne sterowanie poszczególnymi fazami pracy palnika). W celu precyzyjnej kontroli ilości dostarczanego powietrza do procesu spalania palnik podłączono do instalacji sprężonego powietrza wyposażonej w układ pomiaru masowego natężenia przepływu poprzez specjalny kolektor rozprężny [5]. Podczas eksperymentów stosowano dyszę Danfoss 60°S o maksymalnym wydatku paliwa 1,5 kg/h (o pełnym stożku i kącie rozpylania 60°) [11]. W palniku zastosowano pompę zębatą firmy Danfoss typu BFP 21 L3k, która umożliwia zmianę wydatku rozpylanego paliwa przez regulację ciśnienia w zakresie od 6 do 15 bar (krótkotwale do 20 bar) [12].

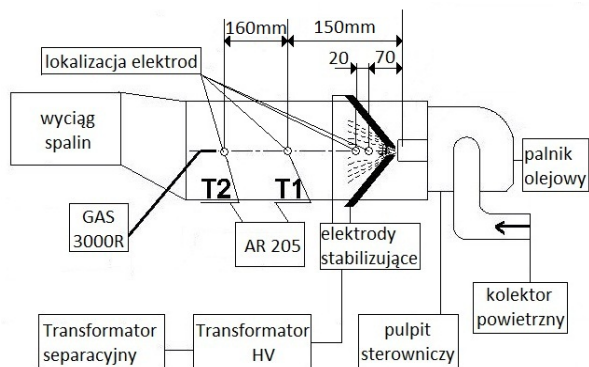
Ważnym elementem opracowanego stanowiska jest specjalna komora z szeregiem otworów rewizyjnych, które umożliwiają zmianę lokalizacji i konfiguracji prętowych elektrod wyładowczych/zapłonowych wzdłuż jej długości, jak również zamontowanie aparatury kontrolno-pomiarowej w jej wnętrzu (czujników temperatury, sondy do analizy składu spalin). Aby możliwa była wizualna obserwacja procesu stabilizacji płomienia jako komorę spalania zastosowano rurę ze szkła kwarcowego o długości 660 mm i średnicy wewnętrznej 160 mm. Geometria komory spalania pozwalała na swobodne rozchodzenie się płomieni w jej objętości i odwzorowanie warunków pracy w rzeczywistych komorach spalania urządzeń cieplnych. Na rysunku 1 przedstawiono schemat zestawionego stanowiska badawczego wraz z przestrzennym rozmieszczeniem otworów do mocowane elektrod i czujników temperatury.

Elektrody wyładowcze/zapłonowe wykonano z prętów wolframowych o średnicy 3 mm i długości 150 mm, a ich końce robocze zaokrąglono pod kątem 45° od osi elektrody. Elektrody połączono do rozproszeniowego transformatora wysokiego napięcia. Zastosowano transformator świetłówkowy typu Resinblock 2000 o napięciu strony wysokiej do 10 kV i obciążalność prądowa 50 mA firmy FARD lighting GmbH (www.fard-lighting.de). Pomiaru

wysokiego napięcia doprowadzonego do elektrod w trakcie generowania plazmy dokonywano bezpośrednio wykorzystując sondę wysokonapięciową. Pomiaru natężenia prądu wyładowania łukowego dokonywano cyfrowym miliamperomierzem cęgowym obejmującym przewód elektrody znajdującej się na niskim potencjale.

Do rejestracji temperatury w wybranych punktach komory spalania wykorzystano termopary typu K i rejestrator wielokanałowy typu AR 205 firmy APAR[13].

W celu oceny wpływu plazmowej stabilizacji płomienia na jakość spalania rozpylonej strugi paliwa stanowisko badawcze wyposażono w analizator gazów procesowych GAS 3000R z detektorami NDIR firmy GEIT (<http://geiteurope.com>) [14]. Pozwoliło to na rejestracje w czasie rzeczywistym udziału CO w spalinach.



Rys.1. Schemat zestawionego stanowiska badawczego

W trakcie prób stabilizacji płomienia plazmą łukową wykorzystano olej opałowy lekki o handlowej nazwie Ekoterm Plus, produkcji grupy ORLEN [15]. Wybrano olej opałowy ponieważ jest on paliwem trudniejszym technologicznie do efektywnego i niskoemisyjnego spalania w porównaniu do paliw stosowanych powszechnie w transporcie (benzyna i nafta lotnicza).

Obszerniejszy opis opracowanego stanowiska, i parametrów technicznych jego elementów składowych zawiera praca [5].

Przebieg eksperymentu

Prace eksperymentalne obejmowały trzy zasadnicze etapy: w pierwszym określono wydatek masowy rozpylanego paliwa, w kolejnym określono widmo rozpylanych kropeł (ocena jakości rozpylania), trzeci obejmował badania stabilizacji płomienia rozpylonej strugi paliwa w łukowym kanale plazmowym.

W zakresie niniejszego opracowania wydatek masowy rozpylonego paliwa (strumień masowy paliwa) wyznaczono dla jednego ustalonego ciśnienia rozpylania równego 6 barów i przy zastosowaniu dyszy Danfoss 60°S. Wydatek masowy rozpylanego paliwa określano metodą wagową [5]. Rozpylone paliwo z dyszy zbierano elastycznym węże do szakalej płuczkii Dreschla umieszczonej w naczyniu wypełnionym wodą z lodem (intensyfikacja skraplania). Paliwo zbierano do objętości nie mniejszej niż 100 cm³ jednocześnie mierząc czas pracy pompy. Proces oznaczania wydatku masowego rozpylanego paliwa powtarzano trzy krotnie. Jako wynik przyjęto średnią arytmetyczną, która dla oleju Ekoterm Plus wynosi 0,755 kg/h. Przy założeniu całkowitego i zupełnego spalania odpowiada mocy cieplnej 9 kW.

Do pomiaru jakości rozpylania (oznaczenia widma kropeł w rozpylonym strumieniu paliwa) wykorzystano stanowisko pomiarowe, którego zasadniczym elementem był system AWK D [16, 17, 18]. System AWK D umożliwia

miar rozkładu rozpylonych i swobodnie opadających kropeł cieczy w powietrzu, w zakresie od 5 μm do 1 mm. W trakcie pomiarów jakości rozpylania ustalono, że dla ciśnienia rozpylania równego 6 barów krople paliwa posiadają średnice nie większe niż 300 μm. Na podstawie otrzymanych wyników badania jakości rozpylania wyznaczono średnią objętościową średnicę ważoną wg powierzchni – Sautera (SMD), którą często stosuje się podczas analizy wymiany masy i wymiany ciepła. Wyznaczona średnia średnica Sautera wynosi SMD = 103,6 μm co świadczy o stosunkowo dobrej jakości rozpylania oleju Ekoterm Plus [4, 5, 18].

Zasadniczym etapem badań było wykonanie prób stabilizacji płomienia za pomocą plazmy (termicznej) generowanej wysokonapięciowym łukiem elektrycznym prądu przemiennego. Przeprowadzono również próby oceny wpływu plazmy łukowej niskiej mocy < 180 VA na jakość spalania (emisję CO) zarówno dla mieszanek bogatych, jak i ubogich (zmiana współczynnika nadmiaru powietrza λ w zakresie $0,8 < \lambda < 2,0$). Współczynnik λ wyznaczono jako stosunek rzeczywistej ilości (masy) powietrza, w której spalano paliwo, do ilości teoretycznej (stechiometrycznej) potrzebnej do całkowitego spalania paliwa. W pierwszym podejściu, podczas prób stabilizacji płomienia plazmą termiczną, ustalono eksperymentalnie lokalizację, rozstaw i konfigurację elektrod wyładowczych/zapłonowych w komorze spalania. Ten etap eksperymentu polegał na wizualnej ocenie zapłonu dla ubogiej mieszanki paliwowej ($\lambda \cong 1,9$, bez plazmowej stabilizacji następuje zerwanie płomienia) i skuteczności stabilizacji płomienia plazmą łukową. Zapłonu mieszanki paliwowej dokonywano ręcznie z pulpitu kontrolno-pomiarowego przez chwilowe uruchomienie aparatu inicjującego zapłon z równoczesnym wytworzeniem i podaniem mieszanki paliwowej w obszar spalania. Jednocześnie z inicjacją zapłonu standardowym aparatem zapłonowym rozpoczynano wytworzenie plazmy za pomocą termicznych wysokonapięciowych wyładowań łukowych. W trakcie poszukiwania optymalnej lokalizacji i konfiguracji elektrod wyładowczych/zapłonowych oceniano wielkość i barwę płomienia, kolor dymu oraz występowanie niedopału w postaci skroplin paliwa. Każdorazowo po przeprowadzonej próbie komorę spalania oczyszczano z resztek paliwa i wentylowano. Z przebiegu poszczególnych prób wykonywano dokumentację fotograficzną.

W toku wstępnych prób ustalono, że optymalny rozstaw elektrod wynosi ok. 9 mm.

W zasadniczych próbach zastosowano poziomą konfigurację elektrod prostopadłą do osi wzdłużnej komory spalania. W celu określenia optymalnej lokalizacji elektrod umieszczono je w połowie kwarcowej komory spalania, w odległości 310 mm od dyszy rozpylacza. Taka lokalizacja i konfiguracja elektrod w stopniu znikomym powodowała stabilizację płomienia. Generowana plazma zdolna była do zapłonu mieszanki paliwowej jedynie w strefie wyładowczej elektrod co pokazano na rysunku 2. Poza strefą wyładowczą następowało zerwanie płomienia.



Rys.2. Płomień podczas stabilizacji przy ustawieniu elektrod w odległości 310 mm od dyszy rozpylacza, napięcie łuku 2,6 kV, prąd 51 mA ; E-elektrody wyładowcze/zapłonowe

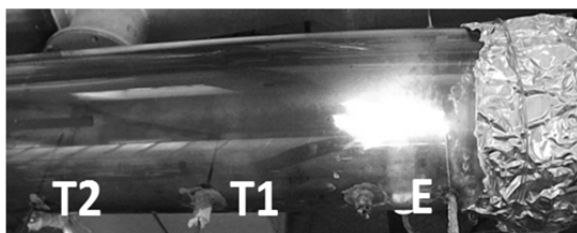
W kolejnym podejściu elektrody zapłonowe zamontowano w odległości 150 mm od dyszy rozpylacza nie zmieniając ich konfiguracji co pokazano na rysunku 3.



Rys.3. Płomień podczas stabilizacji przy ustawieniu elektrod w odległości 150 mm od dyszy rozpylacza, napięcie łuku 3,30 kV, prąd 50 mA; E – elektrody wyładowcze/zapłonowe, T1 – termopara, T2 – termopara

Lokalizacja elektrod w odległości 150 mm od dyszy rozpylacza, spowodowała, że plazma zapobiegała zrywaniu płomienia. Spalanie nie obejmowało całej strugi rozpylonego paliwa i obserwowano „wędrówkę” ognisk płomienia wzdłuż komory spalania co jest charakterystyczne dla spalania niestabilnego [4].

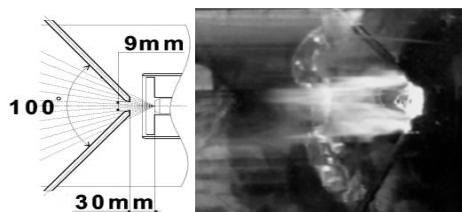
W kolejnym etapie elektrody umieszczono w odległości 90 mm od dyszy rozpylacza. Zabieg ten przyniósł poprawę stabilności płomienia i jego wydłużenie. Jednak spalanie nadal nie obejmowało całej rozpylonej strugi. Dalsze zmniejszenie odległości elektrod do 70 mm od dyszy rozpylacza spowodowało znaczne wydłużenie płomienia, poprawę jego stabilności i objęcie spalaniem prawie całej rozpylonej mieszanki paliwowej, co ilustruje rysunek 4.



Rys.4. Płomień podczas stabilizacji przy ustawieniu elektrod w odległości 70 mm od dyszy rozpylacza, napięcie łuku 3,50 kV, prąd 46 mA; E – elektrody wyładowcze/zapłonowe, T1 – termopara, T2 – termopara

Dalsze zmniejszanie odległości elektrod poniżej 70 mm od dyszy rozpylającej nie wpływało znacząco na poprawę stabilizacji płomienia. Dlatego kolejne prace optymalizacyjne polegały na zmianie konfiguracji kąta elektrod w stosunku do osi wzdłużnej strugi paliwa. Po wykonaniu serii testów ustalono, że optymalną konfiguracją elektrod prętowych jest ich ustawienie pod kątem 50° od osi komory spalania, a wyznaczona eksperymentalnie optymalna odległość ostrzy elektrod prętowych od dyszy rozpylacza wynosi 30 mm (rys. 5)

Obserwując próby stabilizacji płomienia palącą się plazmą łukową zwrócono uwagę na rozwarstwianie się głównego kanału na kilka mniejszych i ich „ślizgową wędrówkę” wzdłuż elektrod zgodnie z kierunkiem przepływu mieszanki paliwowej (rys. 5). Optymalizacja lokalizacji i konfiguracji elektrod pozwoliła uzyskać źródło plazmy opartego o ślizgające się wyładowania łukowe (gliding arc) [6]. To rozwiązanie umożliwiało stabilizację płomienia bezpośrednio w objętości rozpylonego strugi paliwa, przez co najprawdopodobniej zwiększa się stabilność płomienia i poprawa efektywności spalania.

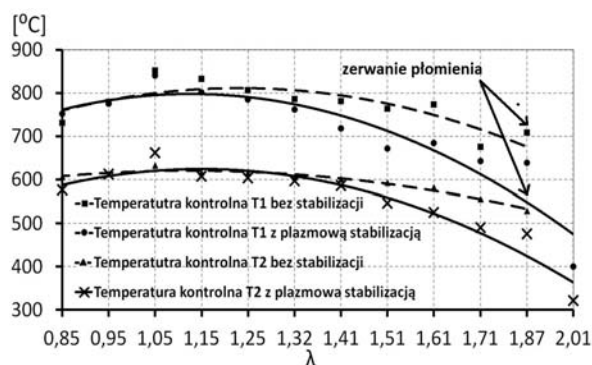


Rys.5. Schemat optymalnej lokalizacji i konfiguracji elektrod w komorze spalania i widok palącego się kanału plazmowego (napięcie łuku 2,95 kV, prąd 50 mA)

Badania wpływu plazmowej stabilizacji płomienia na jakość spalania wykonano dla oleju Ekoterm Plus, rozpylanego przy ciśnieniu równym 6 barów z wydatkiem 0,755 kg/h. Badania realizowano dla współczynnika nadmiaru powietrza λ zakresie 0,85-1,90 regulując strumień masy powietrza doprowadzonego do palnika (9-23 kg/h).

Wyniki badania wpływu plazmowej stabilizacji płomienia na jakość spalania

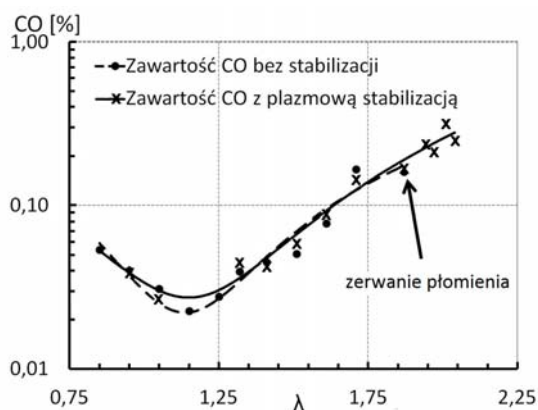
Ważnym parametrem charakteryzującym spalanie jest temperatura procesu, która jest zależna współczynnika nadmiaru powietrza λ . Podczas badań rejestrowano temperaturę termoparami umieszczonymi w osi komory spalania w odległości od dyszy rozpylacza: 150 mm termopara T1 oraz 310 mm termopara T2 (rys. 1). Na rysunku 6 przedstawiono zmiany rejestrowanych temperatur T1 i T2, w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza λ dla obu przypadków prowadzenia procesu (bez stabilizacji i ze stabilizacją plazmową).



Rys.6. Temperatury w punktach kontrolnych (w funkcji λ) podczas prowadzenia procesu spalania bez stabilizacji, jak i z plazmową stabilizacją

Podczas plazmowej stabilizacji rejestrowane temperatury spalania wykazują nieznaczny trend spadkowy w stosunku do temperatury spalania bez stabilizacji. Najprawdopodobniej wynika to z intensyfikacji ekspansyjnego przepływu gazu pod wpływem sił elektrodynamicznych wyładowania łukowego [19]. Ważne jest, że poza obszarem stabilnego spalania ($\lambda > 1,87$) stabilizacja plazmowa umożliwia dalsze prowadzenie procesu spalania (nie dochodzi do zerwania płomienia) bez znacznego wpływu na temperatury procesu.

Bardzo ważnym parametrem charakteryzującym spalanie jest zawartość tlenku węgla (CO) w spalinach [4]. Podczas badania wpływu plazmy łukowej na jakość spalania oleju opałowego w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza, pomiary stężenia CO dokonywano dla ustabilizowanych warunków procesu. Na rysunku 7 przedstawiono oznaczone stężenia CO w spalinach bez stabilizacji, jak i z plazmową stabilizacją.



Rys.7. Stężenia CO w spalinach (w funkcji λ) podczas prowadzenia procesu spalania bez stabilizacji, jak i z plazmową stabilizacją.

Eksperyment wykazał, że dla $\lambda \cong 1,15$ stężenie CO w spalinach jest najmniejsze i wynosi 0,025%.

W obszarze stabilnego spalania brak jednoznacznego wpływu prowadzonej stabilizacji plazmowej na jakość spalania.

W obszarze niestabilnego spalania następuje dalszy wzrost stężenia CO, mieszanka w coraz większym stopniu ulega spalaniu niepełnemu. Prowadzenie procesu spalania jest możliwe tylko przy pomocy stabilizacji.

Podsumowanie, wnioski, propozycje

- Analiza procesu spalania rozpylonej strugi oleju opałowego wykazała, że stabilizacja płomienia plazmą łukową małej spalanie ubogich mieszanek poza zakresem stabilnego spalania (rys. 6, rys. 7).
- Nie określono jednoznacznego wpływu stabilizacji plazmowej na zawartość CO w spalinach w zakresie stabilnego spalania.
- W celu jednoznacznej oceny wpływu plazmowej stabilizacji na jakość spalania należy rozszerzyć analizę składu spalin o oznaczanie stężenia tlenków azotu, zawartości węglowodorów oraz pomiar cząstek stałych (sadzy).
- Ze względu na fakt, że urządzenia plazmowe są źródłem zakłóceń elektromagnetycznych (promieniowanych i przewodowych) [19, 20] należy zbadać kompatybilność elektromagnetyczną zaproponowanego układu plazmowego.
- Należałoby również sprawdzić niezawodność i trwałość układu plazmowej stabilizacji płomienia (zwłaszcza elektrod) podczas długotrwałej pracy i jego wpływ na podzespoły wchodzące w skład opracowanego prototypowego stanowiska.

LITERATURA

[1] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2013*, Paryż, 2013, <http://www.iea.org/Textbase/npsum/WEO2013SUM.pdf>

[2] Gieras M., *Komory spalania silników turbinowych - Organizacja procesu spalania*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2010

[3] Łapucha R., *Komory spalania siników turbinowo-odrzutowych, procesy, obliczenia, badania*, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, 2004

[4] Kordylewski W., i inni, *Spalanie i paliwa*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008

[5] Brzeziński H., *Stabilizacja rozpylonej strugi paliwa przy pomocy wyładowania elektrycznego*, praca dyplomowa stopnia magisterskiego, Politechnika Wroclawska 2013

[6] Stryczewska H. D., *Technologie Plazmowe w Energetyce i Inżynierii Środowiska*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2009

[7] Bonizzoni G., Vassallo E., *Plasma physics and technology; industrial applications*, *Vacuum* 64, (2002), 327–336

[8] Tendo C., Tixier C., Tristant P., Desmaison J., Leprince P., *Atmospheric pressure plasmas: A review*, *Spectrochimica Acta Part B*, 61, (2006) 2 – 30

[9] Huang H., Tang L., *Treatment of organic waste using thermal plasma pyrolysis technology*, *Energy Conversion and Management*, 48, (2007), 1331–1337

[10] Scheer Heiztechnik GmbH, *Instrukcja montażu i obsługi nadmuchiowego palnika olejowego LG 10*, Wöhrden 1993

[11] Danfoss, *Książka serwisowa części do palników olejowych Danfoss*, 1997

[12] Danfoss, *Karta katalogowa OEM .Pompa paliwowa palnika BFP*, 1997

[13] APAR AR 205, *Instrukcja obsługi*, APAR Sp.Z.O.O.2012

[14] Kordylewski W., Mączka T., Śliwka E., Wnukowski M., *Opracowanie metody badawczej do oznaczenia składu otrzymanych produktów zgazowania*, Raporty Inst. Tech. Ciepł. PWroc. 2012, Ser. PRE ; nr 5

[15] Strona internetowa PKN ORLEN Orlen, – właściwości i charakterystyka paliw <http://www.ornlen.pl/PL/DlaBiznesu/Paliwa/Strony/default.aspx>, stan na maj 2014

[16] Mączka T., *Instrukcja do Laboratorium Spalania i Paliw, Jakość rozpylania paliw ciekłych*, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska, http://www.spalanie.pwr.wroc.pl/dydaktyka/lab_spal_mibm.htm, stan na maj 2014

[17] KAMIKA Instruments (<http://kamika.pl/oferta.opis.65.10.html>), AWKD System Analizator do pomiaru rozpylonych kropelek cieczy, Instrukcja instalacji i obsługi, Warszawa 2008

[18] Orzechowski Z., Prywer J., *Wytwarzanie i zastosowanie rozpylonej cieczy*, WNT, Warszawa, 2008

[19] Mazurek P. A., *Identyfikacja zaburzeń elektromagnetycznych w mieszaninach gazowych, torze zasilania reaktora plazmowego przy różnych*, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2014), R. 90, nr 7, 203-206

[20] Kobel P., Kordylewski W., Mączka T., Milewicz M., *Zakłócenia elektromagnetyczne generowane podczas plazmowego rozruchu kotła*, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2012), R. 88, nr 1b, 198-202

Autorzy: mgr inż. Henryk Brzeziński, Instytut Elektrotechniki Oddział Technologii i Materiałoznawstwa Elektrotechnicznego we Wrocławiu, ul. M. Skłodowskiej-Curie 55/61, 50-369 Wrocław, h.brzezinski@iel.wroc.pl, dr inż. Tadeusz Mączka, Instytut Elektrotechniki Oddział Technologii i Materiałoznawstwa Elektrotechnicznego we, ul. M. Skłodowskiej-Curie 55/61, 50-369 Wrocław, t.maczka@iel.wroc.pl