

Maciej Basiura

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

## Próba wykorzystania metod rozpoznawania obrazów do oceny jakości spalania gazu

We wstępie artykułu przedstawiono zagadnienia związane z metodami rozpoznawania obrazów. Zasadniczą jego częścią jest opis eksperymentów przeprowadzonych przez pracowników Zakładu Użytkowania Paliw Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego w Krakowie, które polegały na obserwacji płomienia gazowego w świetle widzialnym oraz w paśmie promieniowania podczerwonego. Przeprowadzone badania powinny w przyszłości umożliwić opracowanie kryteriów pozwalających oceniać jakość spalania paliw gazowych, na podstawie filmów bądź serii fotografii i termogramów płomienia.

Słowa kluczowe: jakość spalania, termowizja, płomień gazowy, rozpoznawanie obrazów.

### Attempt to use pattern recognition methods to evaluate the quality of gas fuel combustion

In the introduction the article presents the issues related to the methods of pattern recognition. The essential part is the description of the experiments carried out by the personnel of the Department of Fuels Usage of the Oil and Gas Institute – National Research Institute in Cracow, which relied on the observation of a gas flame in the visible spectrum and infrared radiation. The study should in future allow the development of criteria to assess the quality of combustion of gaseous fuels, on the basis of the movie or a series of photographs and thermograms of the flame.

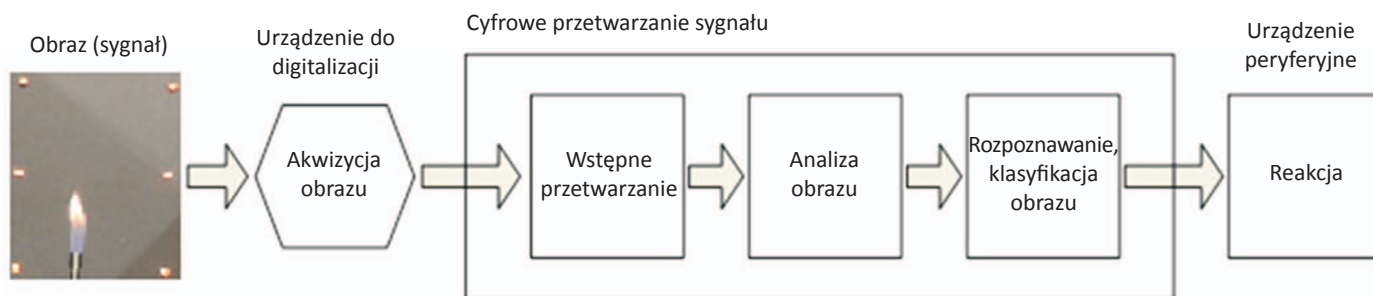
Key words: combustion quality, thermography, gas flame, image recognition, pattern recognition.

### Próba wykorzystania metod rozpoznawania obrazów do oceny jakości spalania gazu

Istnieją procesy technologiczne, których automatyzacja sprawia pewne trudności. Dotyczy to głównie procesów, podczas których mogą zachodzić subtelne zmiany warunków, a ich poprawny przebieg zależy głównie od wiedzy i doświadczenia operatora. O próbie zautomatyzowania procesu spawania i lutowania gazowego można przeczytać w artykule Bogusława Cyganka i współautorów [6]. Podane zostały w nim wymagania, jakie powinni spełniać spawacze i lutowacze gazowi, oraz podjęto próbę opisu procesu spawania i lutowania gazowego w sposób umożliwiający zaimplementowanie wiedzy eksperckiej z tego zakresu do systemu komputerowego, w celu wykorzystania metod rozpoznawania obrazów do sterowania ruchami robota spawalniczego. Tego rodzaju proces wymaga ciągłej kontroli płomienia palnika w zależności od postępującego topnienia metalu, zjawiska przeważnie niepowtarzalnego, co uniemożliwia jego klasyczną automatyzację. Proces ten, ze względu na czas spawania/

lutowania oraz osiągnięte temperatury, wymaga stałego nadzoru systemu pozwalającego na regulację urządzeń wykonawczych przy subtelnych zmianach struktury, kształtu lub innych cech obrabianych obiektów. Możliwości takie posiadają właśnie systemy rozpoznawania obrazów

Metody rozpoznawania obrazów utożsamiane są tylko i wyłącznie z technikami rozpoznawania obiektów na fotografii bądź filmie, ogólnie na obiektach graficznych, niemniej jednak metody te odnoszą się do wszystkich zagadnień związanych z rozpoznawaniem wzorców w dowolnych sygnałach. Mogą być to przebiegi czasowe z czujników, rozkłady wartości mierzonych (np. temperatury), nagrania audio, jak również obrazy graficzne, fotografie i filmy, a także inne zdigitalizowane zbiory danych. Więcej informacji na ten temat można znaleźć w opracowaniach [4, 11]. Na podstawie cytowanych pozycji można w sposób bardziej precyzyjny określić metody „rozpoznawania obrazów” jako „rozpoznawania wzorców”;



Rys. 1. Podstawowe bloki systemu rozpoznawania obrazu

w literaturze anglojęzycznej zagadnienie to funkcjonuje pod nazwą *pattern recognition*.

Standardowy system rozpoznawania obrazów składa się z następujących bloków (rysunek 1):

- urządzeń do akwizycji obrazu (sygnału) umożliwiających digitalizację i przedstawienie obrazu w formie pozwalającej na jego cyfrowe przetwarzanie w systemie informatycznym (w przedstawionych eksperymentach to aparat fotograficzny, kamera cyfrowa i kamery termowizyjne);
- systemu do wstępnego przetwarzania obrazu. Programy te wykorzystują w pierwszych fazach działania algorytmy w celu usunięcia zakłóceń mogących negatywnie wpłynąć na dalsze etapy analizy obrazu, a także – w celu zredukowania liczby kolorów, wyznaczenia położenia krawędzi lub pozycji punktów charakterystycznych obiektów, usunięcia szumów lub rozmycia obrazu;
- systemu analizy obrazu. Po wstępnym odfiltrowaniu zakłóceń i wstępnej obróbce należy przeprowadzić analizę obiektów znajdujących się na obrazie. Metody używane w tej części przetwarzania wydobywają informacje z obrazów. W odróżnieniu od metod wstępnego przetwarzania ich wynikiem nie są kolejne przekształcone obrazy, lecz dane w postaci numerycznej lub symbolicznej. W procesie analizy obrazu zostają wyznaczone cechy charakterystyczne przetwarzanego obrazu, dzięki którym staje się możliwe klasyfikowanie obiektów. Do wyznaczenia cech używa się różnych algorytmów, które dodatkowo przekształcają obraz w taki sposób, iż możliwy jest opis ilościowy obiektów znajdujących się na obrazach i wyliczenie ich charakterystycznych parametrów;
- systemu klasyfikacji. Najwięcej problemów pociąga za sobą dobór odpowiedniej metody reprezentacji wzorca w przestrzeni cech. Obraz rzeczywistego procesu nigdy nie będzie identyczny z dowolnym, wcześniej przyjętym za wzorcowy, obrazem. Z tego powodu podczas tworzenia wzorców maszyna nie posiada wszystkich możliwych reprezentacji analizowanego procesu danej klasy. Należy więc tak dobrać metodę klasyfikacji, aby uwzględniła ten efekt. Istnieje wiele metod rozpoznawania,

- wykorzystujących – między innymi – sieci neuronowe, metody statystyczne oraz probabilistyczne i geometryczne; systemu reagującego na przeprowadzoną analizę. Na podstawie wyników podanych przez procedury rozpoznawania obrazu system powinien informować operatora poprzez urządzenia peryferyjne. Reakcja powinna uwzględniać informacje otrzymane z poprzedniej metody.

Pracownicy Zakładu Użytkowania Paliw Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego pracują nad różnymi aspektami procesu spalania i bezpieczeństwa użytkowania urządzeń spalających paliwa. Z efektami tych działań można zapoznać się, czytając artykuły [1, 2, 3, 8, 9, 13, 14, 16], które poruszają w bardzo szerokim zakresie zagadnienia związane z urządzeniami spalającymi paliwa, zwłaszcza gaz ziemny.

Drugim obszarem zainteresowań pracowników Zakładu Użytkowania Paliw jest termografia i związane z nią techniki badań, zwłaszcza termowizja w podczerwieni korzystająca z kamer termowizyjnych.

Termografia to technika obserwacji i rejestracji za pomocą dostępnych technicznie metod rozkładu temperatur na powierzchni obiektów obserwowanych, wykorzystująca emitowane przez nie promieniowanie temperaturowe. Termografia może być kontaktowa – polega wtedy na obserwacji i analizie rozkładu oraz zmian wartości temperatury lub ich przebiegów czasowych za pomocą termometrów i sond kontaktowych, takich jak: termopary, termometry oporowe itp., i bezkontaktowa – gdy badany obiekt obserwowany jest za pomocą urządzeń mogących zarejestrować jego promieniowanie temperaturowe bez fizycznego kontaktu, np. za pomocą pirometru lub kamery rejestrującej promieniowanie podczerwone/kamery termowizyjnej. Termowizja to jedna z technik termografii, wykorzystująca bezkontaktowe metody rejestracji promieniowania temperaturowego (przeważnie promieniowania podczerwonego badanego obiektu), umożliwiającą zarejestrowanie termogramu. Ważnym parametrem w termowizji, pozwalającym na analizowanie rozkładu temperatur na obserwowanej scenie poszczególnych obiektów, jest emisyjność tych obiektów. Emisyjność płomienia gazowego

jest bardzo niska i zmienna w różnych jego częściach, co uniemożliwia poprawne wnioskowanie o właściwej temperaturze danej strefy płomienia. Problem ten został poruszony w pracach [5, 7], które poświęcone są radiacyjnej naturze płomienia. Zwrócono w nich uwagę na niską emisyjność płomienia, ale traktowano ją jako emisyjność całkowitą. Natomiast kamery termowizyjne, działając w swoich pasmach promieniowania podczerwonego, korzystają niejako z emisyjności pasmowej, która może się różnić od całkowitej.

Więcej informacji na temat termografii, jej zastosowań i zagadnień z nią związanych rozwijanych w Instytucie Nafty i Gazu – Państwowym Instytucie Badawczym zaprezentowano w artykułach [1, 2, 3].

Dzięki połączeniu trzech wspomnianych dziedzin zainteresowań pracowników Zakładu Użytkowania Paliw powstała koncepcja zastosowania systemu rozpoznawania obrazów do oceny jakości spalania paliw, przy wykorzystaniu obrazów wykonanych w świetle widzialnym, a także na podstawie termogramów płomieni.

W roku 2014 zaplanowano i przeprowadzono serie eksperymentów, które miały umożliwić udzielenie odpowiedzi na pytanie: Jaki płomień świadczy o tym, że proces spalania przebiega prawidłowo? Niestety, jak zwykle w takich przypadkach, odpowiedź okazała się niejednoznaczna i zależna od wielu czynników.

Istotnym elementem jest to, w jakich warunkach i do czego wykorzystany ma być obserwowany płomień. Przyjęto następujące założenia przy wyborze obiektu badań. Palnik powinien:

- być jak najprostszym modelem, nieposiadającym zawansowanych rozwiązań stabilizujących płomień,
- generować pojedynczy płomień tak, aby możliwe było wnioskowanie o kształtach i parametrach pojedynczych płomieni w bardziej złożonych zespołach palnikowych,
- odwzorowywać sposób palenia najczęściej stosowanych palników w urządzeniach domowego użytku (kuchenki, piekarniki, płyty gazowe, ogrzewacze wody, kotły gazowe, ogrzewacze pomieszczeń),
- posiadać regulację powietrza pierwotnego.

Po przeanalizowaniu wyżej wymienionych wymagań oraz informacji zawartych w literaturze [10, 12, 15] wybrano palnik Bunsena. Jest to rodzaj palnika laboratoryjnego, w którym mieszanie powietrza atmosferycznego z gazem następuje w dyszy. Powietrze jest w tym palniku zasane przez otwory w dolnej, „zimnej” części dyszy, z wykorzystaniem efektu kominowego i inżektorowego.

Wybrany palnik pozwala na regulację powietrza pierwotnego. Całkowicie otwarta przesłona to tarczka regulacyjna na poziomie 10 mm nad poziomem śruby z dolotem gazu (wysokość P na fotografii 1), natomiast całkowicie zamknięte powietrze pierwotne jest gdy tarczka regulacyjna znajduje się na poziomie 17 mm. Dane w eksperymentach zbierane były przy ustawieniu powietrza wtórnego, co 1 mm w zakresie od 10 do 17 mm.

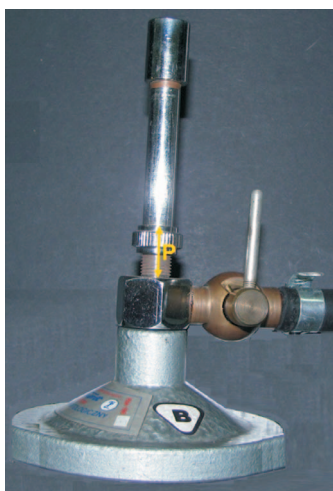
W opracowaniach [12, 15] autorzy poruszają problem jakości spalania w urządzeniach domowego użytku w zależności od składu paliwa (gazu). Analizując wyniki wyżej wymienionych prac, do eksperymentów wstępnych wybrano gaz ziemny wysokometanowy (gaz z sieci dystrybucyjnej) oraz gaz propan-butan. Obserwowano obrazy procesu spalania, zachowanie oraz dynamikę płomienia, zasilając palnik ciśnieniami gazów z zakresu 15 mbar do 60 mbar (ciśnienia zbliżone do ciśnień zasilania używanych w Polsce dla sprzętu użytkowego). Ponieważ nie stwierdzono jakościowych różnic

w obrazach płonienia dla wybranych gazów, do przeprowadzenia właściwych eksperymentów wybrano gaz ziemny wysokometanowy, z powodu jego łatwiejszej dostępności i kontroli parametrów na stanowiskach laboratorium. Dokonano wyboru następujących ciśnień paliwa przed palnikiem: 20 mbar, 40 mbar, 60 mbar.

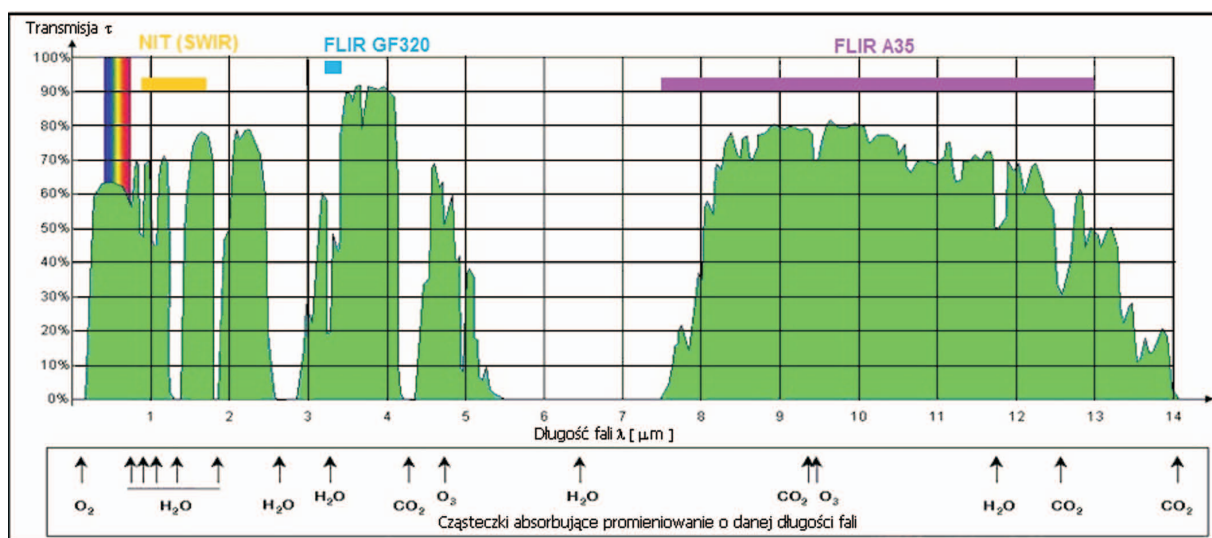
Przeprowadzono eksperymenty, które polegały na pomiarach spalin podczas procesu spalania i rejestracji obrazu palnika w świetle widzialnym oraz w paśmie podczerwieni.

Obrazy termowizyjne wykonane zostały za pomocą kamery termowizyjnej FLIR GF320 rejestrującej promieniowanie podczerwone w zakresie  $3,2\div 3,4\ \mu\text{m}$ , będącej własnością Zakładu Użytkowania Paliw oraz, dzięki uprzejmości firmy EC TEST SYSTEMS, kamerami: FLIR

A35 rejestrującą promieniowanie podczerwone w zakresie  $7,5\div 13\ \mu\text{m}$  i kamerą wyposażoną w detektor firmy NIT NATIVE WDR™ CMOS Sensors NSC0803-SI (SWIR) rejestrującą promieniowanie podczerwone w zakresie  $0,9\div 1,7\ \mu\text{m}$ . Obserwację płomienia za pomocą wielu kamer wykonano w celu porównania termogramów otrzymywanych w różnych zakresach promieniowania podczerwonego. Stanowisko wyposażono w tło, na którym umiejscowione były znaczniki, umożliwiające orientację przestrzenną w kadrach o różnej rozdzielczości z różnych urządzeń. Znaczniki dobrano w taki sposób, aby widoczne były zarówno w świetle widzialnym, jak i w paśmie podczerwieni w różnych zakresach pomiarowych kamer termowizyjnych. Tło zostało umieszczone na statywie za palnikiem, a wszystkie elementy stanowiska unieruchomiono względem siebie.



Fot. 1. Palnik używany w eksperymentach



Rys. 2. Transmisja promieniowania przez atmosferę oraz nałożone pasma działania kamer termowizyjnych używanych w eksperymencie

Niestety, obecnie produkowane kamery termowizyjne są tak przygotowane, aby działały w zakresach fal, w których transmisja promieniowania przez atmosferę jest jak największa. Przez to z zakresu działania kamer wycięte są te długości fal, w których największą wartość absorpcji i emisji mają związki najpowszechniej występujące w powietrzu, w tym również woda i tlenek węgla(IV) (rysunek 2). Te dwa związki chemiczne są głównymi składnikami spalin płomieni gazowych. Obrazy płomieni rejestrowane w podczerwieni za pomocą kamer termowizyjnych są niejako zniekształcone, gdyż brak w nich promieniowania właśnie tych dwóch związków. Niemniej jednak obserwacja termogramów płomieni gazowych niesie za sobą wiele informacji, które nie są widoczne w świetle widzialnym. Na termogramach wyraźnie widać strefy wysokiej temperatury wychodzące daleko poza widzialny obrys płomienia, które mogą posłużyć do lepszej oceny procesu spalania w palnikach i konstrukcji bardziej efektywnych komór spalania.

Innymi zależnościami, które można zaobserwować na zarejestrowanych obrazach i wykorzystać jako cechy w systemie rozpoznawania obrazów, są:

- wymiary każdego z obserwowanych płomieni (szerokość, wysokość),
- kształt widocznych stożków (zarówno na obrazach w świetle widzialnym, jak i na termogramach),
- obecność mniejszego stożka kinetycznego i stożka dyfuzyjnego w płomieniu (widoczne tylko na obrazach w świetle widzialnym),

- kolor emitowany przez płomień (parametr widoczny tylko dla obrazów w świetle widzialnym),
- stosunek długości płomienia w świetle widzialnym do długości płomienia widocznego na poszczególnych termogramach,
- intensywność widocznego na termogramach promieniowania – proporcjonalnego do widocznych kolorów.

Na filmach można jako cechy potraktować także parametry związane z dynamiką zachowania się płomienia, zwłaszcza jego części dyfuzyjnej, np. odchylenie części dyfuzyjnej płomienia od prostej wyznaczającej jego środek geometryczny lub odrywanie czoła płomienia (widoczne na filmach w świetle widzialnym). Przy synchronicznym nagrywaniu zdjęć i filmów w świetle widzialnym i w podczerwieni można do analizy wykorzystać zależności czasowe pomiędzy płomieniem obserwowanym w świetle widzialnym i na termogramach.

Przykładowe wyniki rejestracji obrazów przedstawiają rysunki 3–5.

Przeprowadzone eksperymenty umożliwiły zapoznanie się z problemami związanymi ze spalaniem paliw gazowych, a zdobyta wiedza umożliwi kontynuowanie badań, które – w ocenie autora – pozwolą na stworzenie nowatorskiego systemu rozpoznawania obrazów pozwalającego na zautomatyzowanie procesów spalania paliw gazowych. Procesy te ze względu na sposób prowadzenia przez operatora były do tej pory niedostępne dla automatyki klasycznej.

Prosimy cytować jako: *Nafta-Gaz* 2015, nr 5, s. 314–319

Artykuł nadesłano do Redakcji 20.11.2014 r. Zatwierdzono do druku: 16.02.2015 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Metody rozpoznawania obrazów w procesie oceny jakości spalania paliw gazowych. Identyfikacja cech obrazu płomienia w paśmie podczerwonym* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr archiwalny: DK-4100-14/14, nr zlecenia: 14/GU/2014.

60 [mbar] PRZESŁONA	ZDJĘCIE WIZYJNE	FLIR GF 320						FLIR A35 (LWIR)	NIT NATIVE WDR™ CMOS Sensors (SWIR)
		30–80°C	50–120°C	80–160°C	110–200°C	150–250°C	210–350°C		
10 [mm]									
11 [mm]									
12 [mm]									
13 [mm]									
14 [mm]									
15 [mm]									
16 [mm]									
17 [mm]									

Rys. 3. Obrazy płomieni palnika zasilanego gazem ziemnym o ciśnieniu 60 mbar

40 [mbar] PRZESŁONA	ZDJĘCIE WIZYJNE	FLIR GF 320						FLIR A35 (LWIR)	NIT NATIVE WDR™ CMOS Sensors (SWIR)
		30–80°C	50–120°C	80–160°C	110–200°C	150–250°C	210–350°C		
10 [mm]									
11 [mm]									
12 [mm]									
13 [mm]									
14 [mm]									
15 [mm]									
16 [mm]									
17 [mm]									

Rys. 4. Obrazy płomieni palnika zasilanego gazem ziemnym o ciśnieniu 40 mbar

20 [mbar] PRZESŁONA	ZDJĘCIE WIZYJNE	FLIR GF 320						FLIR A35 (LWIR)	NIT NATIVE WDR™ CMOS Sensors (SWIR)
		30–80°C	50–120°C	80–160°C	110–200°C	150–250°C	210–350°C		
10 [mm]									
11 [mm]									
12 [mm]									
13 [mm]									
14 [mm]									
15 [mm]									
16 [mm]									
17 [mm]									

Rys. 5. Obrazy płomieni palnika zasilanego gazem ziemnym o ciśnieniu 20 mbar

## Literatura

- [1] Basiura M., Rataj M.: *Wykrywanie emisji gazów węglowodorowych przy wykorzystaniu kamery termowizyjnej FLIR GF 320*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna 2012, nr 9, s. 366–368.
- [2] Basiura M., Rataj M.: *Wykrywanie nieszczelności w instalacjach i urządzeniach gazowych za pomocą metody obserwacji w paśmie podczerwieni*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna 2013, nr 11, s. 426–429.
- [3] Basiura M.: *Zastosowanie kamery termowizyjnej w procesie badania prototypów urządzeń*. Nafta-Gaz 2014, nr 5, s. 320–324.
- [4] Cyganek B.: *Object Detection and Recognition in Digital Images: Theory and Practice*. Wiley 2013.
- [5] Gebhardt Z.: *Wpływ parametrów substratów na wypływie z palnika typu rura w rurze na emisyjność dyfuzyjnych płomieni gazu ziemnego*. Praca doktorska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Śląska, Gliwice 1983.
- [6] Jastrzebski R., Cyganek B., Przytula J., Jastrzebska I., Szczyrbak K.: *Teoria wyszkolenia fizycznego spawaczy i lutowaczy gazowych kluczem do kopiowania ruchów spawacza na ruchy robota*. Dozór techniczny, lipiec–październik 2014, nr 4–5, s. 74–82.
- [7] Nadziakiewicz J.: *Teoretyczno-eksperymentalny model radiacyjnego przepływu ciepła w płomieniu gazowym*. Praca habilitacyjna. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, nr 984, Energetyka, z. 105, Gliwice 1989.
- [8] Rataj M.: *Bezpieczeństwo użytkowania gazowych urządzeń grzewczych z otwartą komorą spalania*. Nafta-Gaz 2013, nr 6, s. 455–462.
- [9] Siuda T.: *Numeryczne modelowanie odwróconego ciągu w budynku mieszkalnym za pomocą pakietu CFD FLUENT*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna 2013, nr 12, s. 470–474.
- [10] *Spalanie i paliwa*. Skrypt pod redakcją Włodzimierza Kordylewskiego, wydanie IV poprawione i uzupełnione. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
- [11] Tadeusiewicz R., Flasiński M.: *Rozpoznawanie obrazów*. PWN, Warszawa 1991.
- [12] Wojtowicz R., Siuda T.: *Ocena gazu granicznego G21 pod kątem jego przydatności dla gazów ziemnych wysokometanowych pochodzących z regazyfikacji LNG*. Praca statutowa INiG, Kraków 2012, nr zlecenia: 26/GU/12, nr archiwalny: DK-4100-26/12.
- [13] Wojtowicz R.: *Dywersyfikacja dostaw gazu do Polski a wymiennosc paliw – wymagania prawne odnośnie jakości gazów rozpraszanych w kraju oraz możliwe kierunki dywersyfikacji*. Wiadomości Naftowe i Gazownicze 2011, nr 1, s. 4–7.
- [14] Wojtowicz R.: *Ocena gazu granicznego G21 pod kątem jego przydatności do określania jakości spalania gazów ziemnych wysokometanowych pochodzących z regazyfikacji LNG w urządzeniach użytku domowego*. Nafta-Gaz 2013, nr 8, s. 599–612.
- [15] Wojtowicz R.: *Wpływ składników gazu ziemnego wysokometanowego (etanu i propanu) na jakość spalania w kotłach gazowych i gazowych przepływowych ogrzewaczach wody – analiza porównawcza teoretycznych metod oceny wymiennosci z wynikami pomiarów*. Praca statutowa INiG, Kraków 2011, nr zlecenia: 34/GU/11, nr archiwalny: DK-4100-34/11.
- [16] Wojtowicz R.: *Zagadnienia wymiennosci paliw gazowych, wymagania prawne odnośnie jakości gazów rozpraszanych w Polsce oraz możliwe kierunki dywersyfikacji*. Nafta-Gaz 2012, nr 6, s. 359–367.

Mgr inż. Maciej BASIURA  
Asystent w Laboratorium Badań Urządzeń Gazowych i Grzewczych w Zakładzie Użytkowania Paliw.  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25A  
31-503 Kraków  
E-mail: maciej.basiura@inig.pl