

Wykorzystanie zjawisk akustycznych w pomiarze składu mieszanin gazu

Krzysztof Grzywnowicz, Grzegorz Wiciak

1. Wstęp

Pomiar stężenia gazu w wieloskładnikowych mieszaninach gazowych stanowi istotne zagadnienie metrologiczne w zróżnicowanych procesach technologicznych. Przykładowo, jego wynik istotnie rzutuje na wskaźniki ekologiczne, a współcześnie także na bezpośrednio powiązane z nimi wskaźniki ekonomiczne, instalacji energetycznych w kontekście emisji zanieczyszczeń do atmosfery [1, 2]. Ponadto dokładność oraz szybkość pomiaru stężenia gazów palnych i wybuchowych jest kluczowa dla bezpieczeństwa pracy ludzi, m.in. w kopalniach węgla kamiennego, na składowiskach odpadów czy w zakładach chemicznych [3, 4]. Stąd zagadnienie metod pomiaru zawartości poszczególnych składników w mieszaninach gazowych podlega ciągłemu badaniu i rozwojowi od niemalże stulecia [5].


W związku z szybkim rozwojem technologii informacyjnych, skutkującym znaczącym wzrostem dokładności przyrządów pomiarowych, ich digitalizacją oraz możliwością współpracy z w pełni zautomatyzowanymi urządzeniami kontroli, a także inżynierii materiałowej, umożliwiającej stosowanie coraz to bardziej zaawansowanych materiałów w detektorach, pod koniec XX wieku zaprezentowano szereg zaawansowanych technik pomiarowych, charakteryzujących się wysoką czułością i dokładnością pomiaru, wliczając m.in. chromatografię gazową oraz detekcję laserową czy półprzewodnikową [4]. Pomimo istotnej zalety wymienionych technologii w postaci zminimalizowanego błędu pomiarowego, ich zastosowanie jest z reguły czasochłonne, a same przyrządy je realizujące są wrażliwe na zmiany parametrów otoczenia i nie nadają się do wykorzystania w trudnych warunkach środowiskowych [4], co stanowi kluczowe zagadnienie także w innych układach pomiarowych, używanych w przemyśle [6]. Dlatego też obecnie rozwija się metody i urządzenia pozwalające na szybkie i dokładne dokonanie pomiarów stężeń w mieszaninach o zmiennym składzie, przy jednoczesnej zdolności do zastosowania w środowiskach niebezpiecznych [7], np. o znaczącym zapyleniu czy podwyższonej wilgotności.

W niniejszej pracy omówiono metodę pomiaru stężeń składników w dwuskładnikowej mieszaninie gazów, wykorzystującą rezonans akustyczny, oraz projekt urządzenia, przeznaczonego do przeprowadzenia pomiarów tą metodą, także w środowisku niebezpiecznym, np. Ex.

2. Metoda pomiaru

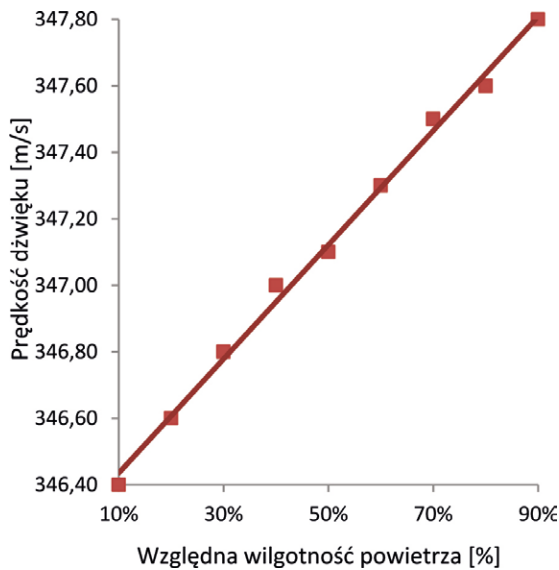
W przypadku analizy mieszaniny gazów, w której występują jedynie dwa składniki lub w której dwa składniki są dominujące w stosunku do pozostałych, jej skład określony może być z wykorzystaniem zależności prędkości dźwięku od udziału

Streszczenie: W licznych procesach technologicznych pomiar stężenia poszczególnych składników mieszanin gazowych stanowi istotne zagadnienie, warunkujące m.in. bezpieczeństwo pracy. Jednakże w wielu obszarach inżynierii pomiar ten musi zostać dokonany w trudnych warunkach otoczenia, charakteryzujących się wysokim zapyleniem, wilgotnością czy atmosferą wybuchową. W artykule przedstawiono koncepcję wykorzystania zjawisk akustycznych, w szczególności rezonansu akustycznego, do prowadzenia pomiarów składu mieszanin gazowych oraz zaprezentowano przykładowe konfiguracje urządzeń ją wykorzystujących. Omówiono także przykłady komercyjnie dostępnej aparatury pomiarowej, bazującej na opisanej idei wykorzystania zjawisk akustycznych w pomiarze składu mieszanin gazowych.

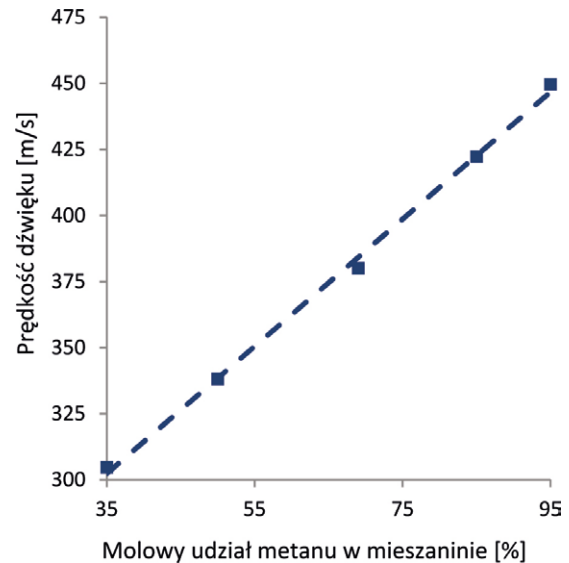
 **Abstract:** In numerous technological processes, measurement of concentration of subsequent components of gaseous mixtures states important aspect, influencing for instance staff safety. However, in plenty of fields of engineering, such measurement has to be executed in tough environment, characterized by extreme dust content, high humidity or risk of explosion. In the paper, the concept of utilization of acoustic phenomena, especially considering acoustic resonance, to perform measurements of gaseous mixtures composition is presented. Furthermore, examples of possible configuration of devices, utilizing such concept, are discussed, and examples of commercially available tools, basing on described idea of utilization of acoustic phenomena in gas mixture composition measurement, are indicated.

tych składników [7]. Przykłady wspomnianej powyżej zależności, przedstawiające odpowiednio prędkość dźwięku w powietrzu w funkcji jego względnej wilgotności oraz prędkości dźwięku w mieszaninie metanu i etanu w funkcji molowego udziału metanu, przedstawiono na rys. 1 oraz na rys. 2.

Zmiana prędkości dźwięku w mieszaninie gazów bezpośrednio przekłada się na zmianę częstotliwości rezonansowej prostego rezonatora akustycznego (rys. 3). W przypadku rezonatora występującego w postaci jedno- lub dwustronnie otwartego cylindra wypełnionego daną mieszaniną [3] częstotliwość rezonansowa stanowi funkcję prędkości dźwięku opisaną zależnością (1). Dlatego też, zależnie od wartości zmiany



Rys. 1. Zależność prędkości dźwięku w powietrzu od względnej wilgotności powietrza



Rys. 2. Zależność prędkości dźwięku w mieszaninie metan/etan od udziału metanu

prędkości dźwięku, obserwowana fluktuacja może wynosić zarówno jedynie kilka herców, jak i kilkanaście procent częstotliwości początkowej [3]. O ile w przypadku zależności prędkości dźwięku w powietrzu atmosferycznym od jego wilgotności (rys. 1) obserwowane zmiany są relatywnie niewielkie, a ich wykorzystanie do zastosowania nowej metody pomiarowej wymagałoby czułych przyrządów pomiarowych, o tyle w przypadku mieszaniny metan – etan zmiana prędkości dźwięku wraz z udziałem metanu w mieszaninie (rys. 2) jest istotna. Dlatego też dla mieszanin wykazujących bardzo istotną zależność prędkości od stężenia jednego ze składników możliwe jest skonstruowanie relatywnie prostego urządzenia, realizującego szybki i dokładny pomiar udziału danego gazu (w postaci stężenia lub innej, adekwatnej dla danego zastosowania) z wykorzystaniem wyznaczenia chwilowej częstotliwości rezonansowej [3, 7].

$$f = \frac{c}{nL} \quad (1)$$

gdzie:

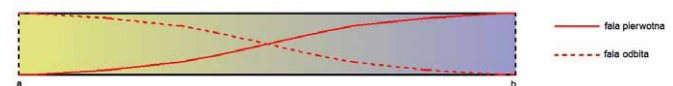
f – częstotliwość fali akustycznej;

c – prędkość dźwięku;

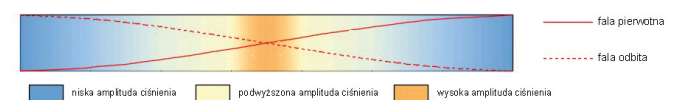
L – długość rezonatora akustycznego;

n – liczba całkowita określająca rząd harmonicznej.

W przypadku analizowania zawartości danego gazu w mieszaninie, zlokalizowanej w przestrzeni wspomnianego rezonatora akustycznego, w celu realizacji pomiaru konieczne jest spełnienie określonych warunków. Aby wyeliminować potencjalne zmiany wartości prędkości gazu wraz ze zmianą temperatury analizowanej mieszaniny – spowodowaną niedoskonałościami technicznej realizacji pomiaru, np. przegrzewaniem się układu pomiarowego w trakcie pracy – próbka mieszaniny zgromadzona w rezonatorze akustycznym musi być



Rys. 3. Przebieg fali dźwiękowej w prostym rezonatorze akustycznym; a, b – otwarte krańce rezonatora



Rys. 4. Rozkład ciśnienia akustycznego w prostym rezonatorze akustycznym obustronnie otwartym

w równowadze cieplnej z otoczeniem. Ponadto w jej objętości nie mogą wystąpić istotne przepływy masy oraz ewentualne związane z nimi turbulencje, zakłócające rozkład prędkości w kolejnych przekrojach rezonatora i wpływające na pojawienie się niepożądanych zjawisk falowych lub nawet stłumienie rezonansu akustycznego [3]. Jednakże przy założeniu, że metoda ta przede wszystkim ma umożliwić szybki pomiar w dużych przestrzeniach, wypełnionych w całości analizowaną mieszaniną gazów, spełnienie wspomnianych wymogów jest realne.

Według podstawowej idei omawiana metoda wykorzystuje pośrednie wyznaczenie chwilowej częstotliwości rezonansowej w otwartym lub zamkniętym cylindrze, pełniącym jednocześnie rolę rezonatora akustycznego. Częstotliwość rezonansowa wyznaczona może być zarówno poprzez iteracyjne dobieranie parametrów fali dźwiękowej emitowanej przez źródło (np. głośnik), zapewniającej wystąpienie węzłów i strzałek ciśnienia akustycznego w punktach przewidywanych i charakterystycznych

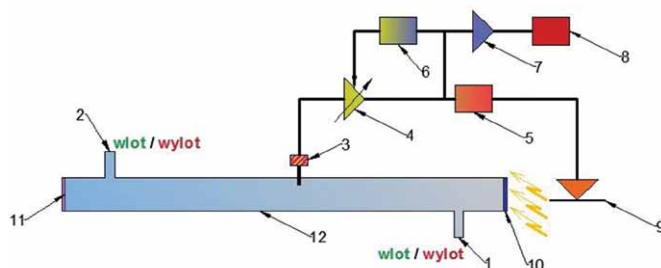
dla wystąpienia w kanale akustycznym rezonansu akustycznego, jak i określenie ich rzeczywistego położenia przez zastosowanie ruchomych przyrządów pomiarowych i układu automatyki dostosowującego ich chwilowe położenie do fizycznej lokalizacji punktu odpowiadającego maksimum amplitudy (strzałce) ciśnienia akustycznego.

3. Konceptcje urządzeń pomiarowych

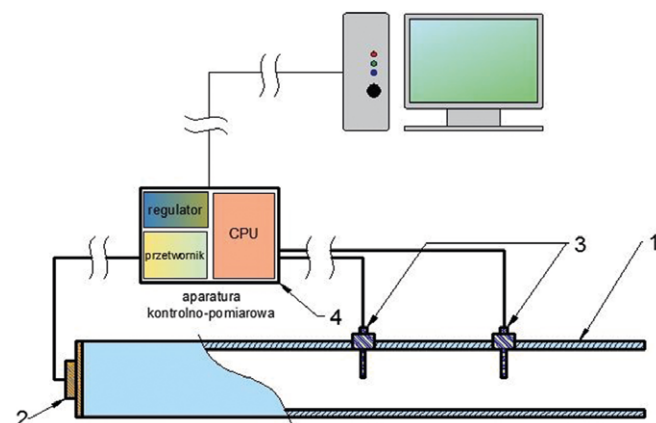
Pierwszy z wymienionych wariantów wykorzystania metody w rzeczywistym urządzeniu narzuca zastosowanie układu pomiarowo-obliczeniowego, którego funkcją jest weryfikacja wystąpienia (lub niewystąpienia) rezonansu akustycznego w cylindrze i dostrojenie parametrów emitowanej fali akustycznej w sposób pozwalający na jego obserwację. Ograniczenie to może zostać zrealizowane konstrukcyjnie, np. poprzez wykorzystanie sprzężenia zwrotnego, który to sposób jest jednym z fundamentów urządzenia wykorzystującego generator fotoakustyczny [7].

Wspomniane urządzenie, którego schemat przedstawiono na rys. 5, składa się z cylindrycznego kanału akustycznego, wyposażonego w mikrofon pełniący funkcję czujnika ciśnienia akustycznego, umieszczony w połowie długości kanału, oraz automatycznego układu detekcji amplitudy połączonego z sumatorem, którego zadaniem jest weryfikacja wartości amplitudy ciśnienia akustycznego względem założonej [7]. Weryfikacja odbywa się na drodze przesyłania sygnału poprzez sprzężenie zwrotne między detektorem a sterownikiem układu fotoakustycznego, wymuszającego wystąpienie rezonansu akustycznego. Wykorzystanie efektu fotoakustycznego w celu indukcji rezonansu pozwala na redukcję niekorzystnych zjawisk falowych, mogących wystąpić w kanale akustycznym w trakcie dokonywania pomiaru w przypadku innych metod wzbudzenia układu [6]. Główną zaletą tego rozwiązania jest uproszczona konstrukcja układu pomiarowego przy jednocześnie wysokiej dokładności, wadę natomiast stanowi zabudowanie kanału akustycznego relatywnie wrażliwymi na zanieczyszczenia i wilgoć elementami układu fotoakustycznego, co ogranicza możliwość wykorzystania przyrządu w skrajnie niekorzystnych środowiskach pracy.

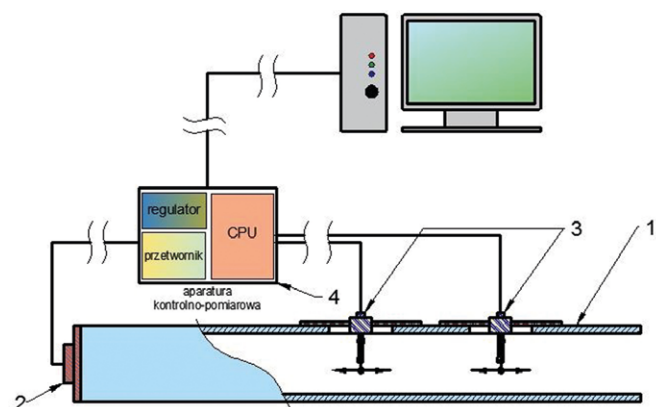
Drugi z wariantów konstrukcji rzeczywistego urządzenia pomiarowego, opartego o wykorzystanie rezonansu akustycznego, zakłada wykorzystanie szeregu czujników ciśnienia (np. mikrofonów lub przetworników piezoelektrycznych) w celu identyfikacji rzeczywistego położenia strzałek lub węzłów ciśnienia akustycznego, związanego z wystąpieniem rezonansu, w kanale akustycznym [3]. W przypadku takiej konstrukcji urządzenia korzystne jest jego wyposażenie w wiele (co najmniej dwa) czujników pomiarowych, co umożliwia zidentyfikowanie częstotliwości poprzez jednoczesne określenie położenia strzałki i węzła ciśnienia. Skutkuje to zwiększeniem wiarygodności otrzymanych rezultatów. Ponadto, poprzez ruchome położenie mikrofonów i mechaniczną regulację ich położenia w objętości rezonatora, nie jest konieczne zastosowanie układu regulacji ze sprzężeniem zwrotnym, co redukuje ilość elementów tworzących układ pomiarowy w stosunku do układu przedstawionego na rys. 5. Jednakże wadą tego rozwiązania może być niemożność poprawnego zidentyfikowania



Rys. 5. Schemat układu pomiarowego wykorzystującego efekt fotoakustyczny (na podstawie [7]): 1, 2 – wlot/wylot mieszaniny gazów (w zależności od konfiguracji); 3 – mikrofon; 4 – wzmacniacz sygnału; 5 – sterownik układu fotoakustycznego; 6 – detektor amplitudy sygnału; 7 – sumator; 8 – mikrokontroler; 9 – dioda LED; 10 – absorber; 11 – okno; 12 – rezonator akustyczny



Rys. 6. Schemat urządzenia wykorzystującego pomiar w wielu punktach kanału akustycznego z mocowaniem stałym; 1 – rezonator (kanał akustyczny); 2 – wzbudnik akustyczny; 3 – czujniki ciśnienia akustycznego; 4 – aparatura kontrolno-pomiarowa (regulator, przetwornik, jednostka obliczeniowa)



Rys. 7. Schemat urządzenia wykorzystującego pomiar w wielu punktach kanału akustycznego z ruchomym mocowaniem czujników pomiarowych; 1 – rezonator (kanał akustyczny); 2 – wzbudnik akustyczny; 3 – czujniki ciśnienia akustycznego; 4 – zestaw aparatury kontrolno-pomiarowej

częstotliwości rezonansowej układu w przypadku gwałtownej zmiany prędkości propagacji dźwięku w badanej mieszaninie gazów, która może wystąpić podczas skokowej zmiany stężenia badanego składnika.

W skład aparatury kontrolno-pomiarowej w przypadku omawianego urządzenia wchodzi: jednostka sterująca parametrami (głównie częstotliwością i amplitudą) fali akustycznej generowanej przez wzbudnik akustyczny (regulator), przetwornik sygnału zebranego z czujników ciśnienia oraz jednostka obliczeniowa, odpowiedzialna za wyznaczenie prędkości dźwięku i stężenie danego składnika w mieszaninie gazów na podstawie dokonanych pomiarów. Ponieważ zarówno sygnał pomiarowy, jak i sygnał wzbudzenia fali akustycznej przesyłane są drogą przewodową, układ kontrolno-pomiarowy może być umieszczony w znacznej odległości od właściwego przyrządu, co dodatkowo niweluje ryzyko jego uszkodzenia w trakcie dokonywania pomiarów w środowiskach niebezpiecznych, zapylnych lub o wysokiej wilgotności.

Istotnymi zaletami obu przedstawionych rozwiązań technologicznych jest ich stosunkowo niewielki koszt. W przypadku układu wykorzystującego zjawisko fotoakustyczne istotne koszty może generować konieczność uszczelnienia rezonatora zabudowanego układem wzbudzenia fotoakustycznego; jednakże, w przypadku stosowania urządzenia jedynie do pomiaru stężenia składnika mieszanin o niskim ciśnieniu, koszty te nie powinny przesądzać o ekonomicznej opłacalności rozwiązania. Należy nadmienić, iż pomimo stosunkowo zaawansowanego układu przetwarzania sygnału, w który wyposażony jest przyrząd, jego koszt można zredukować poprzez zastosowanie jednej z popularnych platform programowalnych, dedykowanych układom automatyki i robotyki.

W przypadku układu z ruchomym umiejscowieniem czujników pomiarowych istotną część kosztów wytworzenia urządzenia przypada na mocowanie czujników do ruchomej platformy, przytwierdzonej do rezonatora. Koszty te związane są z koniecznością zastosowania nieinwazyjnych metod montażu, nieuwzględniających zastosowania elementów zaburzających pole akustyczne wewnątrz rezonatora. Jednakże, ponieważ – jak wspomniano wcześniej – urządzenie to dedykowane jest dokonywaniu pomiaru ilości składnika w mieszaninie gazów wypełniających znaczną przestrzeń (kawernę, pomieszczenie, zbiornik o znacznej pojemności itp.) oraz nie ma konieczności stosowania wysokich amplitud ciśnienia akustycznego, osiągnięcie wspomnianego celu może być zrealizowane częściowo z wykorzystaniem środków adhezyjnych. Może to prowadzić do dalszej redukcji kosztów wytworzenia przyrządu pomiarowego.

4. Technologia a rynek

Przedstawiony sposób pomiaru stężenia składników w mieszaninach binarnych wykorzystywany jest przez szereg urządzeń, znajdujących się na rynku. Przykład stanowi BGA244 Binary Gas Analyzer, dedykowany do oznaczenia zawartości danego składnika gazowego w mieszaninie dwóch gazów, identyfikacji czystości danego gazu oraz szacowaniu własności fizycznych analizowanej mieszaniny [8]. Urządzenie to dokonuje identyfikacji prędkości dźwięku w mieszaninie gazowej, wykorzystując pomiar częstotliwości rezonansowej w zamkniętym rezonatorze

akustycznym, podłączanym do kanału, w którym przepływa analizowana mieszanina. Najwyższe deklarowane przez producenta urządzenia wartości błędów pomiarowych wynoszą odpowiednio ok. 0,14% w przypadku mieszanin, których składniki mają istotnie zbliżone masy molowe (np. mieszanina helu i wodoru) oraz ok. 0,002% w przypadku analizy mieszanin, których składniki skrajnie różnią się od siebie masą cząsteczkową (np. mieszanina metylku (III) indu i wodoru). Istotnym ograniczeniem, wiążącym się z zastosowaniem opisanego urządzenia, jest jednak maksymalne ciśnienie pracy, wynoszące około 2,3 bara, co ogranicza możliwość jego wykorzystania w licznych procesach przemysłowych.

Innym urządzeniem pomiarowym, także wykorzystującym zmianę prędkości dźwięku w mieszaninie binarnej gazów w celu pomiaru, jest Composer Elite, którego cechą charakterystyczną jest dokonywanie pomiaru w wielu próbkach gazu jednocześnie [9]. W przypadku analizowania składu wyłącznie jednej mieszaniny gazów, zwielokrotnienie pomiaru skutkuje możliwością zastosowania narzędzi statystycznych i dokładniejszego oszacowania niepewności pomiarowej, a także umożliwia dokonywanie pomiaru dla szeregu zróżnicowanych mieszanin gazowych w przypadku realizacji pomiaru wielokanałowego. Może być to istotną zaletą w przypadku monitorowania przebiegu procesów, uwzględniających występowanie szeregu reakcji chemicznych, lub wieloetapowej separacji gazów. W przypadku tego urządzenia problem maksymalnego ciśnienia analizowanej mieszaniny nie jest wprawdzie istotny (urządzenie może zostać wykorzystane do analizy gazów o ciśnieniu do 10 barów), jednakże ze względu na relatywnie długi czas pomiaru równy w przybliżeniu sekundzie, przyrząd może nie nadawać się do realizacji pomiarów w mieszaninach o szybko zmieniającym się składzie.

5. Podsumowanie

Pomimo wspomnianych ograniczeń wykorzystanie zależności prędkości dźwięku w mieszaninie binarnej od udziału jej składników do pomiaru stężeń gazów stanowi intensywnie rozwijany obszar miernictwa. Ze względu na brak elementów grzejnych oraz rezygnację z wykorzystania gazu nośnikowego przyrządy oparte o opisany sposób pomiaru mogą być stosowane w licznych obszarach przemysłu – w inżynierii chemicznej, procesowej, gazownictwie czy górnictwie naftowym, szczególnie w celu identyfikacji składu mieszanin gazów lekkich (np. wodoru, helu), będących substancjami palnymi lub wybuchowymi. Niektóre z przedstawionych w niniejszej pracy koncepcji urządzeń pomiarowych – na przykład urządzenie z ruchomym mocowaniem czujników pomiarowych – opracowano w trakcie badań nad zjawiskiem separacji membranowej gazów przemysłowych, identyfikując obszar ich zastosowania w sposób bezpośredni. Opisany układ stanowi przedmiot dalszych badań oraz optymalizacji.

Literatura

- [1] Dyrektywa 2010/75/EU Parlamentu Europejskiego oraz Komisji Europejskiej z dnia 24 listopada 2010 r. w sprawie emisji z instalacji przemysłowych (zintegrowana kontrola i ochrona przed zanieczyszczeniami).

- [2] REMIORZ L.: *Badania numeryczne i eksperymentalne akustycznej separacji CO₂*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2015.
- [3] Zgłoszenie patentowe nr P.425541: Sposób pomiaru ilości gazu w mieszaninie gazów oraz urządzenie do realizacji tego sposobu, UPRP, 2018.
- [4] CROWNURST D., MANCHESTER S.J.: *The measurement of methane and other gases from the ground*. CIRIA Report 131, Building Research Establishment/Construction Industry Research and Information Association, Watford 1993.
- [5] PALMER P.E., WEAVER E.R.: *Thermal-conductivity method for the analysis of gases*. Technologic papers of the Bureau of Standards 249(18), Washington 1924.
- [6] OSTROWSKI P., REMIORZ L.: *Measurement of gas flow in short ducts, also rectangular*. „Flow Measurement and Instrumentation” 30/2013.
- [7] SUCHENEK M., BOROWSKI T.: *Measuring Sound Speed in Gas Mixtures Using a Photoacoustic Generator*. „International Journal of Thermophysics” 39(11)/2018.
- [8] Binary Gas Analyzer BGA224, katalog – skrócona specyfikacja techniczna, Stanford Research Systems, dostęp on-line dn. 7.06.2018: <http://www.thinksrs.com/products/bga244.html>
- [9] Composer Elite Binary Gas Concentration Monitor, katalog – skrócona specyfikacja techniczna, Inficon, dostęp on-line dn. 7.06.2018: <https://products.inficon.com/getattachment.axd/?attName=f9221cb0-a713-4d68-8e53-e7f4308b5290>



Krzysztof Grzywnowicz, Grzegorz Wiciak
Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Politechnika Śląska
e-mail: grzegorz.wiciak@polsl.pl
e-mail: krzysztof.grzywnowicz@polsl.pl

artykuł recenzowany