

Ryszard BOGACZ  
Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej  
Politechnika Śląska

## BADANIE DYFUZYJNEGO PRZENIKANIA METANU PRZEZ OSŁONY OGNIOSZCZELNE CZUJNIKÓW PELLISTOROWYCH

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono model matematyczny dyfuzyjnego procesu przenikania metanu przez osłony ognioszczelne czujników pelistorowych. Opisano także sposób praktycznej weryfikacji modelu przenikania dla skoku jednostkowego stężenia metanu.

## INVESTIGATIONS OF DYNAMICS OF METHANE DIFFUSION THROUGHOUT FLAME-PROOF SHIELDS OF PELLISTOR SENSOR

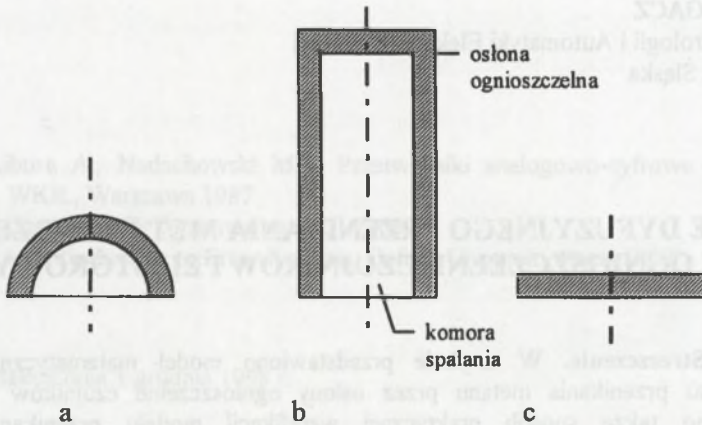
**Summary.** The mathematical model of methane diffusion throughout flame-proof shields of pellistor sensor is presented in this paper. The way of practical verification of this model for step function force  $C \cdot I(t)$  is described, too.

### 1. WSTĘP

Powszechnie stosowanym czujnikiem do pomiarów stężenia gazów palnych jest czujnik pelistorowy zabudowany w osłonie ognioszczelnej [4]. Pelistor jest cienką spiralką z drutu platynowego zatopionego w ogniotrwalej perlece z tlenku aluminium. W przypadku pelistora aktywnego jest on dodatkowo pokryty warstwą katalizatora. Przetwornikiem pomiarowym umożliwiającym uzyskanie użytecznego sygnału pomiarowego jest mostek pelistorowy. Po załączeniu napięcia zasilania przepływ prądu przez pelistor powoduje jego nagrzewanie. W temperaturze około 300 °C rozpoczyna się spalanie katalityczne, w wyniku czego następuje zmiana wartości rezystancji pelistora aktywnego i pojawia się napięcie niezrównoważenia na przekątnej mostka.

Osłony ognioszczelne mają na celu zabezpieczenie przed wybuchem na skutek zapłonu metanu w trakcie pomiaru oraz stanowią ochronę przed uszkodzeniami mechanicznymi

czujników pelistorowych. Osłony wykonywane są najczęściej z brązu w postaci porowatego spieku (rys. 1) [4],[5].



Rys. 1. Typowe przekroje podłużne różnych osłon czujników pelistorowych  
Fig. 1. Typical vertical sections of various flame-proof shields of pellistor sensors

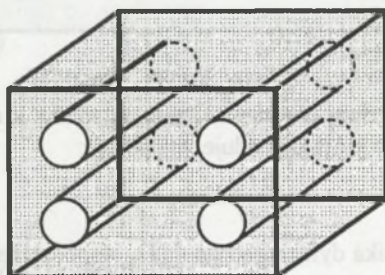
Dyfuzyjny proces przenikania metanu przez osłony znacznie wydłuża czas uzyskania wyniku pomiaru. Czasy reakcji obecnie produkowanych czujników wynoszące ok. kilkunastu do kilkudziesięciu sekund [5] są o często za długie. Czujniki takie stosowane są w kopalniach węgla kamiennego, gdzie istnieje duże zagrożenie wyrzutami metanu, a długie czasy reakcji istotnie zwiększają zagrożenie wybuchem metanu. Poznanie dynamiki procesu przenikania ma na celu m.in. opracowanie algorytmów pozwalających na znaczne zwiększenie szybkości działania czujników.

W ostatnim okresie pojawiła się możliwość [1] pomiaru stężenia metanu wewnątrz osłony ognioszczelnej z minimalną ingerencją w proces przenikania metanu przez osłonę. Mostek pelistorowy jest w takim przypadku zasilany napięciem impulsowym o czasie trwania ok. 0,3 s, z możliwością minimalizacji okresu, w którym metan jest spalany do 0,16 s. Zasilanie impulsowe pozwala ograniczyć ciepło wydzielane przez pelistor tak, że nie ma ono istotnego wpływu na dyfuzyjny przepływ metanu. Można przypuszczać, że opracowana metoda pozwoli na badanie dyfuzyjnego przenikania metanu przez osłony ognioszczelne. Przewiduje się również możliwość badania przenikania metanu wymuszonego dodatkowym wewnętrznym źródłem ciepła.

## 2. MODEL MATEMATYCZNY DYFUZYJNEGO PROCESU PRZENIKANIA METANU PRZEZ OSŁONY OGNIOSZCZELNE CZUJNIKÓW PELISTOROWYCH

Podstawowym problemem, który należy rozwiązać, jest stworzenie modelu matematycznego opisującego dyfuzyjny proces przenikania gazu przez ciało porowate. Na obecnym etapie prac przyjęto uproszczony model, w którym pominięto zjawiska związane ze spalaniem metanu, zmiany temperatury i ciśnienia gazu wewnątrz osłony.

Dyfuzja jest procesem wyrównania stężenia roztworu utworzonego przez składniki nie reagujące chemicznie ze sobą [7]. Podczas dyfuzji składniki roztworu przepływają z miejsc, w których ich stężenie jest większe, do miejsc, w których stężenie jest mniejsze. Wektor gęstości strumienia składnika roztworu przepływającego przez jednostkę powierzchni prostopadłej do tego wektora jest proporcjonalny do gradientu stężenia. Współczynnikiem proporcjonalności jest współczynnik dyfuzji będący funkcją temperatury, ciśnienia oraz składu roztworu dyfundującego. Dyfuzja substancji w ciałach porowatych zachodzi poprzez substancję wypełniającą pory ciała. Efektywny współczynnik dyfuzji w takim ciecie jest mniejszy niż współczynnik dyfuzji w swobodnym gazie lub cieczy. Wynika to z faktu, że krętość drogi dyfuzji powoduje zwiększenie odległości, jaką muszą przebyć cząsteczki, przy jednoczesnym ograniczeniu powierzchni przekroju poprzecznego ciała.



Rys. 2. Model ciała porowatego

Fig. 2. Model of porous body

W przypadku gdy średnica porów jest dużo mniejsza od średniej drogi swobodnej cząsteczek dyfundujących, cząsteczka praktycznie nie zderza się z innymi cząsteczkami substancji dyfundującej, lecz głównie ze ściankami porów. Dyfuzja taka nosi nazwę dyfuzji Knudsen, a współczynnik dyfuzji opisuje się wzorem

$$D_k = \frac{2d_p}{3} \sqrt{\frac{2RT}{\pi M_j}}, \quad (1)$$

gdzie:  $R$  - stała gazowa J/(kmol K),

$T$  - temperatura K,

$M_j$  - masa molowa składnika dyfundującego j kg/kmol,

$D_k$  - współczynnik dyfuzji Knudsen  $m^2/s$ .

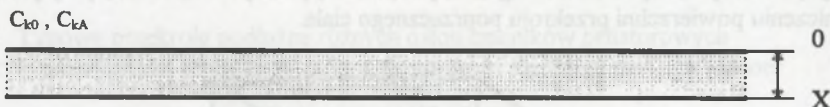
Biorąc pod uwagę fakt, że stosunek objętości poru, traktowanego jako cylindryczna kapilara, do powierzchni jego ścianek bocznych wynosi  $d_p/4$ , m, oraz że objętość porów na jednostkę objętości materiału stałego wynosi  $\varepsilon_p$ ,  $m^3/m^3$ , a sumaryczna powierzchnia wewnętrzna porów na jednostkę objętości materiału stałego wynosi  $A_w$ ,  $m^2/m^3$ , otrzymuje się:

$$d_p = \frac{4\varepsilon_p}{A_w}, \quad (2)$$

oraz

$$D_k = \frac{8\varepsilon_p}{3A_w} \sqrt{\frac{2RT}{\pi M_j}}. \quad (3)$$

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można założyć, że kształt osłony ma niewielki wpływ na jej właściwości dynamiczne. Głównym czynnikiem wpływającym na wartość współczynnika dyfuzji jest powierzchnia osłony oraz jej grubość. W związku z tym został rozważony przypadek dyfuzji gazu przez osłonę porowatą, co do której zakłada się, że posiada dużą powierzchnię przy stosunkowo małej grubości. W konsekwencji można przyjąć, że osłona jest płaska i opisuje ją tylko jedna współrzędna  $x$  (jest to dobre przybliżenie kształtu osłony na rys. 1c).



Dla dyfuzji jednowymiarowej równanie bilansu składnika  $k$  nie wchodzącego w reakcje chemiczne z substancją  $j$ , przez którą dyfunduje, ma postać:

$$\frac{\delta C_k}{\delta t} = D_{kj} \frac{\delta^2 C_k}{\delta x^2}, \quad (4)$$

gdzie  $C_k$  - koncentracja składnika dyfundującego  $k$ ,  $D_{kj}$  współczynnik dyfuzji składnika  $k$  przez substancję  $j$ .

Rozwiązanie tego równania dla wymuszenia w postaci skoku jednostkowego stężenia metanu wymaga sprecyzowania warunków brzegowych i początkowych. Rozważmy najpierw ciało półnieskończone, rozciągające się od powierzchni w miejscu  $x = 0$  do nieskończoności, w którym występuje niezmienna w całej objętości koncentracja  $C_{k0}$  składnika  $k$ . Jeżeli w chwili  $t = 0$  koncentracja tego składnika na powierzchni  $x = 0$  ulegnie zmianie do wartości  $C_{kA}$ , wywoła to dyfuzję nieustaloną składnika  $k$  w ciełe porowatym. Warunki początkowo-brzegowe dla równania (4) mają zatem postać:

- $C_k(x, 0) = C_{k0}$  - warunek początkowy wewnątrz ciała,
- $C_k(0, t) = C_{kA}$  - warunek brzegowy na powierzchni ciała,
- $C_k(\infty, t) = C_{k0}$  - warunek brzegowy dla  $x \rightarrow \infty$ .

Równanie (4) można rozwiązać stosując przekształcenie Laplace'a. Transformując względem zmiennej  $t$ , otrzymuje się:

$$s\bar{C}_k(x, s) - C_{k0} = D_{kj} \frac{D^2 \bar{C}_k(x, s)}{dx^2}, \quad (5)$$

gdzie  $s$  jest operatorem Laplace'a, a  $\bar{C}_k(x, s)$  transformatą koncentracji. Otrzymane równanie jest równaniem różniczkowym zwyczajnym, a jego warunki brzegowe mają postać:

$$\bar{C}_k(\infty, s) = \frac{C_{k0}}{s} \quad \text{oraz} \quad \bar{C}_k(0, s) = \frac{C_{k1}}{s}. \quad (6)$$

Po scałkowaniu równania (5) i podstawieniu warunków brzegowych otrzymuje się

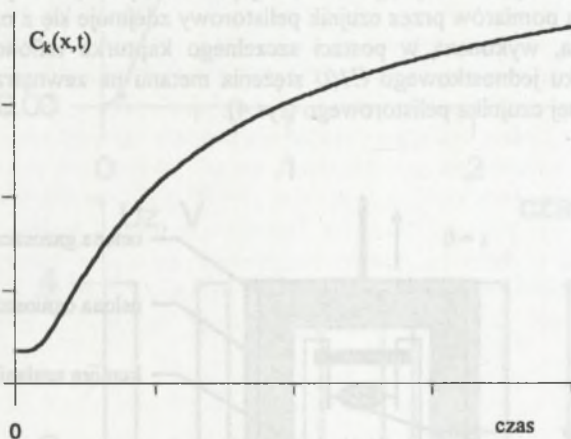
$$\bar{C}_k(x, s) = \frac{C_{k0}}{s} + \frac{C_{k1}}{s} \exp\left(-\frac{s}{D_k t}\right)^{1/2}. \quad (7)$$

Dokonując odwrotnej transformacji Laplace'a dochodzi się do następującej zależności opisującej koncentrację składnika  $k$  w ciele w odpowiedzi na skok jednostkowy:

$$C_k(x, t) = C_{k0} + (C_{k1} - C_{k0}) \left[ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_k t}}\right) \right], \quad (8)$$

gdzie

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\pi} \int_0^z e^{-y^2} dy. \quad (9)$$



Rys. 3. Przykładowa odpowiedź na skok jednostkowy koncentracji składnika  $k$  w punkcie  $x > 0$  w funkcji czasu  $t$ , przy ustalonym współczynniku dyfuzji  $D_k$ , otrzymana z równania 8

Fig. 3. Exemplary response to the ingredient  $k$  concentration step function at point  $x > 0$ , for the determined diffusion coefficient  $D_k$ , calculated from Eq. 8

### 3. WERYFIKACJA PRAKTYCZNA MODELU PRZENIKANIA W ODPOWIEDZI NA SKOK JEDNOSTKOWY STĘŻENIA METANU

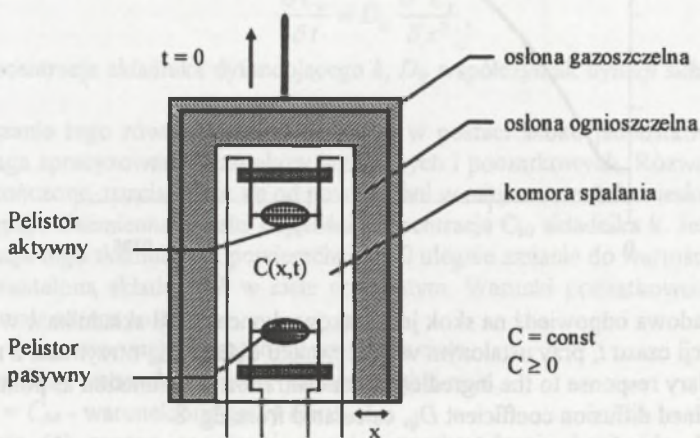
W celu przeprowadzenia badań skonstruowano moduł pomiarowy [2], który składa się z dwóch głównych elementów:

- układu pomiarowego zbudowanego na bazie mikrokontrolera 80C32, umożliwiającego badanie kolejno czterech niezależnych mostków pelistorowych,
- komory pomiarowej wypełnianej mieszanką o wzorcowym stężeniu, w której umieszcza się badane czujniki pelistorowe w osłonach ognioszczelnych oraz elementy do zadawania skoku jednostkowego stężenia metanu.

Układ pomiarowy umożliwia ustalenie wartości napięcia zasilania mostka, jednoczesny pomiar prądu płynącego przez mostek pelistorowy i napięcia wyjściowego z przekątnej mostka, oraz tymczasowe przechowanie wyników pomiarowych, przesłanie wyników do komputera w celu wizualizacji i archiwizacji.

Na podstawie zmierzonych wartości chwilowych napięcia i prądu można poprzez programowe odtwarzanie wyznaczyć wartości chwilowe stężenia metanu [1]. Dobierając odpowiednio parametry zasilania impulsowego (czas trwania, częstotliwość powtarzania) można mierzyć stężenie metanu wewnątrz osłony ognioszczelnej.

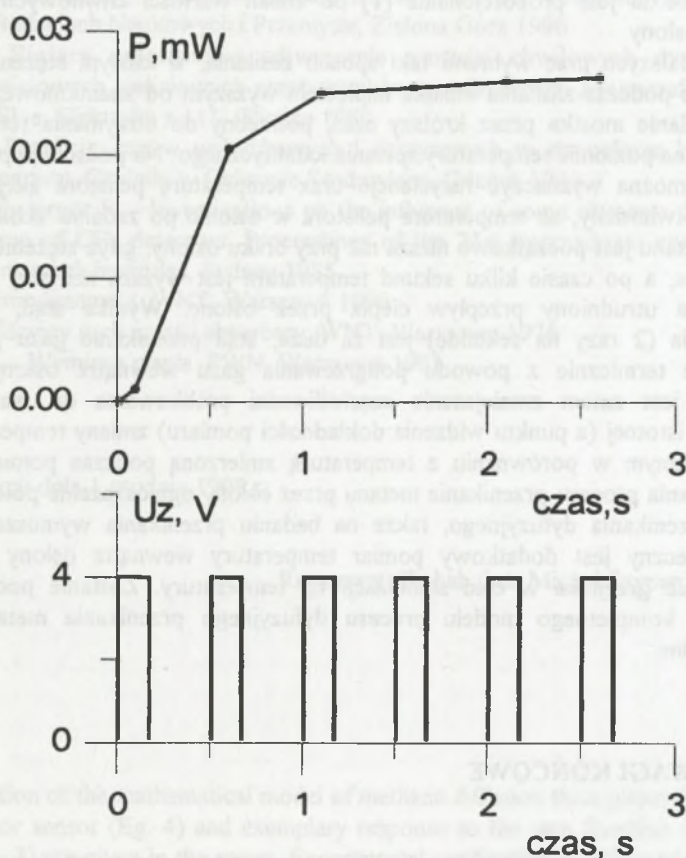
W komorze pomiarowej utrzymuje się w trakcie trwania pomiarów stabilne stężenie. Stężenie metanu wewnątrz osłony ognioszczelnej przed rozpoczęciem pomiarów jest równe 0%. Po rozpoczęciu pomiarów przez czujnik pelistorowy zdejmuje się z osłony ognioszczelnej osłonę gazoszczelną, wykonaną w postaci szczelnego kapturka teflonowego, co skutkuje wytworzeniem skoku jednostkowego  $CI(t)$  stężenia metanu na zewnętrznej ścianie badanej osłony ognioszczelnej czujnika pelistorowego (rys.4).



Rys. 4. Zadawanie skoku jednostkowego stężenia metanu

Fig. 4. Realisation of step function  $1(t)$  of methane concentration

Podstawowym problemem podczas weryfikacji praktycznej modelu było ustalenie przebiegu zmian napięcia zasilającego mostki pelistorowe. Czas zasilania powinien być krótki, aby zminimalizować wpływ czujnika na proces dyfuzji, tzn. ograniczyć wypalanie metanu oraz nagrzewanie gazu wewnątrz osłony. Wypalanie metanu wewnątrz osłon ognioszczelnych czujników pelistorowych można ograniczyć, skracając czas, przez jaki płynie prąd przez pelistory. Czas ten nie może być jednak zbyt krótki, gdyż pomiar musi być przeprowadzony w temperaturze spalania katalitycznego, co wymaga odpowiedniego podgrzania pelistorów. Nagrzewanie gazu wewnątrz osłony można zmniejszyć wydłużając czas pomiędzy kolejnymi impulsami zasilającymi. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów pomiarowych ustalono odpowiedni przebieg napięcia zasilającego.



Rys. 5. Zmierzona wartość mocy wydzielanej podczas spalania katalitycznego metanu w osłonie ognioszczelnej po zadaniu skoku jednostkowego stężenia metanu oraz przebieg napięcia zasilającego mostek pelistorowy

Fig. 5. The measured power of methane catalytic combustion inside flame-proof shields after methane step function  $1(t)$  and voltage supplying the pellistor bidge

Metoda pomiaru polega na 2-krotnym w ciągu sekundy próbkowaniu stężenia metanu wewnątrz osłony, wykorzystując impulsowe zasilanie mostka pelistorowego. Próbkowanie stężenia rozpoczyna się po zdjęciu osłony gazoszczelnej (w chwili  $t = 0$ ) i trwa do stanu ustalonego, tj. do wyrównania się stężenia wewnątrz i na zewnątrz osłony. Wyniki pomiarowe umożliwią weryfikację doświadczalną teoretycznego modelu matematycznego osłony ognioszczelnej czujnika. Weryfikacja ma na celu sprawdzenie poprawności uproszczonego modelu (poprzez porównanie odpowiedzi na skok jednostkowy) oraz wyznaczenie współczynników modelu. Na rys. 5 przedstawiono przyrost mocy wydzielanej na pelistorze aktywnym podczas spalania katalitycznego wewnątrz osłony ognioszczelnej po zadaniu skoku jednostkowego stężenia metanu w stosunku do mocy wydzielanej przy stężeniu zerowym. W celu poprawienia czytelności wykresu mocy kolejne punkty pomiarowe połączono odcinkami prostej. Moc ta jest proporcjonalna [1] do zmian wartości chwilowych stężenia metanu wewnątrz osłony.

Do dalszych prac wybrano taki sposób zasilania, w którym stężenie metanu będzie wyznaczone podczas zasilania mostka napięciem wyższym od znamionowego. Umożliwia to jednak zasilanie mostka przez krótszy czas, potrzebny do utrzymania temperatury pelistora aktywnego na poziomie temperatury spalania katalitycznego. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można wyznaczyć rezystancje oraz temperaturę pelistora aktywnego. Wstępne pomiary potwierdziły, że temperatura pelistora w osłonie po zadaniu skoku jednostkowego stężenia metanu jest początkowo niższa niż przy braku osłony, gdyż stężenie jest mniejsze niż na zewnątrz, a po czasie kilku sekund temperatura jest wyższa niż przy braku osłony ze względu na utrudniony przepływ ciepła przez osłonę. Wynika stąd, że częstotliwość próbkowania (2 razy na sekundę) jest za duża, stąd przenikanie gazu przez osłonę jest wymuszone termicznie z powodu podgrzewania gazu wewnątrz osłony przez pelistor. Konieczne jest zatem zmniejszenie częstotliwości próbkowania do wartości, która nie spowoduje istotnej (z punktu widzenia dokładności pomiaru) zmiany temperatury pelistora w stanie ustalonym w porównaniu z temperaturą zmierzoną podczas pomiarów bez osłony. Dalsze badania procesu przenikania metanu przez osłony ognioszczelne polegać będą, oprócz badania przenikania dyfuzyjnego, także na badaniu przenikania wymuszonego termicznie, gdzie konieczny jest dodatkowy pomiar temperatury wewnątrz osłony oraz ewentualne zastosowanie grzejnika w celu stabilizacji tej temperatury. Zostanie podjęta także próba stworzenia kompletnego modelu procesu dyfuzyjnego przenikania metanu przez osłony ognioszczelne.

#### 4. UWAGI KOŃCOWE

Na podstawie otrzymanych wyników pomiarowych prądu zasilającego mostek oraz napięcia z przekątnej mostka przy ustalonym napięciu zasilania można odtworzyć wartości chwilowe stężenia metanu wewnątrz osłony ognioszczelnej [1]. Otrzymane wyniki umożliwią weryfikację teoretycznego modelu procesu przenikania. W dalszym etapie prac otrzymany model o stałych rozłożonych zostanie zastąpiony modelem o stałych skupionych w postaci łańcucha równań różniczkowych zwyczajnych. Dysponując tak przetworzonym modelem



można będzie odtworzyć wartości chwilowe stężenia metanu na zewnątrz osłony, rozwiązując odwrotne modele procesu przenikania metanu przez osłony ognioszczelne [3].

## LITERATURA

1. Roj J. - Pomiar stężenia mieszanki palnej za pomocą mostka pelistorowego zasilanego impulsowo. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 1998
2. Bogacz R., Jakubiec J., Roj J. - System pomiarowy do badań czujników do pomiarów stężeń mieszanek palnych w stanach dynamicznych. Materiały konferencyjne. Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i Przemśle, Zielona Góra 1996
3. Jakubiec J. - Bieżące programowe odtwarzanie wartości chwilowych dynamicznych przebiegów wejściowych nieliniowych przetworników pomiarowych. Monografia. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. s. Elektryka z.111, Gliwice 1988
4. Świergot F. - Detekcja gazów wybuchowych i toksycznych w atmosferze kopalnianej. Materiały Seminarium. Czujniki w Ochronie Środowiska, Gdańsk 1994
5. Krzystolik P., Świergot F. - Investigations on the influence of some elements determining the response time of  $\text{CH}_4$  detectors. Proceedings of the 21st international conference of safety in mines research institutes, Sydney 1985
6. Szargut J. - Termodynamika. WNT, Warszawa 1996
7. Hobler T. - Dyfuzyjny ruch masy i absorbery. WNT, Warszawa 1976
8. Staniszewski B. - Wymiana ciepła. PWN, Warszawa 1963

Wpłynęło do redakcji dnia 1 grudnia 1998 r.

Recenzent: Dr hab. inż. Michał Szyper prof. AGH

## Abstract

A way of construction of the mathematical model of methane diffusion throughout flame-proof shields of a pellistor sensor (Eg. 4) and exemplary response to the step function of methane concentration (Fig. 3) are given in the paper. Experimental verification of this model has been made and the results of it are presented, as well. Optimization of the pellistor bridge supply voltage is described. The measured power of methane catalytic combustion inside the flame-proof shields after methane step function and the waveform of the voltage supplying pellistor bridge are shown in Fig. 5. Review of the methods of realization of the methane concentration step function (Fig. 4) and the ways of practical verification of the mathematical model are presented in the paper, too.