

Józef Folwarczny, Józef Szymczyk  
Instytut Techniki Ciepłej

## POMIAR ZAWARTOŚCI PARY WODNEJ W GAZACH WILGOTNYCH

Streszczenie. W pracach przedstawiono sposób wyznaczania ilości pary wodnej zawartej w gazie polegający na wykorzystaniu zjawisk fizycznych towarzyszących ochładzaniu izochorycznemu.

### 1. Zastosowane oznaczenia

- $x$  - stopień niecałkowitego spalania  
 $\varphi$  - wilgotność względna gazu  
 $X$  - masowy stopień zawilżenia gazu  
 $X_z$  - molowy stopień zawilżenia gazu  
 $n_i$  - ilość materii poszczególnych substratów procesu spalania  
[i] - udział objętościowy i-tego składnika zawartego w spalinach suchych  
 $p$  - ciśnienie  
 $p_g$  - ciśnienie cząstkowe gazu suchego  
 $p_p$  - ciśnienie cząstkowe pary  
 $T$  - temperatura bezwzględna  
 $p_s$  - ciśnienie pary w stanie nasycenia  
 $M_g$  - masa cząsteczkowa gazu  
 $z_p$  - udział molowy pary wodnej  
 $X_{za}$  - molowy stopień zawilżenia powietrza  
 $X_{zs}$  - molowy stopień zawilżenia spalin  
 $M_p$  - masa cząsteczkowa pary.

### 2. Wstęp

Dokładny pomiar ilości pary wodnej zawartej w gazie ma duże znaczenie praktyczne przykładowo, przy bilansowaniu niecałkowitego spalania nie można wyznaczyć z zadowalającą dokładnością stopnia  $x$  niecałkowitego spalania, na podstawie tylko analizy składu paliwa i spalin suchych [1]. Sytuacja znacznie się poprawia w przypadku pomiaru ilości wilgoci zawartej w spalinach. Dla spalania niecałkowitego i niezupełnego (gdy jedynym składnikiem palnym spalin jest CO), z bilansu ilości materii poszczegól-

nych pierwiastków, można wyznaczyć następującą zależność na określenie stopnia niecałkowitego spalania

$$x = 1 - \frac{\frac{n'_{H_2} + n'_{H_2O}}{X_{za}} - \frac{n'_{N_2}}{0,79}}{\frac{X_{zs}}{X_{za}} - \frac{[N_2]}{0,79}} \cdot \frac{[CO_2] + [CO]}{n'_c} \quad (1)$$

Równanie to nie jest tak bardzo wrażliwe na dokładność wyznaczenia ilości azotu zawartego w spalinach, gdyż stosunek  $X_{zs}/X_{za}$  przy spalaniu paliw zawierających pewną ilość wodoru lub wody jest znacznie większy od stosunku  $[N_2]/0,79$ . Na przykład spalając węgiel kamienny o składzie  $c = 0,62$ ,  $h = 0,04$ ,  $o = 0,09$ ,  $s = 0,01$ ,  $n = 0,01$ ,  $w = 0,14$ ,  $p = 0,09$  przy użyciu powietrza o temperaturze  $t = 20^\circ C$  i  $\varphi = 0,60$  oraz stosunku  $\lambda = 1,4$  stosunek  $X_{zs}/X_{za}$  wyniesie 5,86. Z przykładu tego wynika, że błąd rzędu  $\pm 0,2\%$ , popełniony przy wyznaczaniu udziału objętościowego azotu w spalinach suchych powoduje błąd różnicy  $(1 - x)$  wynoszący  $\pm 0,05\%$ . Analogiczna wielkość wyznaczona ze wzoru 303 [1] jest równa  $\pm 20\%$ , przy tym samym błędzie popełnionym przy analizie spalin suchych.

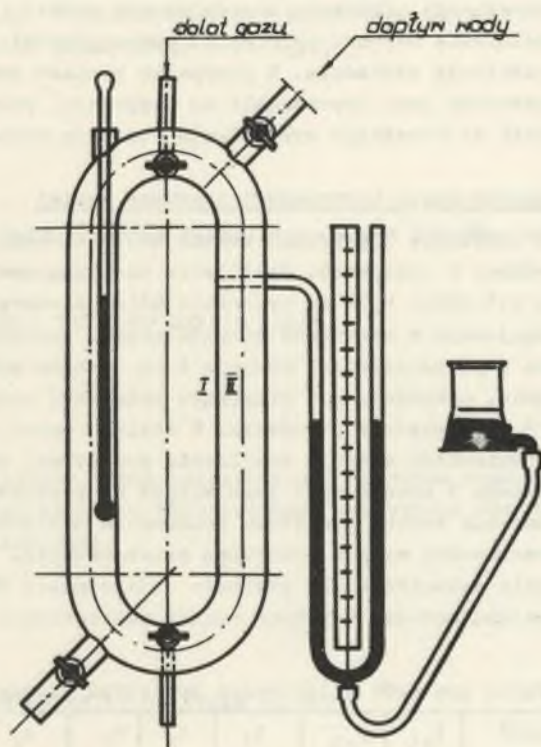
### 3. Zasada pomiaru

Gaz wilgotny o temperaturze wyższej od temperatury punktu rosy doprowadza się do naczynia I o stałej objętości (rys. 1). Naczynie to znajduje się w płaszczu wodnym II. Temperatura wody w tym płaszczu podczas doprowadzania próbki gazu i po jej pobraniu jest niezmienna i wyższa od temperatury punktu rosy gazu. Po zamknięciu próbki gazu i ustaleniu się równowagi termicznej między gazem a wodą, można zmierzyć ciśnienie manometryczne  $p_{m1}$  i temperaturę  $t_1$  gazu wilgotnego w stanie początkowym. Po tych pomiarach następuje izochoryczne schłodzenie próbki gazu znacznie poniżej punktu rosy, co osiąga się przez wprowadzenie wody zimnej do płaszczu wodnego. Po ponownym wyrównaniu się temperatur wody i próbki badanego gazu następuje pomiar ciśnienia  $p_{m2}$  i temperatury  $t_2$ . Stosując równanie Clapeyrona dla gazu suchego w stanie 1 i 2 otrzymuje się zależność

$$\frac{p_{g1}}{p_{g2}} = \frac{p_1 - \varphi_1 p_{s1}}{p_2 - p_{s2}} = \frac{T_1}{T_2} \quad (2)$$

ze wzoru tego można określić nieznaną wilgotność gazu  $\varphi_1$ . W wyniku przekształceń uzyskuje się

$$\varphi_1 = \frac{p_1}{p_{s1}} - \frac{T_1}{T_2} \left( \frac{p_2}{p_{s1}} - \frac{p_{s2}}{p_{s1}} \right) \quad (3)$$



Rys. 1. Schemat prototypu przyrządu

Za pomocą pomierzonych wielkości można również wyznaczyć masowy względnie molowy stopień zawilżenia

$$X = \frac{M_p}{M_g} \left( \frac{T_2}{T_1} \frac{p_1}{p_2 - p_{s2}} - 1 \right) \quad (4)$$

$$X_z = \frac{T_2}{T_1} \frac{p_1}{p_2 - p_{s2}} - 1, \quad (5)$$

oraz udziały molowy pary wodnej

$$z_p = 1 - \frac{T_1}{T_2} \frac{p_2 - p_{s2}}{p_1}. \quad (6)$$

W laboratorium Paliwowym Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej znajduje zastosowanie prototyp przyrządu umożliwiający wykonanie o-

mówionych wyżej pomiarów. Projektodawcą tego przyrządu jest st.wykł.Pol. Śl. Mgr inż. Stanisław Pitużko.

Podstawą określenia ciśnienia bezwzględnej próbki gazu wilgotnego jest pomiar ciśnienia manometrycznego za pomocą Ururki napełnionej rtęcią oraz pomiar ciśnienia otoczenia. W przypadku pomiaru zawilżenia spalin należy próbkę badanego gazu doprowadzić do przyrządu, przewodem ogrzewanym, aby nie dopuścić do wczesnego wykraplania się pary wodnej.

#### 4. Pierwsze zastosowania przyrządu i uzyskane wyniki

Omówiony w rozdziale 3 przyrząd został użyty do wyznaczenia udziału molowego pary wodnej w spalinach. Umożliwiło to wyznaczenie masy strumienia spalin, która potrzebna była do wykonania bilansu energetycznego procesu spalania przebiegającego w warunkach niestabilnych. Przeprowadzone eksperymenty świadczą o powtarzalności wyników i są dowodem praktycznej przydatności przyrządu. O dokładności przyrządu świadczyć mogą wyniki pomiarów wilgotności  $\varphi_{ot}$  powietrza otoczenia. W odcinku czasu, w którym można było przyjąć niezmienną zawilżenie powietrza, pobierano próbkę powietrza wilgotnego i absorbowano jego wilgoć na pięciotlenku fosforu  $P_2O_5$ . Objętość strumienia próbki powietrza osuszonego mierzono przy pomocy rotametri, a zaabsorbowaną wilgoć określono przez ważenie. Równocześnie, w tym samym czasie dokonano kilku pomiarów wilgotności chwilowych próbek powietrza omawianą metodą. Uzyskane wyniki zamieszczono w załączonej tabeli.

Wyniki pomiarów wilgotności powietrza otoczenia

Lp. pomiaru	Wielkość jednostka	$t_{ot}$	$p_{ot}$	$t_1$	$t_2$	$p_1$	$p_2$	$\varphi_1$	$\varphi_{ot}$
		$^{\circ}C$	Tr	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	Tr	Tr		
1		22,1	750	20,2	3,1	745	694	0,821	0,730
2		22,1	750	20,3	3,0	745	694	0,818	0,733
3		22,1	750	20,1	3,2	745	693	0,833	0,735

Wyniki pomiarów i obliczeń przy użyciu  $P_2O_5$

Objętość powietrza suchego  $v_g = 0,065 \text{ m}^3$

Ilość zaabsorbowanej wilgoci  $m_p = 0,945 \text{ g}$

$x_{za} = 0,0197 \text{ kmol H}_2\text{O/kmol p.s.}$

$\varphi_{ot} = 0,731$

Pomiar higrometrem  $\varphi_{ot} = 0,70.$

Podsumowując należy stwierdzić, że przedstawiona metoda cechuje się zadowalającą dokładnością i prostotą pomiaru (pomiar ciśnienie i temperatury). W Instytucie Techniki Ciepłej prowadzone są dalsze prace mające na celu usprawnienie zbudowanego prototypu.

#### LITERATURA

1. Jan Szargut - Termodynamika Techniczna Skrypt Pol.Śl., nr 311, wyd.VI, Gliwice 1971.

#### ИЗМЕРЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА В ГАЗАХ

#### Резюме

В работе представлен метод определения количества водяного пара в газах. Основой метода является использование физических явлений во время изохорического охлаждения.

#### MEASUREMENT OF THE QUANTITY OF STEAM IN GASES

#### Summary

In this paper a method of assignment of steam quantity in the gases has been given.

This method utilizes the physical phenomenans accompanying the isochoric cooling.