

Jerzy Tomaszek, Rafał Drózdź, Jerzy Malara

Instytut Energetyki Gazowej

## PALNIK ZANURZENIOWY USYTUOWANY W DNIĘ NACZYNIA

**Streszczenie.** Przedstawiono koncepcję palnika zanurzeniowego do ogrzewania cieczy usytuowanego w dnie zbiornika oraz wyniki badań. Wykazano możliwość uruchomienia palnika pod zwierciadłem wody. Podczas badań spalano gaz ziemny na głębokości do 800 mm pod powierzchnią cieczy. Wyniki eksperymentów przedstawiono graficznie w postaci zależności sprawności od temperatury wody w zbiorniku dla trzech wartości nadmiaru powietrza.

### 1. Wstęp

Palnik zanurzeniowy służy do bezprzeponowego ogrzewania cieczy w wyniku spalania realizowanego pod powierzchnią zwierciadła. Proces spalania w palnikach tego typu kończy się przed wpływem spalin z komory spalania palnika. Przepływ spalin przez ogrzewaną ciecz powoduje intensywne przekazywanie ciepła oraz mieszanie cieczy prowadzące do wyrównania temperatury w jej objętości. Temperatura spalin na wypływie ze zwierciadła cieczy niewiele się różni od temperatury kąpieli [1, 4, 5].

Techniczna realizacja ogrzewania palnikiem zanurzeniowym sprawia jednak trudności w przypadku gdy ciecz działa niszcząco na materiały, z których jest wykonany palnik. W takich przypadkach czas życia palnika jest niewielki oraz pogarszają się własności kąpieli, co jest nie do zaakceptowania w wielu procesach technologicznych. Przykładem takiego procesu jest wytapianie szkła [3]. Celem pokonania tej trudności istnieje możliwość usytuowania palnika w dnie naczynia. Dodatkową korzyścią jest wówczas bardziej wyrównany rozkład temperatury w rezultacie intensywniejszego mieszania kąpieli.

Laboratorium Użytkowania Paliw Gazowych Instytutu Energetyki Gazowej prowadzi badania palników zanurzeniowych na gaz ziemny usytuowanych w dnie zbiornika do ogrzewania wody [1].

## 2. Graniczna temperatura grzania

Przekazywanie ciepła od spalin do ogrzewanej wody związane jest z równoczesnym przekazywaniem pary wodnej pomiędzy spalinami i kąpielą. Ponieważ temperatura spalin w pobliżu powierzchni zwierciadła niewiele się różni od temperatury kąpeli, przeto decyduje ona zasadniczo o ilości i kierunku przekazywania pary wodnej.

Przy wysokich temperaturach spalin wylotowych ilość wody odparowanej z kąpeli jest tak duża, że użyteczny efekt grzania wody jest znikomy. Można wykazać na drodze obliczeniowej niemożność ogrzania wody powyżej pewnej temperatury zależnej od rodzaju paliwa oraz wilgotności powietrza spalania. Maksymalna temperatura grzania wody jest uzależniona od ciśnienia. Dla ciśnienia atmosferycznego przy spalaniu metanu temperatura maksymalna wynosi ok.  $87^{\circ}\text{C}$ , zaś dla ciśnienia 15 bar wyniesie ona około  $180^{\circ}\text{C}$  [4].

Uwagi powyższe nie dotyczą grzania niewodnych kąpeli, szczególnie wysokotemperaturowych.

Ogrzewanie wody palnikiem nurnikowym charakteryzuje się dwoma temperaturami granicznymi:

- temperatura  $t_g$ , przy której następuje szybki spadek sprawności ogrzewania,
- maksymalna temperatura  $t_{\max}$  ogrzania wody.

Pierwsza z tych temperatur może być obliczona z warunku braku przekazywania pary wodnej pomiędzy spalinami i kąpielą. Zakładając zupełne wypalenie paliwa można z jego składu obliczyć molowy stopień zawilżenia  $X_{zs}$  spalin, co pozwala na wyznaczenie ciśnienia nasycenia  $p_s(t_g)$  pary wodnej w spalinach z równania [2]

$$X_{zs} = \frac{p_g(t_g)}{p - p_s(t_g)} = \frac{n''_{\text{H}_2\text{O}}}{n''_{\text{ss}}} \quad (1)$$

Wynik obliczeń przedstawiony został w tabeli 1 dla spalin uzyskiwanych ze spalania metanu w powietrzu wilgotnym przy różnych ciśnieniach i nadmiarach powietrza. Ponieważ stosowany w praktyce stosunek nadmiaru powietrza jest nie większy niż 1,5, przeto temperatura  $t_g$ , przy której następuje gwałtowny spadek sprawności grzania zależy głównie od ciśnienia panującego w zbiorniku cieczy. Dla ciśnienia atmosferycznego oraz metanu, jako paliwa temperatura ta wynosi ok.  $60^{\circ}\text{C}$ . Zastosowanie innego paliwa prowadzi do odmiennego wyniku.

Podgrzewanie wody powyżej temperatury  $t_g$  odbywa się przy malejącej sprawności grzania tak, że przy temperaturze  $t_{\max}$  osiąga ona wartość zerową. Całe ciepło oddawane przez spaliny (po pominięciu strat ciepła przez ściany) w tym ostatnim przypadku jest zużywane na odparowanie cieczy.

Tabela 1

Zależność temperatury  $t_g$  od nadmiaru  $\lambda$  powietrza, wilgotności  $\varphi_a$  powietrza i ciśnienia  $p$  dla metanu

p bar	$\lambda$	$t_g$ °C		
		$\varphi_a = 0$	$\varphi_a = 50\%$	$\varphi_a = 100\%$
1	1	59,1	59,8	61
	2	46	48	49,5
5	1	98,1	99,3	100,7
	2	81,3	84	86

Maksymalna temperatura  $t_{max}$  grzania wody może być wyznaczona z bilansu energii urządzenia

$$i_{ss1} + X_{s1} i_{ps1} = (i_{ss2} + X_{s2} i_{ps2}) - (X_{s2} - X_{s1}) c_w t_{max} + q_{ot}, \quad (2)$$

gdzie:

- $i_{ss1}, i_{ss2}$  - entalpia suchych spalin na dopływie do kąpieli i na wypływie ze zwierciadła wody odpowiednio,
- $i_{ps1}, i_{ps2}$  - entalpia pary wodnej w spalinach na dopływie do kąpieli i na wypływie ze zwierciadła wody odpowiednio,
- $X_{s1}, X_{s2}$  - stopień zawilżenia spalin na dopływie do kąpieli i na wypływie ze zwierciadła wody odpowiednio,
- $c_w$  - ciepło właściwe ciekłej wody.

Straty ciepła  $q_{ot}$  przez ścianki zbiornika do otoczenia są uzależnione od rodzaju ścian i temperatury otoczenia. Straty te rosną wraz ze wzrostem temperatury w zbiorniku i dla  $t_{max}$  osiągają wartość maksymalną. Dla najbardziej niekorzystnego przypadku niez izolowanego zbiornika stalowego straty  $q_{ot}$  są niższe od 5% energii doprowadzonej do zbiornika.

Przyjmując przypadek adiabatyczny można z równania (2) obliczyć temperaturę maksymalną

$$c_{pss} (t_{s1} - t_{max}) = (X_{max} - X_{s1}) (r_0 - c_w t_{max}) + c_{pp} (X_{max} t_{max} - X_{s1} t_{s1}), \quad (3)$$

gdzie:

- $c_{pss}$  - ciepło właściwe suchych spalin,

$o_{pp}$  - ciepło właściwe pary wodnej,

$r_o$  - ciepło parowania w temperaturze  $0^{\circ}\text{C}$ .

Stopień zawilżenia, odpowiadający temperaturze maksymalnej, określa wyrażenie

$$X_{\max} = \frac{M_p}{M_{ss}} \frac{p_s (t_{\max}^*)}{p - p_s (t_{\max}^*)}, \quad (4)$$

gdzie:

$M_p$  - masa drobinowa pary wodnej,

$M_{ss}$  - masa drobinowa suchych spalin.

Układ równań (3) i (4) określa temperaturę maksymalną. Sapiński i Wójcicki [4] wyznaczyli tę temperaturę dla różnych ciśnień w zbiorniku wody.

### 3. Charakterystyka badanego palnika

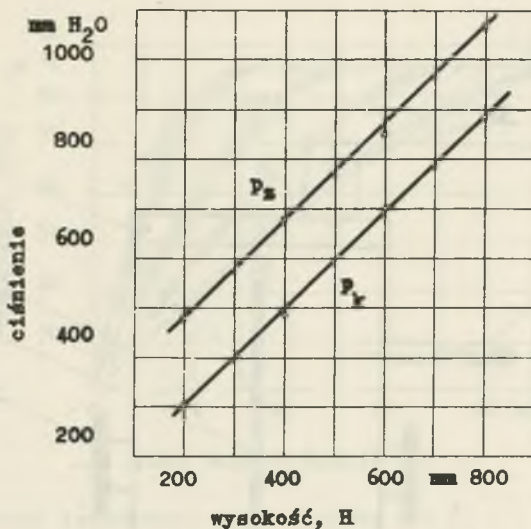
Badany palnik [1] został opracowany dla ciągłej pracy przy pełnym zanurzeniu. Komora spalania wyłożona była materiałem ogniotrwałym, co zmniejszało straty ciepła do otoczenia oraz zasadniczo zwiększało stabilność płomienia.

Zapłon palnika realizowany za pomocą typowej świecy samoodrowej był przystosowany do zapalania pod słupem wody. Ponieważ przed zapaleniem palnik jest zalany wodą przeto zapłon wymagał dokonania następujących czynności: przedmuchiwanie komory spalania dużym strumieniem powietrza, zmniejszenia stężenia powietrza do strumienia niezbędnego przy istniejącym wypełnieniu zbiornika wodą, włączenia urządzenia zapłonowego, otwarcia przepływu gazu.

Po rozgrzaniu komory spalania zwiększa się stopniowo strumień gazu i powietrza oraz wypełnia się zbiornik do wymaganej wysokości słupa wody.

Bardzo istotne dla działania palnika są wymiary otworów wypływowych spalin. Dla poprawnego działania palnika należy dobrać powierzchnię tych otworów oraz ich wielkość. Znajomość całkowitej powierzchni otworów nie jest wielkością wystarczającą, gdyż przy dużej średnicy otworów woda ma tendencję do zalwania komory spalania, zaś przy zbyt małej średnicy zwiększają się opory przepływu spalin.

Charakterystykę przepływową palnika przy spalaniu strumienia gazu ziemnego  $\dot{V}_n = 1,0 \text{ m}^3/\text{h}$  w funkcji wysokości słupa wody przedstawiono na rysunku 1, na którym  $p_n$  oznacza ciśnienie powietrza przed palnikiem, zaś  $p_k$  ciśnienie w komorze spalania palnika.



Rys. 1. Charakterystyka przepływu palnika

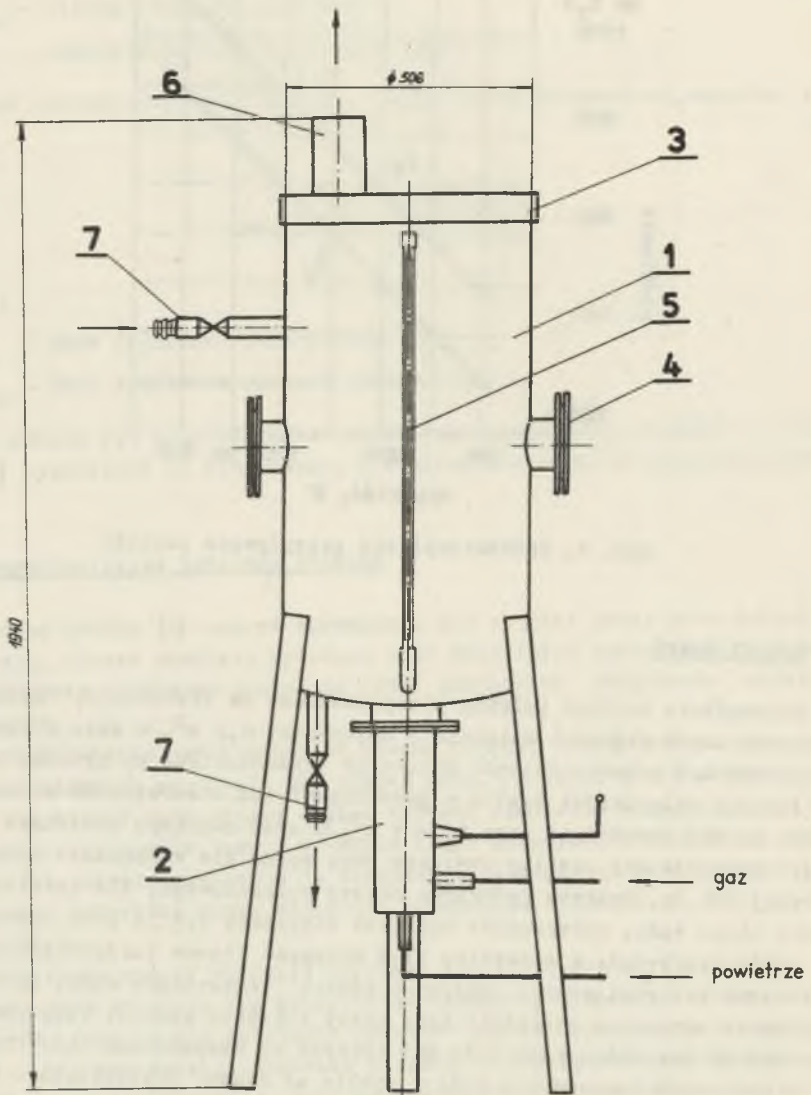
#### 4. Wyniki badań

Szczególne badania palnika przeprowadzono na stanowisku, którego zasadniczą część stanowił zbiornik o pojemności  $0,2 \text{ m}^3$ . W dnie zbiornika zamontowany był palnik. Schemat zbiornika przedstawiono na rysunku 2.

Pomiary wilgotności spalin w przestrzeni nad zwierciadłem oleczy wykazały, że dla strumienia gazu  $\dot{V}_g = 1 \text{ m}^3/\text{h}$  oraz nadmiaru powietrza  $\lambda = 1.1 - 1.35$  uzyskuje się spaliny nasycone parą wodną dla wysokości słupa wody powyżej  $150 \text{ mm}$ . Podczas krótkiego okresu rozruchowego, dla dowolnej wysokości słupa wody, obserwowano brak nasyceń spalin parą wodną.

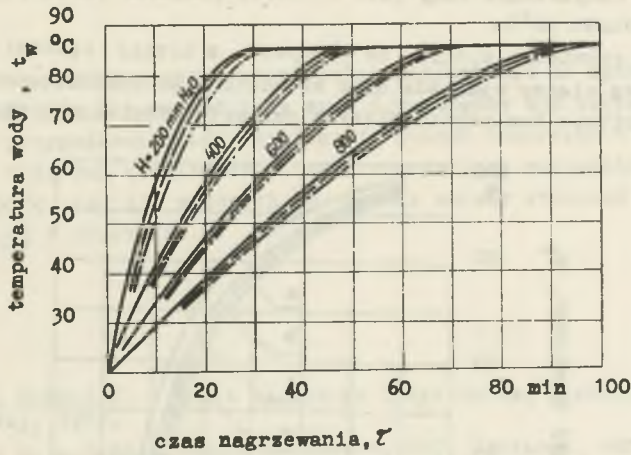
Temperatura wody w zbiorniku była mierzona trzema termometrami. W trakcie badań nie stwierdzono lokalnych różnic temperatury wody, co było wynikiem intensywnego mieszania wody przez strumień spalin. Temperatura spalin nad zwierciadłem wody była zaś większa od temperatury wody o około  $1^\circ\text{C}$ . Zależność temperatury wody i spalin od czasu przedstawia tabela 2 dla strumienia gazu  $\dot{V}_g = 1 \text{ m}^3/\text{h}$ , nadmiaru powietrza  $\lambda = 1.1$  oraz trzech wysokości słupa wody  $H = 200, 400, 800 \text{ mm}$ .

Wpływ zawartości  $\lambda$  na proces grzania wody demonstruje rysunek 3. Czas nagrzewania wody jest nieznacznie dłuższy przy większych wartościach  $\lambda$  głównie ze względu na obniżenie temperatury spalin na wypływie z komory spalania.



Rys. 2. Schemat zbiornika do ogrzewania wody

1 - płaszcz zbiornika, 2 - palnik, 3 - pokrywa, 4 - wziernik, 5 - wodowskaz, 6 - otwór wylotowy spalin, 7 - króciec dolotowy i wylotowy wody



Rys. 3. Zależność temperatury wody od czasu dla  $\dot{V}_g = 1 \text{ m}^3/\text{h}$  oraz  $\lambda = 1.1$  (—),  $\lambda = 1.2$  (---),  $\lambda = 1.35$  (-·-·-)

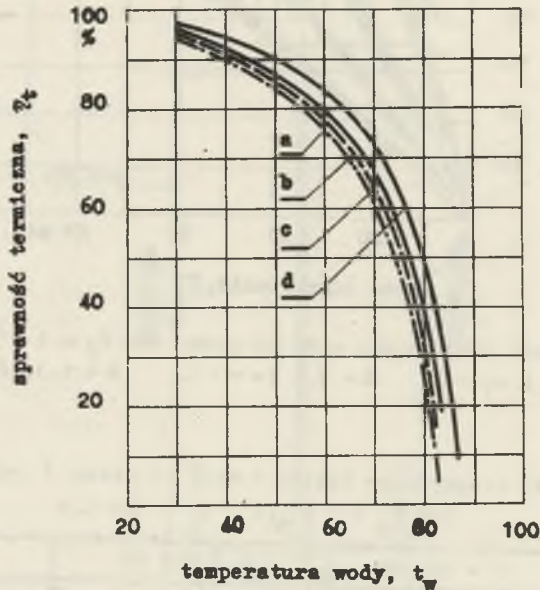
Tabela 2

Zależność temperatury spalin i wody od czasu  $\tau$  nagrzewania dla  $\dot{V}_g = 1 \text{ m}^3/\text{h}$  i  $\lambda = 1.1$

$\tau$ min.	H = 200 mm		H = 400 mm		H = 800 mm	
	$t_w$ °C	$t_s$ °C	$t_w$ °C	$t_s$ °C	$t_w$ °C	$t_s$ °C
0	20	20	20	20	20	20
5	39,5	40	31	31,5	24	25
10	58	59	41,5	42	28	29
15	70,5	72	51	52	34	35
20	81	82	60	61	38	39,5
25	85,5	86	67,5	69	43	44
30			73,5	74	48	49,5
35			78	79	52	53
40			83	84	57	58
45			86	86	60,5	62
50			86	87	65	66
60					72	73
70					77	79
80					82,5	83
90					86	86
95					86	87

Końcowa temperatura wody jest w czasie pomiarów równa temperaturze maksymalnej około  $86^{\circ}\text{C}$ .

Analiza chemiczna spalin na wypływie z komory spalania oraz ponad zwierciadłem cieczy wykazała brak składników palnych. Proces spalania przebiegał stabilnie bez znaczniejszych pulsacji ciśnienia w komorze spalania.



Rys. 4. Sprawność termiczna  $\eta_t$  ogrzewania wody jako funkcja temperatury wody,  
 a)  $\lambda = 1.1$ , b)  $\lambda = 1.2$ , c)  $\lambda = 1.35$ , d) krzywa teoretyczna dla  $\lambda = 1.15$  i gazu świetlnego [4]

Sprawność termiczna  $\eta_t$  urządzeń do grzania strumienia  $\dot{m}_w$  wody (zbiornik + palnik) opalanego strumieniem gazu  $\dot{m}_g$  o wartości opałowej  $(MW_d)_g$  określona jest zależnością

$$\eta_t = \frac{\dot{Q}_{ut}}{E_d} = \frac{\dot{m}_w \Delta i_w}{\dot{m}_g (MW_d)_g} \quad (5)$$

Sprawność termiczna grzania otrzymana w wyniku eksperymentów z gazem ziemnym została przedstawiona na rysunku 4 jako funkcja temperatury wody w zbiorniku oraz trzech wartości  $\lambda$ . Ten sam wykres demonstruje również krzywą teoretyczną uzyskaną przez Sapińskiego i Wójcickiego [4] dla gazu świetlnego.



## 5. Wnioski

Badany palnik zanurzeniowy wykazał pełną przydatność do ogrzewania kąpieli wodnej. Wydaje się uzasadnione sądzić, że mógłby być zastosowany również w takich przypadkach, które wykluczają palnik zanurzony w kąpieli.

Ogrzewanie wody pod ciśnieniem atmosferycznym jest racjonalne do temperatury ok. 60°C, zaś dla wyższych temperatur należy stosować podwyższone ciśnienie [4] w zbiorniku.

## LITERATURA

- [1] Drózd R., Malara J. - Praca dyplomowa inżynierska, Instytut Energetyki Gazowej, 1973.
- [2] Oohęduszek S. - Termodynamika stosowana, WNT, Warszawa, 1970.
- [3] Piero L.S., 1 in. - Theory and Practice of Gas Combustion in Glass Melting Furnaces, 11-th International Gas Conference, Moscow, 1970.
- [4] Sapiński A., Wójcicki S. - Bezpośrednie ogrzewanie wody palnikami nurkowymi w zbiornikach ciśnieniowych, Arch. Proc. Spal., 1, 1973, 13.
- [5] Sosnin N. - Gazowyje kontaktnyje wodonagriewatieli, Moskwa, 1967.

## ГОРЕЛКА ПОГРУЖЕНИЯ, РАСПОЛОЖЕННАЯ НА ДНИЩЕ СОСУДА

### Р е з ю м е

Представлена концепция горелки погружения, расположенной на днище резервуара, а также результаты исследований. Указано на возможность привода горелки в действие под зеркалом воды. Во время исследований сжигался природный газ на глубине до 800 мм под водой. Результаты экспериментов приведены графически в виде зависимости к.п.д. от температуры воды в резервуаре для трёх значений избытков воздуха.

## THE SUBMERGED BURNER SITUATED IN THE BOTTOM OF A TANK

### S u m m a r y

In this paper the idea of a submerged burner, situated under the bottom of the tank for heating of liquids, is presented, as well as results of experiments. The possibility of starting under the liquid surface has been demonstrated. The natural gas has been burned and water level up to 800 mm has been applied during the experiments. The efficiency of heating as a function of water temperature for three air gas ratios was presented in the form of a graph.