



**AGH**

**AKADEMIA GÓRNICZO – HUTNICZA**

**IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

WYDZIAŁ INŻYNIERII METALI I INFORMATYKI PRZEMYSŁOWEJ

**KATEDRA TECHNIKI CIEPLNEJ I OCHRONY ŚRODOWISKA**

**INSTRUKCJE DO ĆWICZEŃ LABORATORYJNYCH:  
„TECHNIKA PROCESÓW SPALANIA”**

**KRAKÓW 2011**

## SPIS TREŚCI

1. SPALANIE KINETYCZNE .....	3
2. WYZNACZENIE NORMALNEJ PRĘDKOŚCI SPALANIA GAZU .....	6
3. BADANIE WPŁYWU ŚREDNICY PALNIKA NA NORMALNĄ PRĘDKOŚĆ SPALANIA.....	9
4. BADANIE WPŁYWU TEMPERATURY MIESZANKI NA NORMALNĄ PRĘDKOŚĆ SPALANIA.....	14
5. SPALANIE DYFUZYJNE.....	18
6. POMIAR WSPÓŁCZYNNIKA WYPŁYWU Z DYSZY .....	22
7. ZAKRES MATERIAŁU DO ĆWICZEŃ.....	26
8. LITERATURA .....	26

# ĆWICZENIE NR 1

## SPALANIE KINETYCZNE

### 1. Cel ćwiczenia

Wizualna ocena płomienia kinetycznego przy różnych współczynnikach nadmiaru powietrza.

### 2. Stanowisko pomiarowe

Stanowisko pomiarowe składa się z:

- palnika kinetycznego o średnicy dyszy  $d = 12 \text{ mm}$
- rurociągów doprowadzających gaz i powietrze
- wentylatora
- autotransformatora
- aparatury pomiarowej

### 3. Wykonanie ćwiczenia

#### Badanie przeskoku płomienia

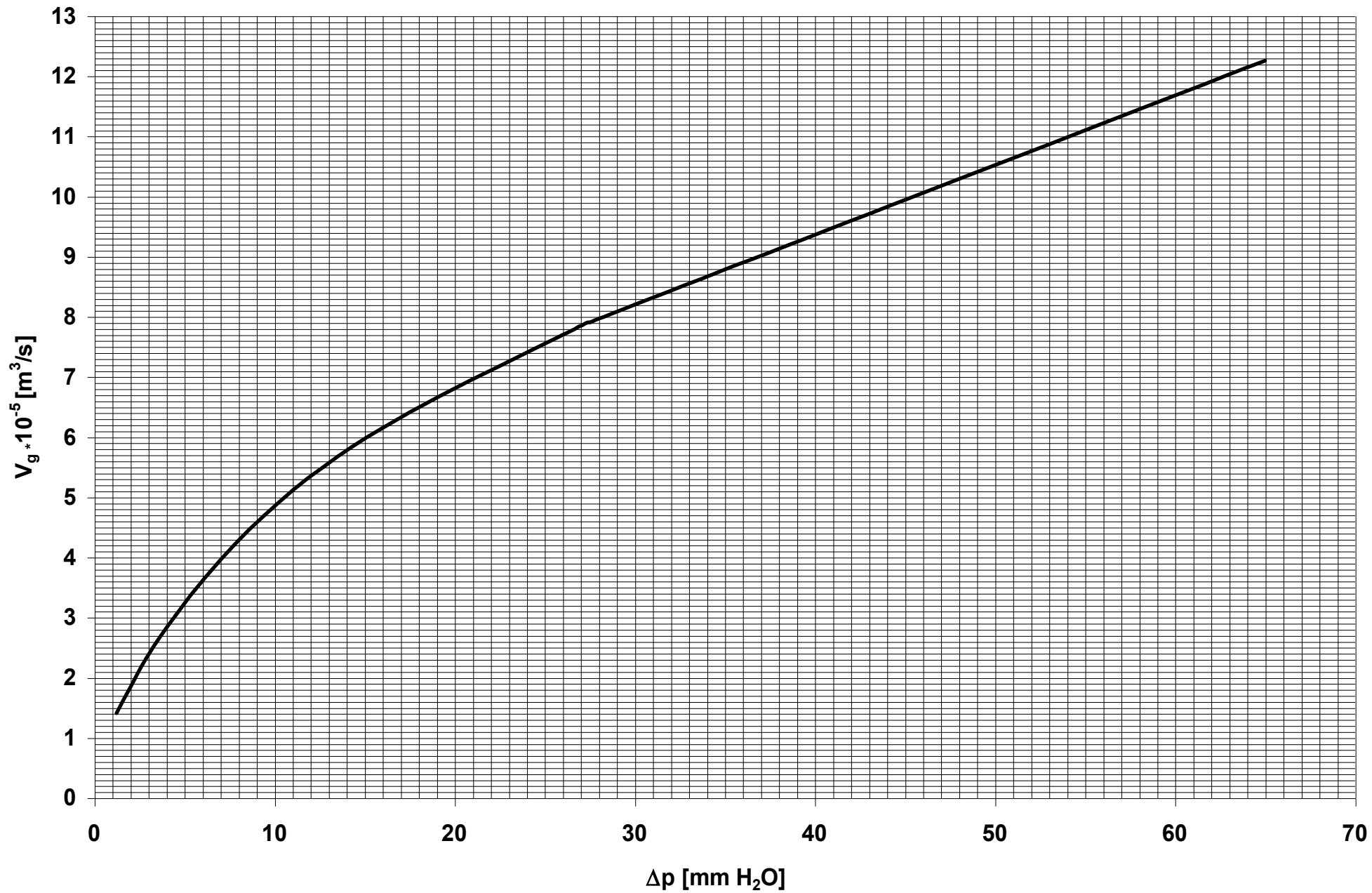
- otworzyć przepływ gazu i zapalić u wylotu palnika
- nastawić przepływ gazu tak, aby ciśnienie różnicowe przepływomierza wynosiło ok.  $2 \text{ mm H}_2\text{O}$
- zwiększać stopniowo strumień powietrza zaworem regulującym do momentu **przeskoku płomienia** do palnika, następnie odciąć zaworem dopływ gazu, odczytać wskazania ciśnienia statycznego  $p$  i ciśnienie różnicowego  $\Delta p$  powietrza, przedmuchać palnik powietrzem, strumień objętości powietrza odczytać z charakterystyki reometru powietrza
- powtórzyć powyższe czynności zwiększając strumień gazu doprowadzanego do palnika tak, aby ciśnienie różnicowe przepływomierza zwiększyło się ok.  $2 \text{ mm H}_2\text{O}$

#### Badanie odrywania płomienia

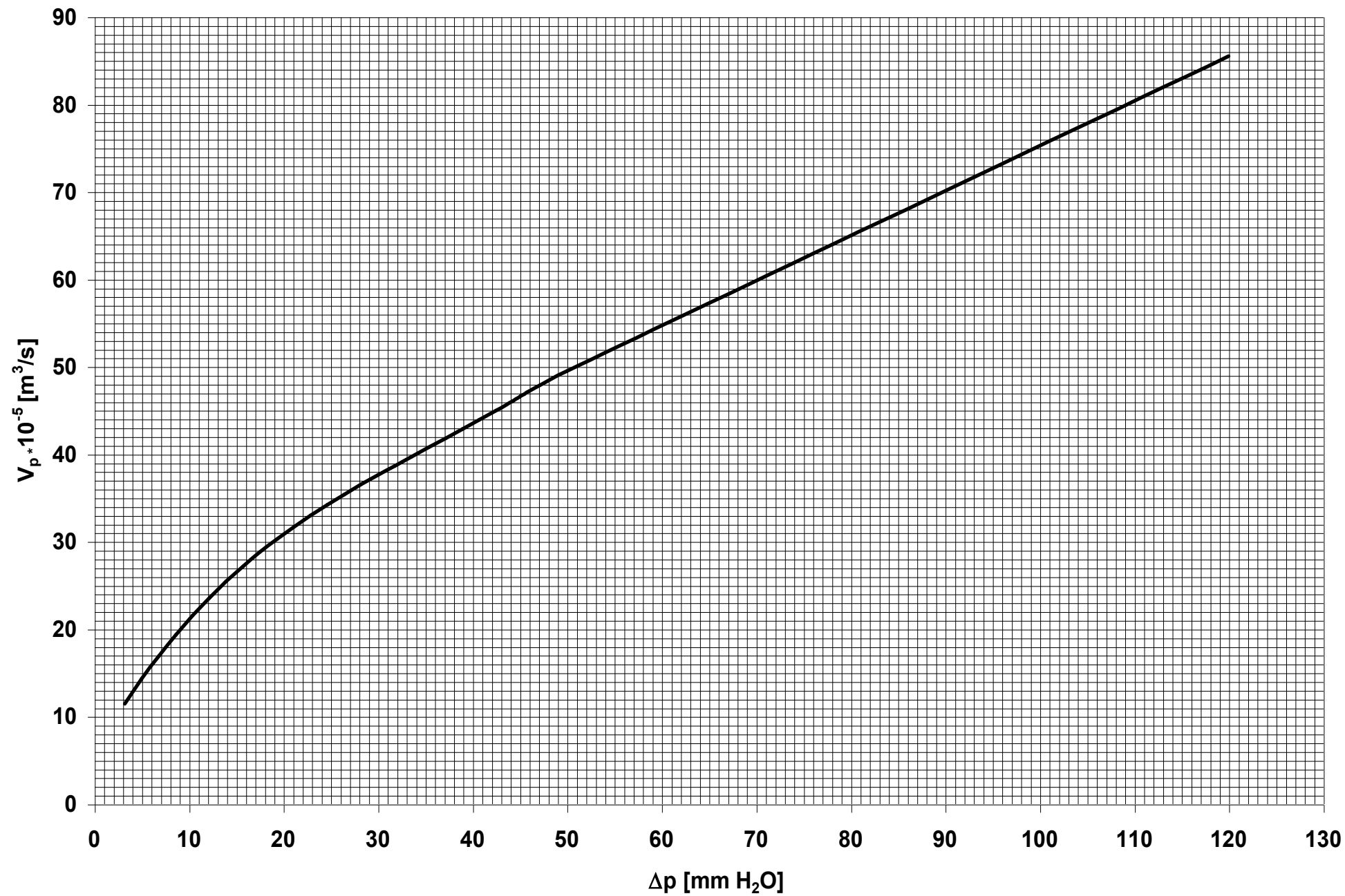
- otworzyć przepływ gazu i zapalić u wylotu palnika
- nastawić przepływ gazu tak, aby ciśnienie różnicowe przepływomierza wynosiło ok.  $15 \text{ mm H}_2\text{O}$
- zaworem regulującym zwiększać stopniowo strumień powietrza dopływający do palnika do momentu **oderwania płomienia**, następnie odciąć zaworem dopływ gazu i odczytać wskazania ciśnienia statycznego  $p$  i ciśnienie różnicowego  $\Delta p$  dla powietrza, przedmuchać palnik powietrzem, strumień objętości powietrza odczytać z charakterystyki reometru powietrza
- powtórzyć powyższe czynności zwiększając strumień gazu doprowadzanego do palnika tak, aby ciśnienie różnicowe przepływomierza zwiększyło się ok.  $15 \text{ mm H}_2\text{O}$

### 4. Sprawozdanie powinno zawierać

- cel ćwiczenia
- schemat stanowiska pomiarowego
- zestawienie wyników pomiarów
- obliczenia stosunku nadmiaru powietrza spalania przyjmując następujący skład chemiczny gazu ziemnego:  
 $\text{CH}_4 = 98\%$ ,  $\text{CO}_2 = 0,5\%$ ,  $\text{O}_2 = 0,5\%$ ,  $\text{N}_2 = 1\%$
- wykres stabilności płomienia
- opis płomienia kinetycznego w zależności od stosunku nadmiaru powietrza
- opis przeskoku i odrywania płomienia
- uwagi i wnioski



Wykres 1.1 Charakterystyka reometru gazu



Wykres 1.2 Charakterystyka reometru powietrza

## ĆWICZENIE NR 2

### WYZNACZENIE NORMALNEJ PRĘDKOŚCI SPALANIA GAZU

#### 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie normalnej prędkości spalania gazu ziemnego z wykorzystaniem palnika Otto.

#### 2. Stanowisko pomiarowe

Stanowisko pomiarowe składa się z:

- a) palnika Otto
- b) kalorymetru Junkersa
- c) barometru
- d) termometru

#### 3. Wykonanie ćwiczenia

- a) otworzyć przepływ gazu i zapalić u wylotu palnika
- b) nastawić przepływ gazu tak, by ciśnienie różnicowe przepływomierza wynosiło ok. 40 mm H<sub>2</sub>O
- c) regulować dopływ powietrza spalania tak, aby niebieski stożek wewnętrzny płomienia (czoło płomienia) miał wysokość na równi ze wskaźnikiem
- d) wyznaczyć za pomocą kalorymetru Junkersa ciepło spalania gazu  $Q_s$
- e) odczytać liczbę Otto na wskaźniku palnika
- f) wyznaczyć z wykresu ( $A w_n$ ) = f(liczba Otto) wartość

$$A w_n$$

gdzie:

$w_n$  – normalna prędkość spalania gazu, mm/s,

$$A = \frac{\rho_{0g}}{\rho_{0p} Q_s}$$

$\rho_{0g}$ ,  $\rho_{0p}$  - gęstość gazu i powietrza ( $p_0=101325$  Pa,  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ), kg/m<sup>3</sup>,

$Q_s$  – ciepło spalania gazu, MJ/m<sup>3</sup>

- g) obliczyć prędkość spalania gazu z zależności

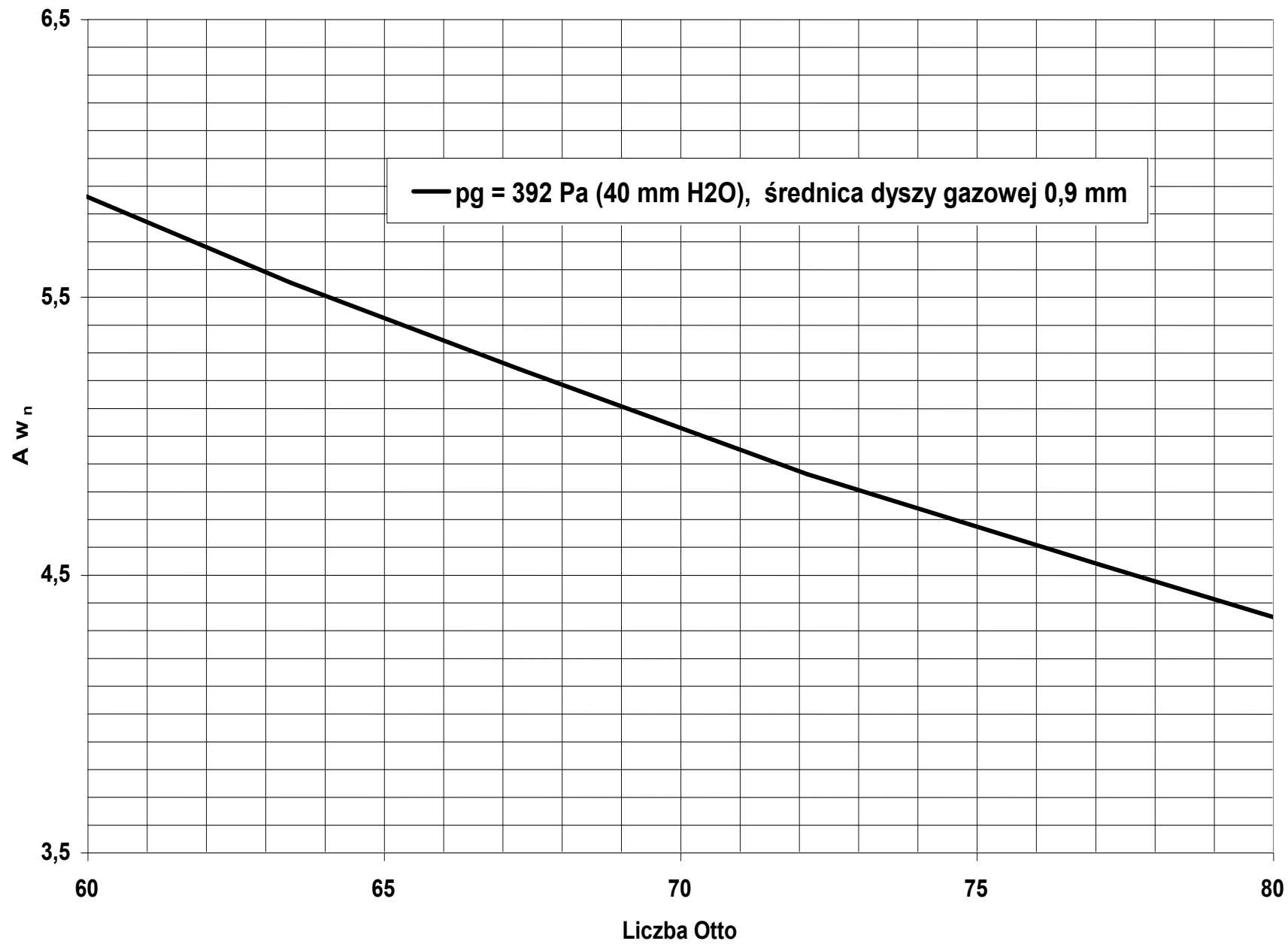
$$w_n = \frac{\text{Odczyt } A w_n}{A}, \text{ mm/s.}$$

- h) W obliczeniach należy przyjąć następujący skład gazu ziemnego:

CH<sub>4</sub> = 96%, CO<sub>2</sub> = 1%, O<sub>2</sub> = 0,5%, N<sub>2</sub> = 2,5%

#### **4. Sprawozdanie powinno zawierać**

- a) cel ćwiczenia
- b) schemat stanowiska pomiarowego
- c) zestawienie wyników pomiarów
- d) obliczenia i zestawienie wyników obliczeń
- e) uwagi i wnioski



Wykres 2.1. Wykres pomocniczy do wyznaczania normalnej prędkości spalania gazu ziemnego



# ĆWICZENIE NR 3

## BADANIE WPŁYWU ŚREDNICY PALNIKA NA NORMALNĄ PRĘDKOŚĆ SPALANIA

### 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest określenie wpływu średnicy palnika na normalną prędkość spalania gazu, ocena wizualna płomienia oraz porównanie dwóch metod wyznaczania prędkości spalania: graficznej oraz analitycznej.

### 2. Stanowisko

Stanowisko pomiarowe składa się z:

- a) palnika kinetycznego o wymiennej średnicy dyszy palnika:  
 $d = 2r = 5,2; 7,8; 8,5; 10,0; 12,2; 15,5 \text{ mm}$
- b) wentylatora z autotransformatorem
- c) układu do pomiaru strumienia objętości gazu i powietrza spalania
- d) liniału do pomiaru wysokości wewnętrznego stożka płomienia
- e) statywu z aparatem cyfrowym

### 3. Wykonanie ćwiczenia

- a) na palnik założyć dyszę  $d = 10,0 \text{ mm}$
- a) otworzyć przepływ gazu i zapalić u wylotu palnika
- b) wyregulować przepływ gazu i powietrza spalania do uzyskania wyraźnego niebieskiego wewnętrznego stożka w płomieniu (czoło płomienia)
- c) zmierzyć wysokość stożka
- d) przy tym samym strumieniu gazu i powietrza spalania zmierzyć wysokość stożka dla pozostałych dysz
- e) powtórzyć pomiary dla innych strumieni gazu i powietrza spalania

### 4. Sprawozdanie powinno zawierać

- a) cel ćwiczenia
- b) schemat stanowiska pomiarowego
- c) zestawienie wyników pomiarów
- d) wyznaczenie kąta  $\varphi$  na cyfrowym obrazie płomienia
- e) obliczenia i zestawienie wyników obliczeń
- f) wykres zależności  $w_n = f(d)$ , dla różnych wartości stosunku nadmiaru powietrza
- g) porównanie wyznaczania normalnej prędkości spalania dwoma metodami graficzną oraz analityczną.
- h) uwagi i wnioski

### 5. Uwagi do sprawozdania

W obliczeniach należy przyjąć następujący skład gazu ziemnego:

$\text{CH}_4 = 96\%$ ,  $\text{CO}_2 = 1\%$ ,  $\text{O}_2 = 0,5\%$ ,  $\text{N}_2 = 2,5\%$

## Metoda analityczna

Normalną prędkość spalania gazu należy obliczyć z zależności:

$$w_n = 100 \frac{\dot{V}_g + \dot{V}_p}{\pi r \sqrt{r^2 + h^2}}, \text{ cm/s}$$

gdzie:

$\dot{V}_g$  – strumień objętości gazu,  $\text{m}^3/\text{s}$ , ( $p_0=101325 \text{ Pa}$ ,  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ),

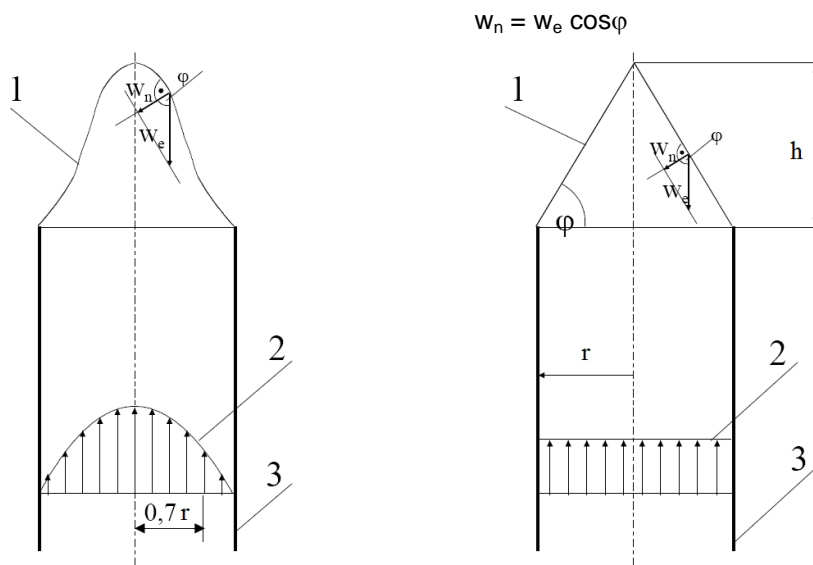
$\dot{V}_p$  – strumień objętości powietrza spalania,  $\text{m}^3/\text{s}$ , ( $p_0=101325 \text{ Pa}$ ,  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ),

$r$  – promień dyszy palnika, m,

$h$  – wysokość niebieskiego wewnętrznego stożka w płomieniu, m.

## Metoda graficzna

Normalną prędkość spalania gazu należy wyznaczyć z obrazu graficznego płomienia jako składową normalną prędkości efektywnej przemieszczania się strefy reakcji (czoła, frontu płomienia) względem przepływającej laminarnie lub nieruchomej jednorodnej mieszanki palnej w palniku typu Bunsena.



Rys.2. Schemat przekroju wewnętrznego stożka spalania w postaci rzeczywistej i uproszczonej rozkładu prędkości mieszanki palnej; 1, czoło płomienia; 2, rozkład prędkości przepływu mieszanki; 3, palnik

Kąt  $\varphi$  pomiędzy wektorem  $w_n$  i wektorem  $w_e$  ma tę samą wartość co kąt pomiędzy promieniem  $r$  i poboczną stożka  $l$  (podobieństwo trójkątów). Kąt ten mierzy się w odległości  $0,7r$  od osi palnika, gdyż w tej właśnie odległości lokalna prędkość wypływu mieszanki jest równa prędkości średniej (wynika to z parabolicznego profilu prędkości przepływu mieszanki w palniku).

Prędkość efektywną wyznaczyć w oparciu o strumienia objętościowe gazu i powietrza oraz pole przekroju poprzecznego palnika.

$$w_e = 100 \frac{\dot{V}_g + \dot{V}_p}{\pi r^2}, \text{ cm/s}$$

Normalną prędkość spalania można obliczyć ze wzoru:

$$w_n = w_e \cdot \cos \varphi = 100 \frac{\dot{V}_g + \dot{V}_p}{\pi r^2} \cdot \cos \varphi$$

gdzie:

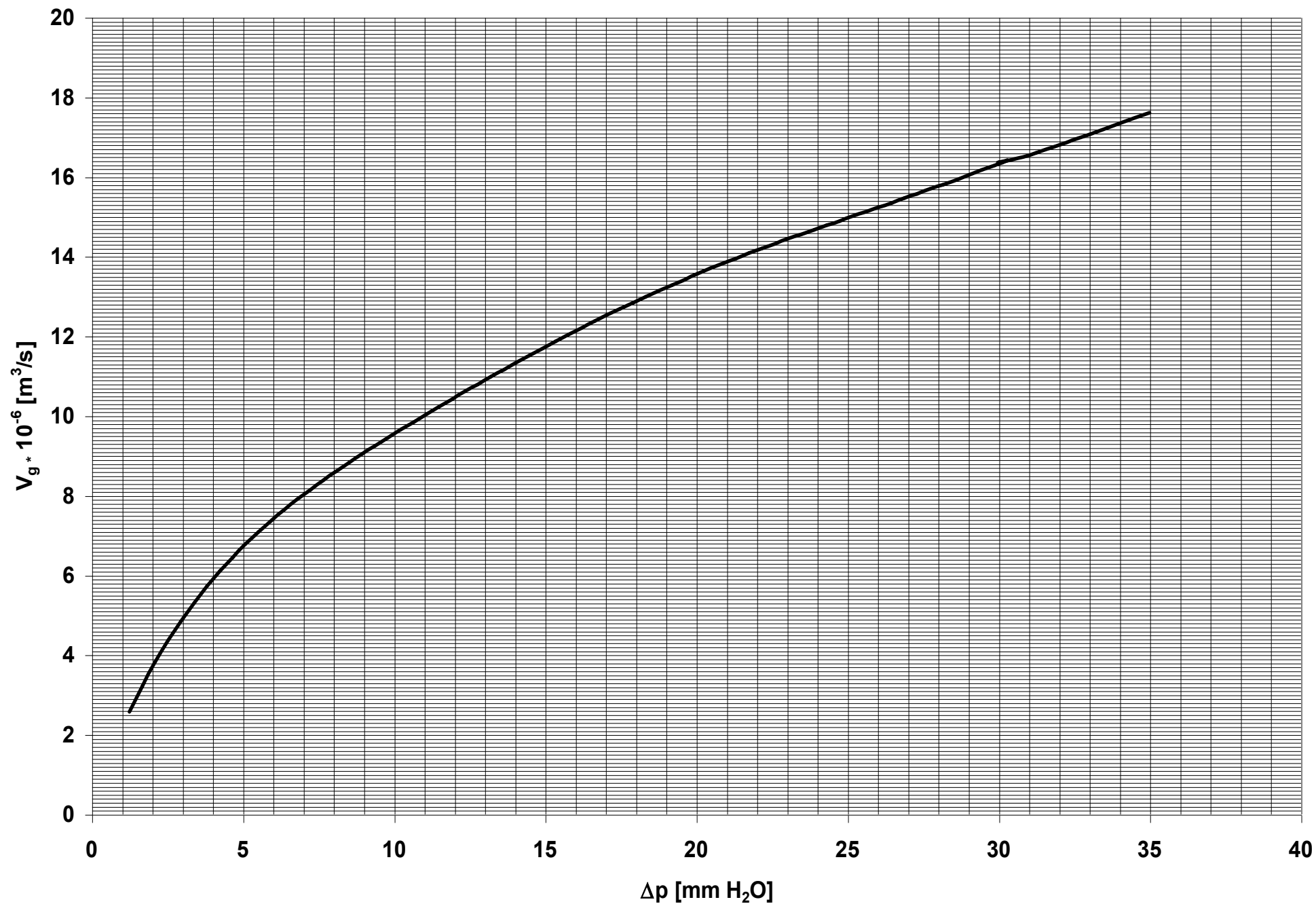
$\dot{V}_g$  – strumień objętości gazu,  $\text{m}^3/\text{s}$ , ( $p_0=101325 \text{ Pa}$ ,  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ),

$\dot{V}_p$  – strumień objętości powietrza spalania,  $\text{m}^3/\text{s}$ , ( $p_0=101325 \text{ Pa}$ ,  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ),

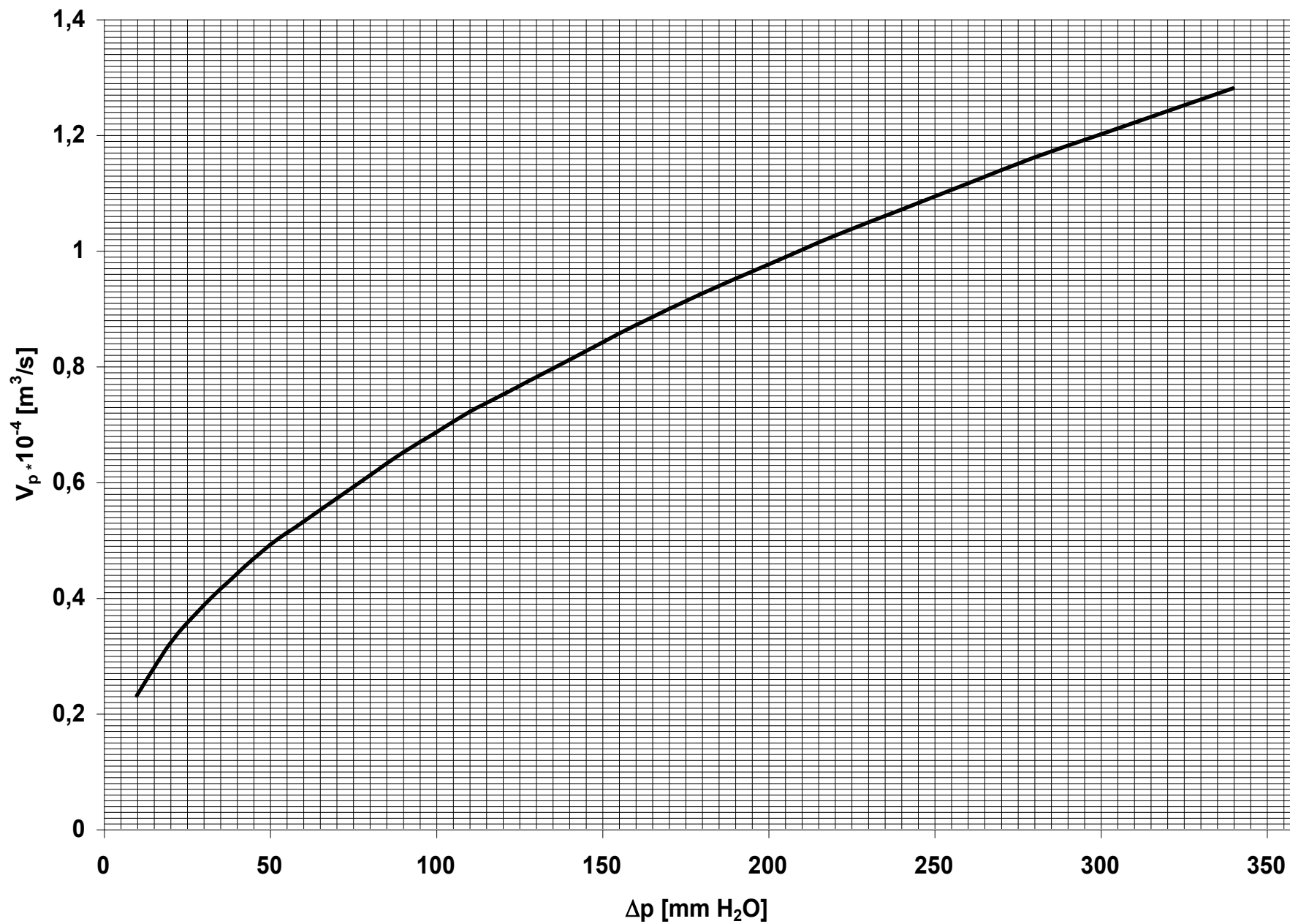
$w_e$  – normalna prędkość efektywna,

$r$  – promień dyszy palnika,  $\text{m}$ ,

$h$  – wysokość niebieskiego wewnętrznego stożka w płomieniu,  $\text{m}$ .



Wykres 3.1. Charakterystyka reometru gazu



Wykres 3.2. Charakterystyka reometru powietrza

# ĆWICZENIE NR 4

## BADANIE WPŁYWU TEMPERATURY MIESZANKI NA NORMALNĄ PRĘDKOŚĆ SPALANIA

### 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest określenie wpływu podgrzewania substratów spalania (gazu i powietrza spalania) na normalną prędkość spalania gazu.

### 2. Stanowisko

Stanowisko pomiarowe składa się z:

- a) palnika kinetycznego o średnicy dyszy  $d = 10 \text{ mm}$
- b) wentylatora
- c) podgrzewacza
- d) układu do pomiaru temperatury mieszanki gazowo–powietrznej
- e) liniału do pomiaru wysokości wewnętrznego stożka płomienia

### 3. Wykonanie ćwiczenia

- a) otworzyć przepływ gazu i zapalić u wylotu palnika
- b) wyregulować za pomocą zaworu gazowego i powietrznego przepływ gazu i powietrza spalania tak, aby wyraźny niebieski stożek wewnętrzny w płomieniu (czoło płomienia) miał wysokość około 5 cm
- c) podłączyć zasilanie podgrzewacza mieszanki
- d) przy pomocy autotransformatora zmieniać napięcie zasilające podgrzewacz
- e) przeprowadzić pomiar wysokości płomienia po każdej zmianie temperatury mieszanki o  $\Delta t = 20 \text{ K}$

### 4. Sprawozdanie powinno zawierać

- a) cel ćwiczenia
- b) schemat stanowiska pomiarowego
- c) zestawienie wyników pomiarów
- d) zestawienie wyników obliczeń
- e) wykres zależności  $w_n = f(t_m)$ , gdzie  $t_m$  - temperatura mieszanki, °C.
- f) uwagi i wnioski

### 5. Uwagi do sprawozdania

W obliczeniach należy przyjąć następujący skład gazu ziemnego:

$\text{CH}_4 = 98\%$ ,  $\text{CO}_2 = 0,5\%$ ,  $\text{O}_2 = 0,5\%$ ,  $\text{N}_2 = 1\%$

Normalną prędkość spalania gazu należy obliczyć z zależności:

$$w_n = 100 \frac{\dot{V}_g + \dot{V}_p}{\pi r \sqrt{r^2 + h^2}}, \text{ cm/s}$$

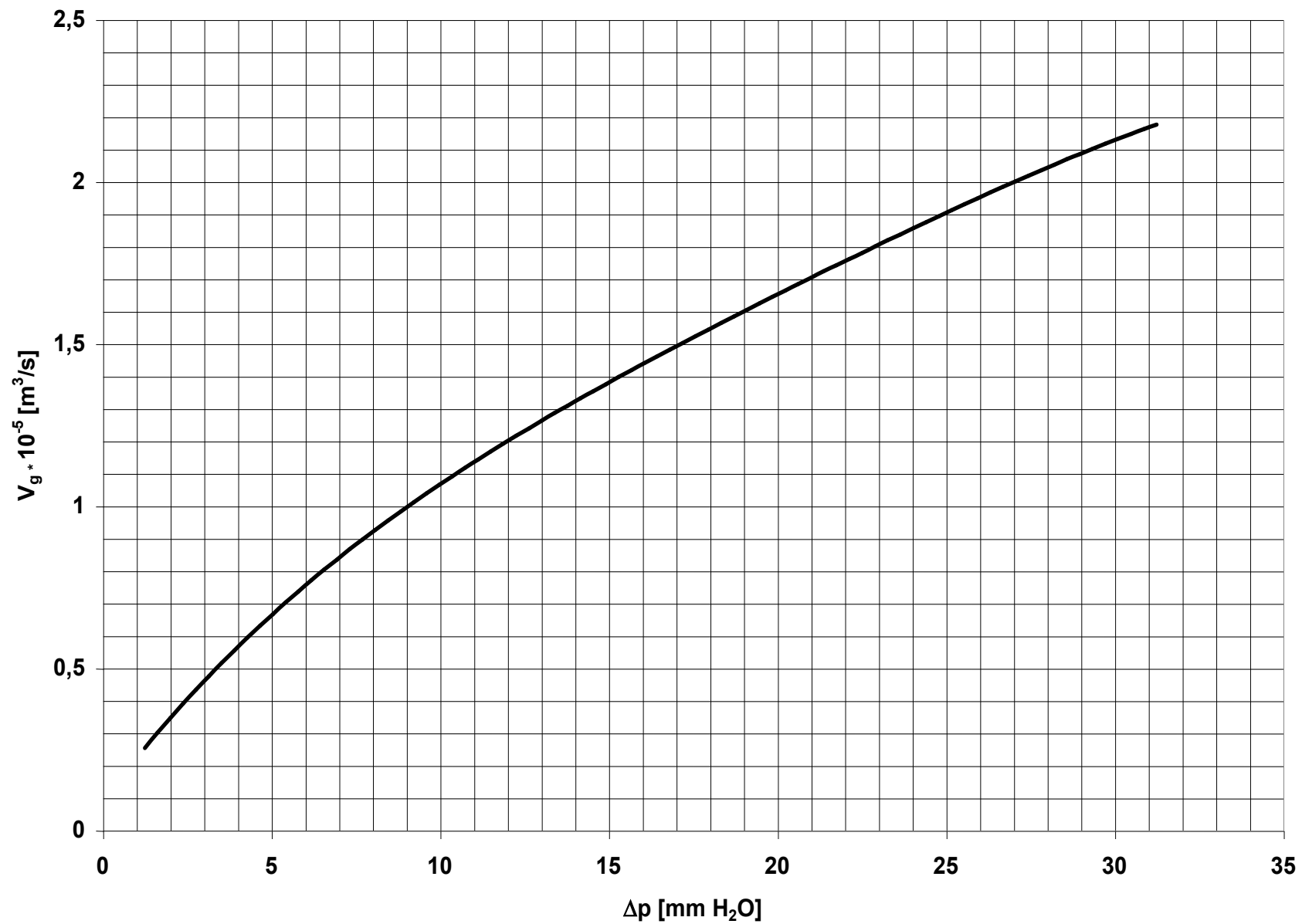
gdzie:

$\dot{V}_g$  – strumień objętości gazu, m<sup>3</sup>/s, ( $p_0=101325$  Pa,  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ),

$\dot{V}_p$  – strumień objętości powietrza spalania, m<sup>3</sup>/s, ( $p_0=101325$  Pa,  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ),

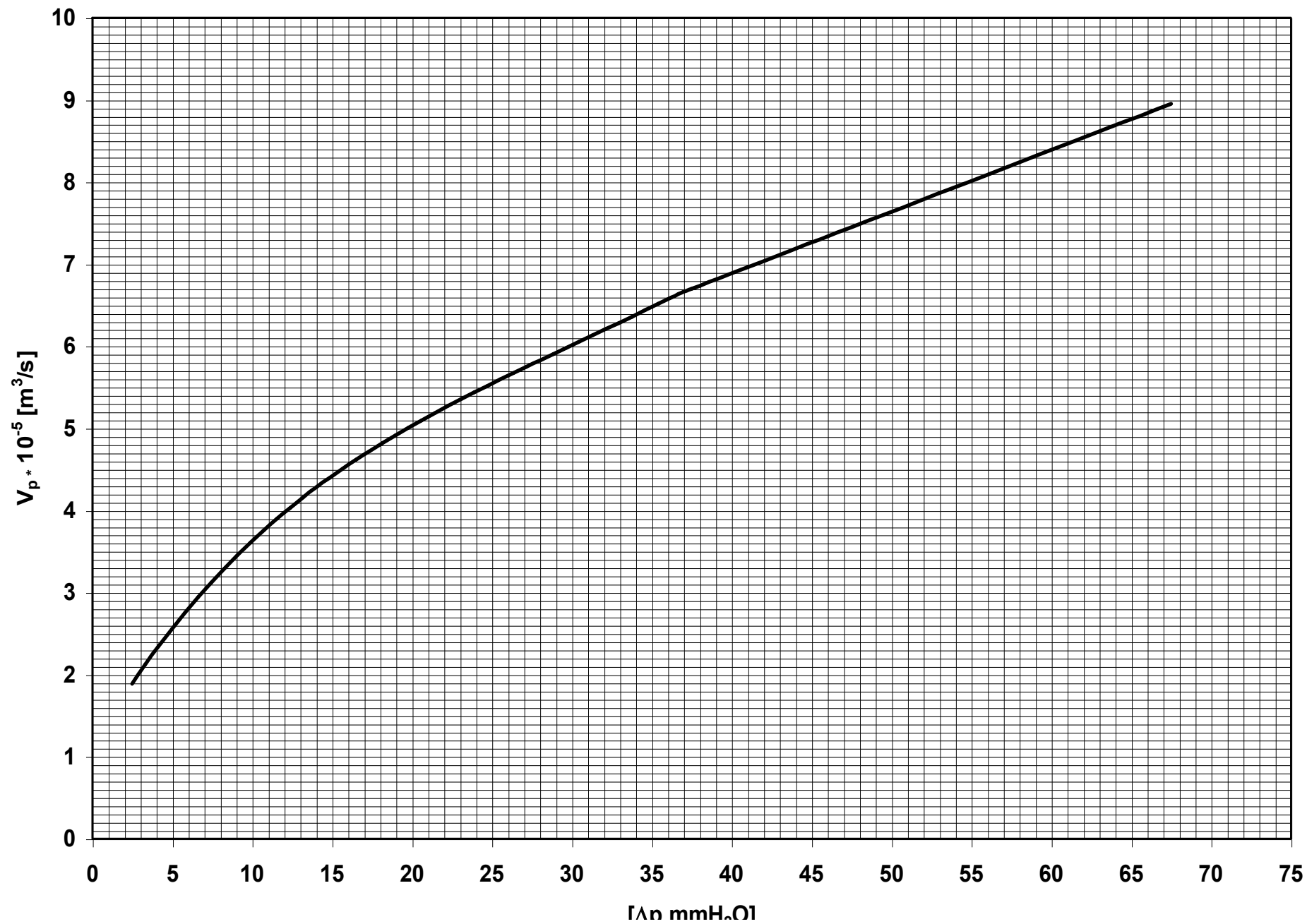
$r$  – promień dyszy palnika, m,

$h$  – wysokość niebieskiego wewnętrznego stożka w płomieniu, m.



Wykres 4.1 Charakterystyka reometru gazu





Wykres 4.2 Charakterystyka reometru gazu

# ĆWICZENIE NR 5

## SPALANIE DYFUZYJNE

### 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest badanie obszaru stabilności płomienia dyfuzyjnego oraz wizualna ocena tego płomienia przy różnych wartościach stosunku nadmiaru powietrza.

### 2. Stanowisko pomiarowe

Stanowisko pomiarowe składa się z :

- a) palnika dyfuzyjnego
- b) rurociągów doprowadzających gaz i powietrze spalania
- c) wentylatora
- d) autotransformatora
- e) aparatury do pomiaru strumienia objętości gazu i powietrza spalania

### 3. Wykonanie ćwiczenia:

- a) otworzyć przepływ gazu i zapalić u wylotu palnika, ustalić strumień gazu, odczytać wskazania ciśnienia statycznego  $p$  i ciśnienie różnicowego  $\Delta p$  gazu, a następnie odczytać strumień objętości gazu z charakterystyki reometru gazu
- b) zwiększać stopniowo strumień powietrza do palnika zaworem regulującym do momentu **oderwania** płomienia, odczytać wskazania ciśnienia statycznego  $p$  i ciśnienia różnicowego  $\Delta p$  powietrza, strumień objętości powietrza odczytać z charakterystyki reometru powietrza
- c) nie zmieniając strumienia gazu dopływającego do palnika (stałe obciążenie cieplne palnika), zwiększyć przepływ powietrza do momentu **zdmuchnięcia** płomienia, odczytać wskazania ciśnienia statycznego  $p$  i ciśnienia różnicowego  $\Delta p$  powietrza i odciąć dopływ gazu, strumień objętości powietrza odczytać z charakterystyki reometru powietrza
- d) powtórzyć pomiary dla różnych wartości strumienia gazu do wartości maksymalnej wynikających z możliwości stanowiska pomiarowego

### 4. Sprawozdanie winno zawierać :

- a) cel ćwiczenia
- b) schemat stanowiska pomiarowego
- c) zestawienie wyników pomiarów
- d) obliczenie stosunku nadmiaru powietrza  $\lambda$  dla gazu ziemnego o następującym składzie chemicznym:  $\text{CH}_4 = 98\%$ ,  $\text{CO}_2 = 0,5\%$ ,  $\text{O}_2 = 0,5\%$ ,  $\text{N}_2 = 1\%$
- e) zestawienie wyników obliczeń
- f) wykresy  $w = f(\lambda)$  dla odrywania płomienia
- g) uwagi i wnioski

## 5. Podstawowe zależności do obliczeń:

$$W = W_p + W_g$$

$$W_p = \frac{\dot{V}_p}{\pi(r_1^2 - r_2^2)}$$

$$W_g = \frac{\dot{V}_g}{\pi r_3^2}$$

gdzie:  $W_p$  - prędkość wypływu powietrza,

$W_g$  - prędkość wypływu gazu,

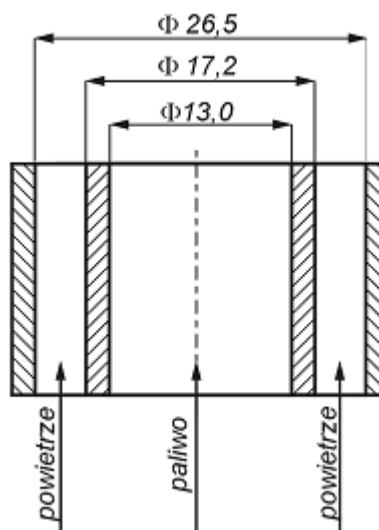
$$2r_1 = d_1 = 26,5 \text{ mm}$$

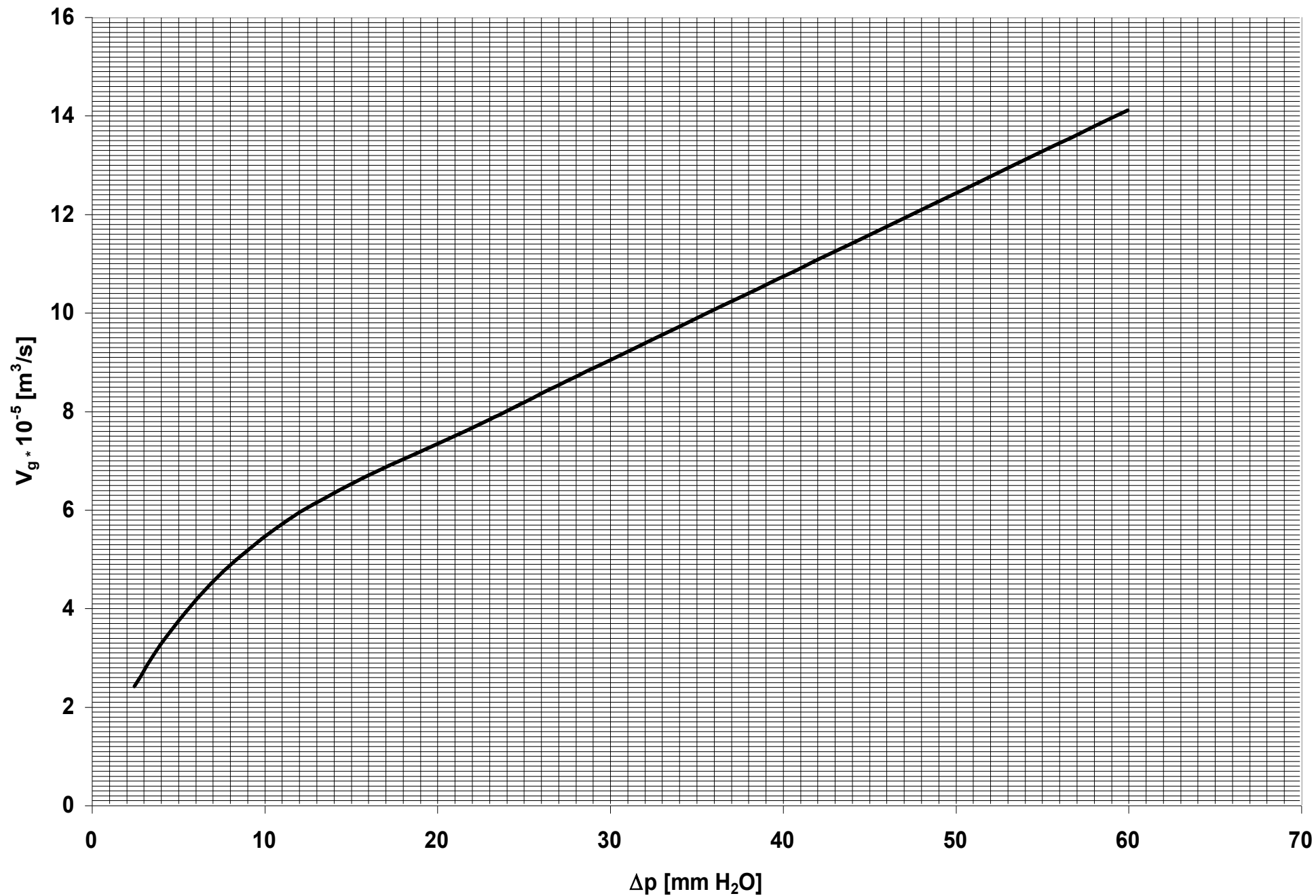
$$2r_2 = d_2 = 17,2 \text{ mm}$$

$$2r_3 = d_3 = 13 \text{ mm}$$

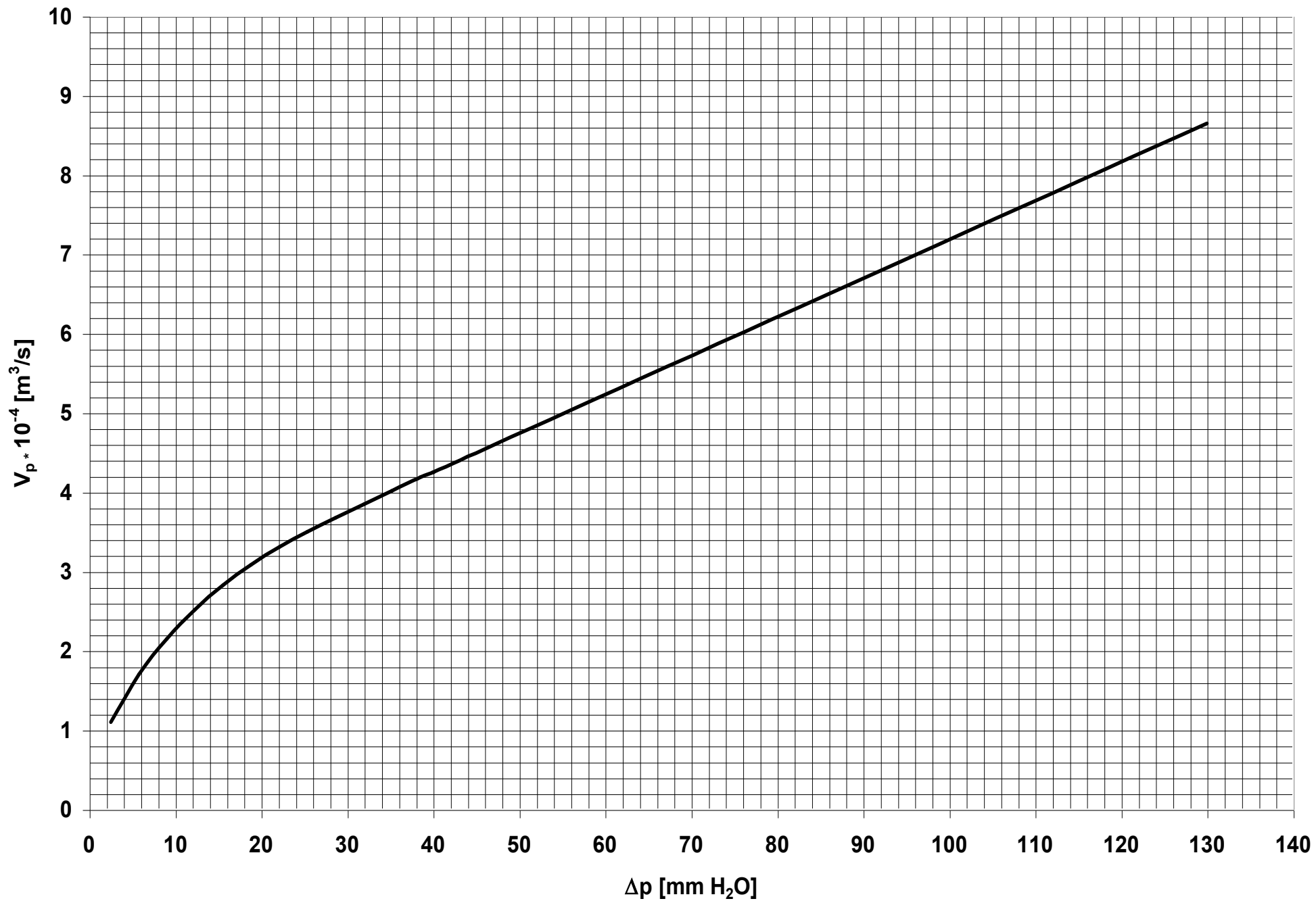
$\dot{V}_p, \dot{V}_g$  - strumień objętości powietrza i gazu

## 6. Przekrój wylotu palnika dyfuzyjnego:





Wykres 5.1 Charakterystyka reometru gazu



Wykres 5.2 Charakterystyka reometru powietrza

# ĆWICZENIE NR 6

## POMIAR WSPÓŁCZYNNIKA WYPŁYWU Z DYSZY

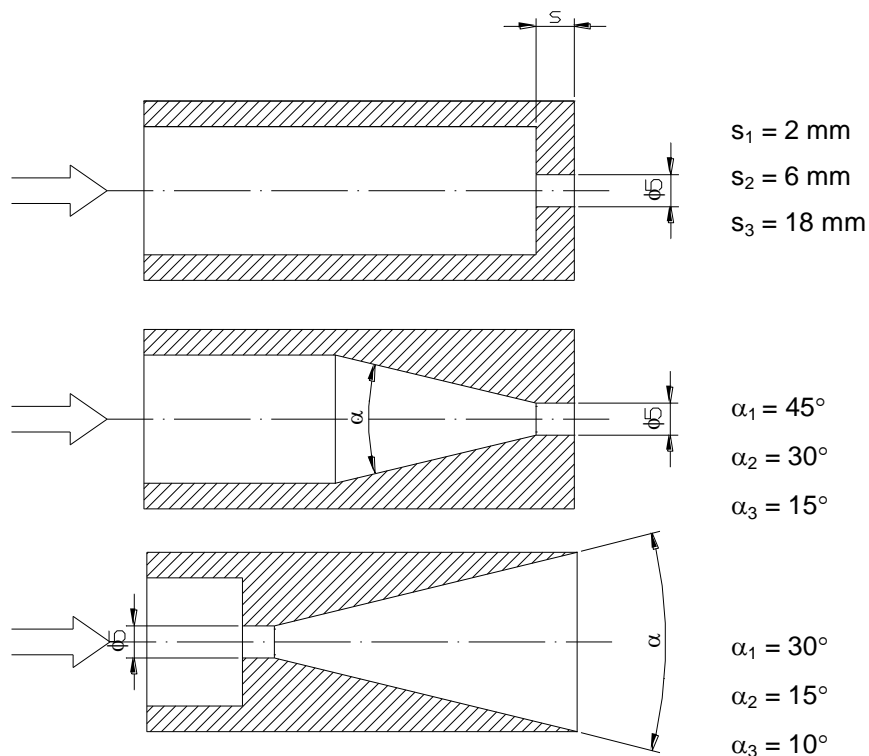
### 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie współczynnika wypływu z dyszy oraz określenie wpływu kształtu dyszy na jego wartość.

### 2. Stanowisko pomiarowe

Stanowisko pomiarowe składa się z:

- palnika
- wymiennych dysz (rys.1)
- wentylatora
- autotransformatora
- U - rurki do pomiaru ciśnienia przed dyszą
- U – rurki i zwężki do pomiaru przepływu powietrza spalania
- barometru i termometru



Rys. 1 Przekrój poprzeczny wymiennych dysz palnika

### 3. Wykonanie ćwiczenia

- z wybranej grupy dysz nałożyć dowolną na palnik
- za pomocą autotransformatora regulować napięcie zasilające wentylator, tak aby ciśnienie w rurociągu doprowadzającym powietrze do palnika wynosiło ok. 100, 200, 300 mm H<sub>2</sub>O
- odczytać wskazania ciśnienia statycznego p i ciśnienie różnicowego Δp powietrza, a następnie strumień objętości powietrza z charakterystyki reometru powietrza
- powtórzyć te czynności dla pozostałych dysz wybranej grupy
- odczytać ciśnienie barometryczne i temperaturę powietrza
- powtórzyć ćwiczenie dla pozostałych grup dysz

### 4. Sprawozdanie powinno zawierać

- cel ćwiczenia
- schemat stanowiska pomiarowego
- zestawienie wyników pomiarów
- obliczenia i zestawienie wyników obliczeń
- omówienie wpływu kształtu dyszy na wartość współczynnika wypływu oraz strumień przepływu czynnika
- uwagi i wnioski

### 5. Uwagi do sprawozdania:

Przy niskim ciśnieniu początkowym gazu wypływającego z dyszy, kiedy gęstość gazu nie ulega zmianie, teoretyczną prędkość wypływu opisuje zależność

$$w = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}, \text{ m/s}$$

gdzie:

- p<sub>1</sub> – ciśnienie gazu w przewodzie przed dyszą (absolutne), Pa,
- p<sub>2</sub> – ciśnienie otoczenia, do którego wypływa gaz (absolutne), Pa,
- ρ – gęstość gazu, kg/m<sup>3</sup>.

Strumień objętości płynu wypływającego z dyszy można obliczyć z wzoru

$$\dot{V} = \Phi F w = \Phi F \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} = \Phi \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}, \text{ m}^3/\text{s}$$

gdzie:

- F – powierzchnia przekroju dyszy, m<sup>2</sup>,
- w - prędkość przepływu płynu w przewodzie, m/s,
- d – średnica dyszy, m,
- Φ - współczynnik wypływu z dyszy.

**Uwaga:**

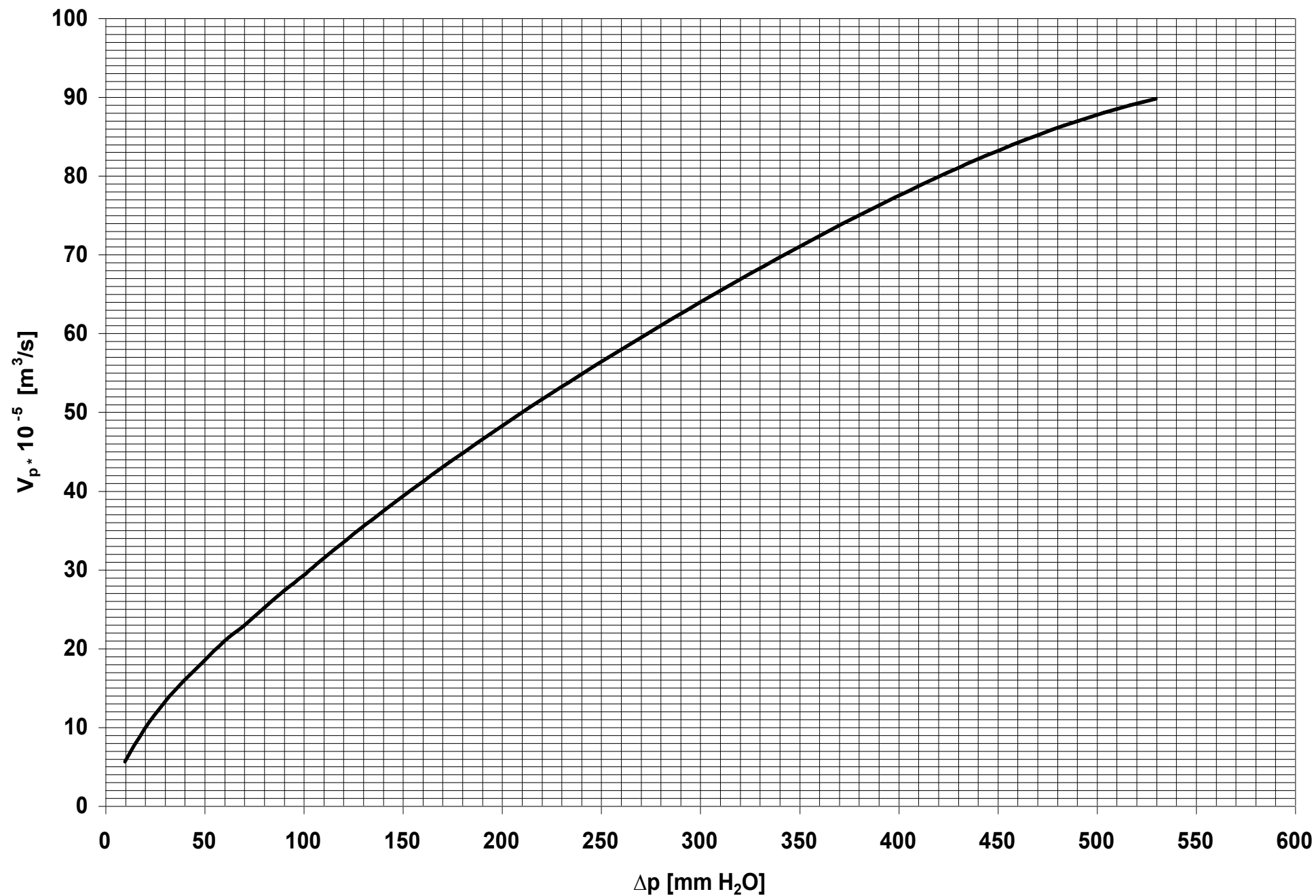
- ! Jeżeli w obliczeniach wykorzystuje się gęstość gazu podaną w warunkach rzeczywistych (temperatura i ciśnienie rzeczywiste), wówczas prędkość wypływu i strumień objętości są wartościami rzeczywistymi.
- ! Jeżeli gęstość gazu podana jest w warunkach odniesienia (temperatura  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ , ciśnienie  $p_0 = 101325$  Pa), wówczas obliczona prędkość wypływu i strumień objętości są wartościami jakie wystąpiłyby gdyby temperatura i ciśnienie gazu były identyczne jak odniesienia.

Gęstość powietrza  $\rho_0 = 1,2929 \text{ kg/m}^3$  ( $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ,  $p_0 = 101325$  Pa)

Współczynnik wypływu z dyszy można obliczyć z zależności

$$\Phi = \frac{4 \dot{V}}{\pi d^2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}}$$





Wykres 6.1. Charakterystyka reometru powietrza

# ZAKRES MATERIAŁU DO ĆWICZEŃ

## 4.1. Wiadomości podstawowe:

Jednostki stosowane w technice cieplnej. Rodzaje paliw stosowanych w przemyśle, występowanie, otrzymywanie i ich własności. Stechiometria spalania. Termodynamika gazów, powietrze wilgotne. Temperatura: spalania, zapłonu, samozapłonu. Granice palności gazów. Pomiar temperatury, pomiar strumienia objętości i masy płynów. Wypływ z dyszy.

## 4.2. Wiadomości szczegółowe:

Ćw. I i II – Spalanie kinetyczne – mieszanie, dyfuzja, zapłon, płomień, własności płomienia. Stabilizacja płomienia. Metody pomiaru i obliczeń prędkości spalania.

Ćw. III i IV – Spalanie kinetyczne i pośrednie – mieszanie, dyfuzja, zapłon, płomień. Wpływ warunków zewnętrznych na stabilizację spalania. Palniki kinetyczne oraz ich zastosowanie.

Ćw. V i VI – Spalanie dyfuzyjne – mieszanie dyfuzyjne, zapłon i płomień. Własności płomienia. Palniki dyfuzyjne i zastosowanie. Palniki dyfuzyjne.

## LITERATURA

- 1 Notatki z wykładów
- 2 Jarosiński J. :Techniki czystego spalania, WNT, Warszawa , 1996
- 3 Kordylewski W.,: Spalanie i paliwa. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2008
- 4 Nocoń J, Poznański J., Słupek S. Rywotycki M.: Technika cieplna – przykłady z techniki procesów spalania, AGH, Kraków, 2007
- 5 Petela R.: Paliwa i ich spalanie, Politechnika Śląska, Gliwice, 1978
- 6 Pomiary cieplne cz. I i II. Fodemski T.R. Warszawa, WNT 2001
- 7 Słupek S., Nocoń J., Buczek A.: Technika cieplna – Ćwiczenia obliczeniowe, AGH, Kraków,2002
- 8 Szargut J.: Termodynamika. Warszawa, WNT 2000
- 9 Wójcicki S.: Spalanie, WNT, Warszawa 1969