

## ДОДАТОК 2.А

(нормативний)

### РОЗРАХУНОК ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ ЗРАЗКА В ІМПАКТОРІ

#### 2.А.1 Електронна таблиця для розрахунку об'ємної швидкості потоку імпаکتора

Для зручності користувачів цього Міжнародного стандарту в електронному додатку надано електронну таблицю (розроблену в Microsoft Excel®) для розрахунку об'ємної швидкості потоку імпаکتора відповідно до 2.А.2. Ця електронна таблиця надається лише для ознайомлення як допоміжний засіб для розрахунків; вона не була оптимізована для друку. Представлення символів і рівнянь не збігається з тим, що використовується в тексті. Програма електронних таблиць вимагає введення наступних змінних:

- склад газу;
- робочі умови газу;
- швидкість газу.

#### 2.А.2 Параметри розрахунку

##### 2.А.2.1 Об'ємна швидкість потоку зразка

Необхідна об'ємна швидкість потоку зразка  $\dot{V}_i$  в робочих умовах розраховується за формулою (2.А.1):

$$\dot{V}_i = \frac{9\pi d_{in,i}^3 St_{50} \eta(T) N_i}{4d_{50,1}^2 C_i \rho_{0,P}} \quad (2.А.1),$$

де

- $i$  - індекс для ідентифікації фракції часток (=2,5 мкм, 10 мкм);
- $d_{in,i}$  - діаметр форсунки імпаکتора (константа);
- $St_{50}$  - число Стокса (константа);
- $\eta(T)$  - залежна від температури в'язкість газу;
- $N_i$  - кількість сопел осаджувача (константа);
- $d_{50,i}$  - діаметр часток, що відсікаються (50 % значення сепарації на сопловій пластині; константа);
- $C_i$  - фактор Каннінгема фракції часток  $i$ ;
- $\rho_{0,P}$  - питома маса часток ( $1 \text{ г/см}^3$ ).

Об'ємні швидкості потоку обох соплових пластин розраховуються окремо.

Потім розраховується середнє арифметичне обох значень за формулою (2.A.2):

$$\bar{V} = \frac{\dot{V}_{2,5 \mu\text{m}} + \dot{V}_{10 \mu\text{m}}}{2} \quad (2.A.2),$$

Об'ємну швидкість потоку зразка  $k$  за стандартних умов  $i$  для сухого газу розраховують, використовуючи усереднену об'ємну швидкість потоку  $\bar{V}$  за рівнянням (2.A.3):

$$\dot{V}_n = \bar{V} \frac{T_n (p_{\text{atm}} + p_{\text{st}})}{p_n T \left( 1 + \frac{f_n}{\rho_{n, \text{WV}}} \right)} \quad (2.A.3)$$

де

$T$  - температура газу в робочих умовах;

$T_n$  - стандартна температура;  $T_n = 273,15 \text{ K}$ ;

$p_{\text{atm}}$  - атмосферний тиск у місці вимірювання (барометричний тиск);

$p_n$  - стандартний тиск;  $p_n = 1013,25 \text{ гПа}$ ;

$p_{\text{st}}$  - це різниця між статичним тиском у перерізі вимірювання та атмосферним тиском у місці вимірювання (барометричний тиск);

$f_n$  - масова концентрація водяної пари за стандартних умов і з сухим газом;

$\rho_{n, \text{WV}}$  - густина водяної пари за стандартних умов;  $\rho_{n, \text{WV}} = 0,8038 \text{ кг/м}^3$ .

Для розрахунку об'ємних витрат за рівнянням (2.A.1) необхідно обчислити наступні параметри:

- динамічна в'язкість  $\eta(T)$  газової суміші в робочих умовах;

- фактор Каннінгема  $C_i$ , від частки часток  $i$ .

### **2.A.2.2 Залежність динамічної в'язкості газу від температури**

Для розрахунку динамічної в'язкості в умовах експлуатації необхідно визначити об'ємні частки різних компонентів газу. Потім розраховується динамічна в'язкість компонентів в робочих умовах. В'язкість газової суміші розраховується з в'язкості компонентів.

Динамічну в'язкість окремої газової складової досліджуваного газу в робочих умовах розраховують за рівнянням (2.A.4):

$$\eta_j(T) = \eta_{n,j} \sqrt{\frac{T}{T_n} \frac{1 + \frac{S_j}{T_n}}{1 + \frac{S_j}{T}}} \quad (2.A.4),$$

де

$j$  - індекс для ідентифікації окремої складової досліджуваного газу ( $j = \text{CO}_2, \text{O}_2, \text{N}_2, \text{повітря, водяна пара}$ );

$\eta_j(T)$  - динамічна в'язкість компонента  $j$  в робочих умовах;

$\eta_{n,j}$  - динамічна в'язкість компонента  $j$  при стандартній температурі  $T_n$  (константа);

$T$  - температура газу;

$T_n$  - стандартна температура;  $T_n = 273,15 \text{ К}$ ;

$S_j$  - стала Сазерленда компонента  $j$ .

Відповідні об'ємні частки  $r$  у вологих димових газах розраховуються за рівняннями (2.A.5) та (2.A.6) відповідно:

- Для  $j = \text{CO}_2, \text{O}_2, \text{N}_2$  та повітря:

$$r_j = r_{n,j} \frac{1}{1 + \frac{f_n}{\rho_{n,VW}}} \quad (2.A.5),$$

- Для  $j = \text{водяна пара}$ :

$$r_{VW} = \frac{\frac{f_n}{\rho_{n,VW}} * 1}{1 + \frac{f_n}{\rho_{n,VW}}} \quad (2.A.6),$$

де

$r_{n,j}$  - об'ємна частка компонента в сухому газі;

$f_n$  - масова концентрація водяної пари за стандартних умов та з сухим газом;

$\rho_n, WV$  - густина водяної пари за стандартних умов (константа);

Залежна від температури динамічна в'язкість газу  $\eta(T)$  в робочих умовах розраховується за формулою Рівняння (2.A.7):

$$\eta(T) = \frac{\sum_j r_j \eta_j(T) \sqrt{M_j T_{\text{crit},j}}}{\sum_j r_j \sqrt{M_j T_{\text{crit},j}}} \quad (2.A.7),$$

де

$j$  - індекс для ідентифікації окремої складової зразка газу ( $j = \text{CO}_2, \text{O}_2, \text{N}_2, \text{повітря, водяна пара}$ );

$r_j$  - об'ємна частка компонента  $j$  газової суміші;

$\eta_j(T)$  - динамічна в'язкість компонента  $j$  в робочих умовах;

$T_{\text{crit}, j}$  - критична температура компонента  $j$  (константа);

$M_j$  - молярна маса компонента  $j$  (константа).

### 2.А.2.3 Фактор Каннінгема

Розрахунок коефіцієнта Каннінгема вимагає визначення середньої довжини вільного і середньої молярної маси газу. Середня довжина вільного пробігу розраховується за формулою (2.А.8):

$$\lambda = 2 \frac{\eta(T)}{p} \sqrt{\frac{\pi RT}{8M}} \quad (2.А.8)$$

де

$\eta(T)$  - залежна від температури в'язкість газу;

$p$  - абсолютний тиск газу;

$T$  - температура газу;

$M$  - середня молярна маса газової суміші;

$R$  - газова стала.

Середню молярну масу  $M$  досліджуваного газу розраховують за рівнянням (2.А.9):

$$\underline{M} = \sum_{\square} \square r_j M_j \quad (2.А.9),$$

де

$j$  - індекс для ідентифікації окремої складової газу ( $j = \text{CO}_2, \text{O}_2, \text{N}_2, \text{повітря, водяна пара}$ );

$M$  - молярна маса компонента  $j$ ;

$r_j$  - об'ємна частка компонента.

Коефіцієнт Каннінгема  $C_i$  для фракції часток  $i$  розраховується за формулою (2.А.10):

$$C_i = 1 + \frac{2\lambda}{d_{50,i}} \left[ 1,23 + 0,41 \exp \left( -0,88 \frac{d_{50,i}}{2\lambda} \right) \right] \quad (2.А.10),$$

де

$i$  - індекс для ідентифікації фракції часток ( $i = 2,5$  мкм,  $10$  мкм);

$\lambda$  - середня довжина вільного пробігу;

$d_{50,i}$  - діаметр відсікання фракції часток.

#### **2.A.2.4 Діаметр вхідної форсунки**

Діаметр  $d_{\text{nozzle}}$  вхідної форсунки розраховується на основі необхідного об'ємного потоку проби та швидкості димових газів у точці відбору проб за рівнянням (2.A.11):

$$d_{\text{nozzle}} = \sqrt{\frac{4\dot{V}}{\pi v_{fg}}} \quad (2.A.11),$$

де

$\dot{V}$  - об'ємна витрата проби в робочих умовах;

$v_{fg}$  - швидкість димових газів у точці відбору проби.

#### **2.A.2.5 Швидкість газу в форсунках імпактора**

Швидкість газу в форсунках пластин розраховується за рівнянням (2.A.12):

$$v_{in,i} = \frac{4V}{N_i \pi d_{in,i}^2} \quad (2.A.12),$$

де

$\dot{V}$  - об'ємна витрата зразка в робочих умовах;

$i$  - індекс для ідентифікації фракції часток ( $i = 2,5$  мкм,  $10$  мкм);

$v_{in,i}$  - швидкість газу в форсунках осаджувача соплової тарілки  $i$ ;

$N_i$  - кількість ударних сопел у сопловій пластині  $i$  (константа);

$d_{in,i}$  - діаметр сопел ударника в сопловій пластині  $i$  (константа).

#### **2.A.2.6 Числа Рейнольдса**

Числа Рейнольдса  $Re$  обчислюються за формулою (2.A.13):

$$Re_i = \frac{v_{in,i} d_{in,i} \rho_{p,t,h}}{\eta(T)} \quad (2.A.12),$$

де

$i_{n,i}$  - індекс ідентифікації фракції часток ( $i = 2,5 \text{ мкм}, 10 \text{ мкм}$ );

$v_{in,i}$  - швидкість газу в форсунках пластини  $i$ ;

$Re_i$  - число Рейнольдса пластини форсунки  $i$ ;

$\rho_{p,t,h}$  - густина газу в робочих умовах;

$d_{in,i}$  - діаметр сопел ударника в сопловій пластині  $i$  (константа);

$\eta(T)$  - динамічна в'язкість газу в робочих умовах.

### 2.A.2.7 Густина газу

Густина  $\rho_{p,t,h}$  вологого газу в робочих умовах розраховується за рівнянням (2.A.14):

$$\rho_{p,t,h} = \frac{(p_{atm} + p_{st})T_n(\rho_n + f_n)}{p_n T \left(1 + \frac{f_n}{\rho_{n,vw}}\right)} \quad (2.A.14),$$

Густина  $\rho_n$  сухої газової суміші розраховується за рівнянням (2.A.15):

$$\rho_n = \sum_j r_j \rho_{n,j} \quad (2.A.15),$$

де

$j$  - індекс для ідентифікації окремої складової газу ( $j = \text{CO}_2, \text{O}_2, \text{N}_2, \text{повітря}$ );

$r_j$  - об'ємна частка компонента газової суміші;

$T$  - температура в робочих умовах;

$T_n$  - стандартна температура;  $T_n = 273,15 \text{ К}$ ;

$p_{atm}$  - атмосферний тиск у місці вимірювання (барометричний тиск);

$p_{st}$  - це різниця між статичним тиском у вимірювальному перерізі та атмосферним тиском у місці вимірювання (барометричним тиском);

$p_n$  - стандартний тиск;  $p_n = 1013,25 \text{ гПа}$ ;

$f_n$  - масова концентрація водяної пари стандартних умов та з сухим газом;  $\rho_{n,vw}$  - густина водяної пари за стандартних умов;  $\rho_{n,vw} = 0,8038 \text{ кг/м}^3$ .

### 2.A.2.8 Діаметр відсічення

Діаметр відсічення  $d_{50,i}$  розраховується за формулою (2.A.16):

$$d_{50,i} = \frac{9\pi St_{50,i} \eta(T) N_i d_{i,i}^3}{4\rho_{0,P} C_i \dot{V}} \quad (2.A.16),$$

де

$i$  - індекс для ідентифікації фракції часток ( $i = 2,5$  мкм,  $10$  мкм);

$St_{50,i}$  - число Стокса, пов'язане з часткою часток  $i$ ;

$\eta(T)$  - динамічна в'язкість газу;

$N_i$  - кількість ударних форсунок у сопловій пластині  $i$ ;

$d_{in,i}$  - діаметр сопел ударника в сопловій пластині  $i$ ;

$\rho_{0,P}$  - густина одиниці маси часток ( $1$  г/см<sup>3</sup>);

$C_i$  - фактор Каннінгема фракції часток  $i$ ;

$\dot{V}$  - об'ємна витрата через ударний елемент в робочих умовах.

### 2.A.2.9 Константи

Таблиця 2.A.1 - Константи, необхідні для розрахунків

Константа	Позначка	Значення	Одиниця вимірювання
Константа газу	R	8,314 51	Дж/(моль·К)
Стандартна температура	Tn	273,15	К
Стандартний тиск	Pn	1 013,25	гПа
Густина CO <sub>2</sub> за стандартних умов	$\rho_{n,CO_2}$	1,977	кг/м <sup>3</sup>
Густина O <sub>2</sub> за стандартних умов	$\rho_{n,O_2}$	1,429	кг/м <sup>3</sup>
Густина N <sub>2</sub> за стандартних умов	$\rho_{n,N_2}$	1,251	кг/м <sup>3</sup>
Густина сухого повітря	$\rho_{n,повітря}$	1,293	кг/м <sup>3</sup>
Густина водяної пари	$\rho_{WV}$	0,804	кг/м <sup>3</sup>
Щільність одиниці маси часток	$\rho_p$	1 000	кг/м <sup>3</sup>
Динамічна в'язкість CO <sub>2</sub>	$\eta_{n,CO_2}$	$1,370 \times 10^{-5}$	кг/(м·с)
Динамічна в'язкість O <sub>2</sub>	$\eta_{n,O_2}$	$1,928 \times 10^{-5}$	кг/(м·с)
Динамічна в'язкість N <sub>2</sub>	$\eta_{n,N_2}$	$1,652 \times 10^{-5}$	кг/(м·с)
Динамічна в'язкість повітря	$\eta_{n,повітря}$	$1,717 \times 10^{-5}$	кг/(м·с)
Динамічна в'язкість водяної пари	$\eta_{WV}$	$8,660 \times 10^{-6}$	кг/(м·с)
Молярна маса CO <sub>2</sub>	MCO <sub>2</sub>	44,01	г/моль
Молярна маса O <sub>2</sub>	MO <sub>2</sub>	32,00	г/моль
Молярна маса N <sub>2</sub>	MN <sub>2</sub>	28,02	г/моль
Середня молярна маса сухого повітря	Mповітря	28,97	г/моль
Молярна маса водяної пари	M <sub>WV</sub>	18,02	г/моль
Константа Сазерленда для CO <sub>2</sub>	SCO <sub>2</sub>	273	К
Константа Сазерленда для O <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	125	К
Константа Сазерленда для N <sub>2</sub>	SN <sub>2</sub>	104	К
Константа Сазерленда для повітря	Spовітря	113	К
Константа Сазерленда для водяної пари	S <sub>WV</sub>	650	К

-	$\sqrt{MT_{crit}}$ для CO <sub>2</sub>	115,7	$\sqrt{(\Gamma \cdot \text{моль}^{-1}) \cdot K}$
-	$\sqrt{MT_{crit}}$ для O <sub>2</sub>	70,4	$\sqrt{(\Gamma \cdot \text{моль}^{-1}) \cdot K}$
-	$\sqrt{MT_{crit}}$ для N <sub>2</sub>	59,5	$\sqrt{(\Gamma \cdot \text{моль}^{-1}) \cdot K}$
-	$\sqrt{MT_{crit}}$ (для повітря)	61,9	$\sqrt{(\Gamma \cdot \text{моль}^{-1}) \cdot K}$
-	$\sqrt{MT_{crit}}$ (для водяної пари)	107,9	$\sqrt{(\Gamma \cdot \text{моль}^{-1}) \cdot K}$