

ДОДАТОК 6.F
(інформаційний)

**ПРИКЛАД ОБЧИСЛЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ,
ВСТАНОВЛЕНОГО ДЛЯ ВИМІРЮВАНЬ ШВИДКОСТІ ТА ОБ'ЄМНОЇ
ВИТРАТИ ЗА ДОПОМОГОЮ ТРУБКИ ПІТО**

6.F.1 Процес оцінювання невизначеності

6.F.1.1 Загальні положення

Процедура обчислення невизначеності вимірювань заснована на законі поширення невизначеності, викладеному в стандарті ISO 14956 [5] або керівництві ISO/IEC 98-3. Процедура обчислення охоплює різні етапи, від 6.F.1.2 до 6.F.1.5.

6.F.1.2 Визначення функції моделювання

Вимірювана величина та всі параметри, що впливають на результат вимірювання, так звані «вхідні величини», повинні бути чітко визначені.

Повинні бути визначені всі джерела невизначеності, що впливають на будь-яку вхідну величину або безпосередньо на вимірювану величину.

Потім необхідно встановити функцію моделювання, тобто зв'язок між вимірюваною величиною та величинами впливу, якщо це можливо, у вигляді математичного рівняння.

6.F.1.3 Кількісне оцінювання компонентів невизначеності

Кожне джерело невизначеності оцінюють для отримання його впливу на загальну невизначеність, застосовуючи наявні характеристики вимірювальної системи, дані про дисперсію повторних вимірювань, дані, наведені в сертифікатах калібрування.

Всі компоненти невизначеності (наприклад, експлуатаційні характеристики) перетворюють на стандартні невизначеності вхідних та впливових величин.

6.F.1.4 Обчислення сумарної невизначеності

Потім розраховується сумарна невизначеність, u_c , шляхом об'єднання стандартних невизначеностей, застосовуючи закон поширення невизначеності.

У загальному випадку невизначеність, пов'язана з вимірюваною величиною, подають у формі розширеної невизначеності. Розширена сумарна невизначеність U_c відповідає стандартній сумарній невизначеності, яку отримують множенням на коефіцієнт охоплення, k : $U_c = k \cdot u_c$. Значення коефіцієнта охоплення k вибирають на основі необхідного рівня довіри. У більшості випадків k приймають рівним 2, для рівня довіри приблизно 95 %.

6.F.1.5 Інші джерела помилок

Математичне моделювання вимірних локальних швидкостей, а також визначення середньої швидкості та об'ємної витрати здійснюють, виходячи з базового рівняння, яке використовують для обчислення цих параметрів.

У цих рівняннях всі параметри мають невизначеність, пов'язану з їхнім значенням, що сприяє загальній невизначеності результату вимірювання.

Однак, ретельне аналізування процесу вимірювання може призвести до визначення інших джерел невизначеностей, які не з'являються явно у формулі, що використовують для обчислення швидкості та об'ємної витрати. Ці джерела, зокрема, пов'язані з експлуатаційними обмеженнями методу, а також з порушеннями швидкості, що характеризується при реалізації самого вимірювання:

- характер газового потоку: газовий потік повинен бути безперервним однофазним або поводитися як однофазний;
- неоднорідність фізико-хімічних характеристик газу по всій секції вимірювання;
- характер потоку: обчислювальні формули є точними лише тоді, коли потік стабільний і не має ані поперечного нахилу, ані турбулентності – однак на практиці в закритих каналах ці обидві якості співіснують;
- розмір трубки Піто: відношення діаметру трубки Піто до діаметру повітропроводу повинно бути обмеженим, щоб мінімізувати похибку вимірювання потоку, спричинену градієнтом швидкості та перешкодами, спричиненими трубкою Піто;
- вплив турбулентності: турбулентність впливає на визначення швидкості та вимірювання статичного тиску – зсув у бік збільшення, викликаний

- турбулентністю при визначенні швидкості, залежить від ступеня турбулентності;
- повільні коливання швидкості: похибка, обумовлена недостатньо тривалим часом вимірювання, що дозволяє правильно врахувати повільні коливання швидкості, зменшується при збільшенні кількості та тривалості вимірювань у певній точці;
 - кут нахилу трубки Піто в порівнянні з напрямком потоку: похибка збільшується зі збільшенням кута нахилу;
 - втрата тиску між точкою загального тиску і точками статичного тиску: оскільки точки статичного тиску розташовані після точки загального тиску, динамічний тиск вимірюють з похибкою, що дорівнює втраті тиску на тертя в повітроводі на цій відстані – ця похибка збільшується залежно від відстані між точками тиску і шорсткості повітроводу;
 - розташування трубки Піто на секції вимірювання;
 - кількість точок вимірювання: якщо крива розподілення швидкості показує недостатньо однорідний розподіл, кількість точок вимірювання, що зазвичай прописана в стандартах, може виявитися недостатньою.

6.F.2 Приклад обчислення невизначеності

Оцінювання невизначеності швидкості та невизначеності об'ємної витрати газового потоку в повітроводі з наступними характеристиками:

- газохід діаметром 1 м, досліджений в п'яти точках за допомогою трубки Піто L-типу: невизначеність вимірювання діаметра повітроводу обчислюють виходячи з максимально допустимої похибки, що дорівнює 2 % від діаметра;
- температура газу на секції вимірювання: $150\text{ }^{\circ}\text{C} = 423\text{ K}$ – з точністю до 1 % від абсолютної температури в К (як зазначено в стандарті ISO 10780 [4]);
- атмосферний тиск: 101,080 Па – невизначеність вимірювання атмосферного тиску обчислюють, виходячи з максимально допустимої похибки, яка становить 300 Па, і похибки показань, яка становить 20 Па;

- склад газів:
 - вимірний вміст кисню в каналі: об'ємна частка сухого газу $11,8 \% \pm 6 \% (k = 2)$,
 - вміст вуглекислого газу, вимірний в каналі: об'ємна частка сухого газу $9,1 \% \pm 6 \% (k = 2)$,
 - склад водяної пари: об'ємна частка вологого газу $10,8 \% \pm 20 \% (k = 2)$;
- середній локальний динамічний тиск, Па, в кожній точці вимірювання (таблиця 6.F.1):

Таблиця 6.Ф.1

Значення	і-та точка				
	1	2	3	4	5
1	190	205	221	208	195
2	189	198	227	215	188
3	195	203	225	213	186
4	194	200	219	216	195
5	192	203	220	210	194
$\overline{\Delta p_i}$	192	202	222	212	192

— статичний тиск, Па, на кожній досліджуваній лінії вимірювання: виконують п'ять вимірювань на кожному діаметрі (таблиця 6.Ф.2):

Таблиця 6.Ф.2

Значення	Діаметр	
	1	2
1	-160	-158
2	-165	-162
3	-166	-164
4	-170	-159
5	-159	-161
$\overline{p_{stat,k}}$	-164	-161

Середній тиск на секції вимірювання приймають рівним середньому арифметичному значенню середніх статичних тисків на кожному діаметрі

$$\overline{p_{stat}} = \frac{1}{2} (\overline{p_{stat,1}} + \overline{p_{stat,2}}) = -162 Pa$$

$$u^2(\overline{p_{stat}}) = \frac{1}{4} \cdot [u^2(\overline{p_{stat,1}}) + u^2(\overline{p_{stat,2}})]$$

6.Ф.2.1 Обчислення фізико-хімічних характеристик газів у викиді

- молярна маса газів: $M = 28,6 \times 10^{-3}$ кг/моль
- густина газів: $\rho = 0,82$ кг/м³ за температури та тиску реальних умов, для вологого газу
- абсолютний тиск: $p_c = 100\,918$ Па

— локальні швидкості (таблиця 6.Ф.3), м/с:

Таблиця 6.Ф.3

Швидкість	<i>i</i> -та точка				
	1	2	3	4	5
v_i	21,72	22,27	23,38	22,85	21,70
Середня швидкість: $\bar{v} = 22,38$ м/с					

— об'ємна витрата:

- $q_{V,w} = 63292$ м³/год за температури та тиску реальних умов, для вологого газу,
- $q_{V,0d} = 32371$ м³/год за стандартних умов для сухого газу,
- $q_{V,0d,O_2,ref} = 9755$ м³/год за стандартних умов для сухого газу і з контрольною концентрацією кисню.

6.Ф.2.2 Обчислення невизначеності, пов'язаної з визначенням локальних швидкостей

$$\frac{u^2(v_i)}{v_i^2} = \frac{u^2(K)}{K^2} + \frac{u^2(\overline{\Delta p_i})}{4 \cdot \overline{\Delta p_i}^2} + \frac{u^2(\rho)}{4\rho^2}, \quad (6.F.1)$$

6.Ф.2.2.1 Стандартна невизначеність коефіцієнта трубки Піто

Характеристики трубки Піто: $K = 1,01 \pm 0,02$ (коефіцієнт охоплення $k = 2$)

$$u(K) = \frac{0,02}{2} = 0,01$$

6.Ф.2.2.2 Стандартна невизначеність, пов'язана із середніми локальними динамічними тисками

$$u^2(\overline{\Delta p_i}) = \frac{\sigma_{\Delta p_i}^2}{m} + \sum_{f=1}^r u^2(C_f), \quad (6.F.2)$$

де $\sigma_{\Delta p_i}$ — стандартне відхилення результатів вимірювань динамічного тиску m в i -й точці;

$\sigma_{\Delta p_i} / \sqrt{m}$ — стандартне відхилення результатів вимірювань динамічного тиску m в i -й точці;

$C_{f,f} = 1 \dots r$ – поправки до вимірювань динамічного тиску.

Стандартне відхилення $\sigma_{\Delta p_i}$ обчислюють наступним чином:

— Якщо кількість вимірювань менше або дорівнює 10:

$$\sigma_{\Delta p_i} = d_n (\Delta p_{i,max} - \Delta p_{i,min})$$

де $\Delta p_{i,max}, \Delta p_{i,min}$ – максимальне та мінімальне виміряне значення динамічного тиску;

d_n – факторне навантаження, що залежить від кількості вимірювань (таблиця 6.Ф.4).

Таблиця 6.Ф.4

Кількість вимірювань/значень n	d_n	Кількість вимірювань/значень n	d_n
2	0,885	12	0,307
3	0,591	15	0,288
4	0,486	20	0,268
5	0,430	25	0,254
6	0,395	30	0,245
7	0,370	40	0,227
8	0,351	50	0,222
9	0,337	60	0,216
10	0,325	80	0,206
11	0,315	100	0,199

— Якщо кількість вимірювань перевищує 10:

$$\sigma_{\Delta p_i} = s_{\Delta p_i} \text{ або } \sigma_{\Delta p_i} = d_n (\Delta p_{j,max} - \Delta p_{j,min})$$

де $s_{\Delta p_i}$ – експериментальне стандартне відхилення серії вимірювань динамічного тиску.

Поправки до вимірювань динамічного тиску пов'язані з:

- точністю використовуваного датчика;
- невизначеністю його калібрування;
- його дрейфом;

- його лінійністю;
- гістерезисом.

Характеристики використовуваного датчика тиску (у прикладі):

- діапазон: від 0 до 1000 Па;
- точність: 1 Па;
- невизначеність калібрування: ± 2 Па (за коефіцієнта охоплення $k = 2$);
- дрейф: 0,1 % діапазону між двома калібруваннями;
- невідповідність: 0,06 % діапазону.

$$u^2(\overline{\Delta p_i}) = \frac{\sigma_{\Delta p_i}^2}{m} + \left(\frac{1}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{2}{2}\right)^2 + \left[\frac{(0,1/100) \cdot 1000}{\sqrt{3}}\right]^2 + \left[\frac{(0,6/100) \cdot 1000}{\sqrt{3}}\right]^2$$

Таблиця 6.Ф.5

Значення, Па	<i>i</i> -та точка				
	1	2	3	4	5
$\overline{\Delta p_i}$	192	202	222	212	192
$\sigma_{\Delta p_i} = d_n(\Delta p_{i,max} - \Delta p_{i,min})$	2,58	3,01	3,44	3,44	3,87
$\sigma_{\Delta p_i}/\sqrt{m}$	1,15	1,35	1,54	1,54	1,73
$u(\overline{\Delta p_i})$	1,69	1,83	1,98	1,98	2,13

6.Ф.2.2.3 Стандартна невизначеність, пов'язана з густиною викидів газу

$$\frac{u^2(\rho)}{\rho^2} = \frac{u^2(\rho_c)}{\rho_c^2} + \frac{u^2(T_c)}{T_c^2} + \frac{u^2(M)}{M^2}, \quad (6.Ф.3)$$

- де ρ – густина викидів газу в залежності від температури та тиску газу, кг/м³;
- M – молярна маса викидів вологого газу, кг/моль;
- ρ_c – абсолютний тиск в каналі на секції вимірювання, Па;
- T_c – температура газу в повітроводі, К.

6.Ф.2.2.3.1 Стандартна невизначеність, пов'язана з молярною масою газу

$$M = 10^{-5} [32\varphi_{O_2,w} + 44\varphi_{CO_2,w} + 18\varphi_{H_2O} + 28 \cdot (100 - \varphi_{O_2,w} - \varphi_{CO_2,w} - \varphi_{H_2O})]$$

$$u^2(M) = \left(\frac{\partial M}{\partial \varphi_{O_2,w}}\right)^2 \cdot u^2(\varphi_{O_2,w}) + \left(\frac{\partial M}{\partial \varphi_{CO_2,w}}\right)^2 \cdot u^2(\varphi_{CO_2,w}) + \left(\frac{\partial M}{\partial \varphi_{H_2O}}\right)^2 \cdot u^2(\varphi_{H_2O}),$$

(6.F.4)

Коефіцієнт чутливості:

$$\frac{\partial M}{\partial \varphi_{O_2,w}} = 4 \cdot 10^{-5} \quad \sigma_{\Delta p_i} = d_n \cdot (\Delta p_{j,max} - \Delta p_{j,min}) \quad \frac{\partial M}{\partial \varphi_{H_2O}} = -10^{-4}$$

Стандартна невизначеність:

$$u^2(M) = (4 \cdot 10^{-5})^2 \cdot u^2(\varphi_{O_2,w}) + (16 \cdot 10^{-5})^2 \cdot u^2(\varphi_{CO_2,w}) + (10^{-4})^2 \cdot u^2(\varphi_{H_2O})$$

де $\varphi_{O_2,w}$, $\varphi_{CO_2,w}$, φ_{H_2O} – відсоткові об'ємні частки вологого газу.

Вміст кисню та вуглекислого газу у вологому газі визначають за наступними формулами:

$$\varphi_{O_2,w} = \varphi_{O_2,d} \cdot \frac{100 - \varphi_{H_2O}}{100} = 11,8 \cdot \frac{100 - 10,8}{100} = 10,5\% \text{ об'ємна частка}$$

$$\varphi_{CO_2,w} = \varphi_{CO_2,d} \cdot \frac{100 - \varphi_{H_2O}}{100} = 9,1 \cdot \frac{100 - 10,8}{100} = 8,1\% \text{ об'ємна частка}$$

Типи невизначеностей, пов'язані з вмістом кисню, вуглекислого газу та водяної пари у вологому газі, обчислюють за наступними формулами:

$$u(\varphi_{H_2O}) = \frac{20}{2 \cdot 100} \cdot 10,8 = 1,08\% \text{ об'ємна частка вологого газу}$$

$$u(\varphi_{O_2,w}) = \varphi_{O_2,w} \cdot \sqrt{\left[\frac{u(\varphi_{O_2,d})}{\varphi_{O_2,d}}\right]^2 + \left[\frac{u(\varphi_{H_2O})}{100 - \varphi_{H_2O}}\right]^2}$$

$$u(\varphi_{O_2,w}) = 10,5 \cdot \sqrt{\left(\frac{\frac{6}{2 \cdot 100} \cdot 11,8}{11,8}\right)^2 + \left(\frac{\frac{20}{2 \cdot 100} \cdot 10,8}{100 - 10,8}\right)^2} = 0,34\% \text{ об'ємна частка водяної}$$

пари

$$u(\varphi_{CO_2,w}) = \varphi_{CO_2,w} \cdot \sqrt{\left[\frac{u(\varphi_{CO_2,d})}{\varphi_{CO_2,d}}\right]^2 + \left[\frac{u(\varphi_{H_2O})}{100 - \varphi_{H_2O}}\right]^2}$$

$$u(\varphi_{CO_2,w}) = 8,1 \cdot \sqrt{\left(\frac{\frac{6}{2 \cdot 100} \cdot 9,1}{9,1}\right)^2 + \left(\frac{\frac{20}{2 \cdot 100} \cdot 10,8}{100 - 10,8}\right)^2} = 0,26\% \text{ об'ємна частка}$$

$$u(M) = 1,17 \cdot 10^{-4} \text{ кг/моль}$$

6.F.2.2.3.2 Стандартна невизначеність, пов'язана з температурою T_c

Невизначеність, пов'язана з вимірюванням температури, залежить від:

- точності використовуваного датчика температури;
- невизначеності калібрування вимірювального устаткування: датчика та вимірювального приладу;
- дрейфів вимірювального устаткування;
- устаткування для вимірювання лінійності;
- устаткування для вимірювання гістерезису.

Розширена невизначеність, пов'язана з вимірюванням температури, становить $\pm 2,5$ К.

Таким чином, стандартна невизначеність $u(T_c)$ дорівнює:

$$u(T_c) = \frac{4,23}{2} = 2,11 \text{ К}$$

6.F.2.2.3.3 Стандартна невизначеність, пов'язана з абсолютним тиском в повітроводі, p_c

Невизначеність абсолютного тиску визначається наступним чином:

$$u^2(p|_{T_c}) = u^2(p_{atm}) + u^2(\overline{p_{stat}}), \quad (6.F.5)$$

Невизначеність, пов'язана з вимірюванням атмосферного тиску, залежить від:

- точності використовуваного датчика;
- невизначеності калібрування датчика;
- дрейфу датчика;
- лінійності датчика
- гістерезису датчика.

У цьому прикладі відома максимально допустима похибка, яка враховує дрейф, невідповідність та гістерезис, а також невизначеність, пов'язану зі зчитуванням показань. Стандартну невизначеність обчислюють за формулою:

$$u^2(p_{atm}) = \left(\frac{300}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{20}{2\sqrt{3}}\right)^2 = 173,3 \text{ Па}$$

Якщо в кожній точці вимірювання k виконують p вимірювань, то стандартну невизначеність, пов'язану з середнім статичним тиском в цій точці, визначають за формулою (6.F.6):

$$u^2(\overline{p_{stat,k}}) = \frac{\sigma_{p_{stat,k}}^2}{p} \sum_{f=1}^q u^2(C_f), \quad (6.F.6)$$

де $\sigma_{p_{stat,k}}$ – стандартне відхилення p вимірювань статичного тиску в точці k ;

$\sigma_{p_{stat,k}}/\sqrt{p}$ – стандартне відхилення середнього значення вимірювань статичного тиску в точці k ;

$C_f, f = 1 \dots q$ – поправки до вимірювань статичного тиску.

Середньоквадратичне відхилення результатів $\sigma_{p_{stat,k}}$ вимірювання статичного тиску розраховується наступним чином:

— Якщо кількість вимірювань менше або дорівнює 10:

$$\sigma_{p_{stat,k}} = d_n(p_{stat,k,max} - p_{stat,k,min})$$

де $p_{stat,k,max}, p_{stat,k,min}$ – максимальне та мінімальне значення статичного тиску в точці k ;

d_n – факторне навантаження, що залежить від кількості вимірювань.

— Якщо кількість вимірювань перевищує 10:

$$\sigma_{p_{stat,k}} = s_{p_{stat,k}} \text{ або } \sigma_{p_{stat,k}} = d_n(p_{stat,k,max} - p_{stat,k,min})$$

де $s_{p_{stat,k}}$ – експериментальне стандартне відхилення серії вимірювань динамічного тиску.

Поправки до вимірювань статичного тиску пов'язані з:

- точністю використовуваного датчика;
- невизначеністю його калібрування;
- його дрейфом;
- його лінійністю;
- гістерезисом.

Стандартна невизначеність, пов'язана із середнім статичним тиском, $\overline{p_{stat}}$ дорівнює:

$$u^2(\overline{p_{stat}}) = \frac{1}{r^2} \sum_{k=1}^r u^2(\overline{p_{stat,k}}) = \frac{1}{r^2} \sum_{k=1}^r \left[\frac{\sigma_{p_{stat,k}}^2}{p} + \sum_{f=1}^q u^2(C_f) \right], \quad (6.F.7)$$

Стандартна невизначеність, пов'язана з абсолютним тиском, дорівнює:

$$u^2(p_c) = u^2(p_{atm}) + u^2(\overline{p_{stat}}) = u^2(p_{atm}) + \frac{1}{r^2} \sum_{k=1}^r \left[\frac{\sigma_{p_{stat,k}}^2}{p} + \sum_{f=1}^q u^2(C_f) \right],$$

(6.F.8)

$$u^2(p_c) = u^2(p_{atm}) + \frac{1}{4} \cdot [u^2(\overline{p_{stat,1}}) + u^2(\overline{p_{stat,2}})]$$

У наведеному прикладі статичний тиск вимірюють за допомогою того самого датчика тиску, який використовують для вимірювання динамічного тиску. Таким чином, невизначеність поправок залишається такою самою.

Таблиця 6.F.6

Значення, Па	Діаметр	
	1	2
$\overline{p_{stat,k}}$	-164	-161
$\sigma_{p_{stat,k}} = d_n(p_{stat,k,max} - p_{stat,k,min})$	4,73	2,58
$\sigma_{p_{stat,k}}/\sqrt{p}$	2,12	1,15

$$u(p_{stat,1})$$

$$= \sqrt{2,12^2 + \left(\frac{1}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{2}{2}\right)^2 + \left[\frac{(0,1/100) \cdot 1000}{\sqrt{3}}\right]^2 + \left[\frac{(0,06/100) \cdot 1000}{\sqrt{3}}\right]^2}$$

$$= 2,46 \text{ Па}$$

$$u(p_{stat,2})$$

$$= \sqrt{1,15^2 + \left(\frac{1}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{2}{2}\right)^2 + \left[\frac{(0,1/100) \cdot 1000}{\sqrt{3}}\right]^2 + \left[\frac{(0,06/100) \cdot 1000}{\sqrt{3}}\right]^2}$$

$$= 1,70 \text{ Па}$$

$$u(\overline{p_{stat}}) = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{u^2(\overline{p_{stat,1}}) + u^2(\overline{p_{stat,2}})} = 1,49 \text{ Па}$$

Невизначеність, пов'язана з абсолютним тиском:

$$u(p_c) = 173,2 \text{ Па}$$

6.F.2.2.3.4 Стандартна невизначеність, пов'язана з густиною

$$\frac{u^2(\rho)}{\rho^2} = \frac{u^2(M)}{M^2} + \frac{u^2(\rho_c)}{\rho_c^2} + \frac{u^2(T_c)}{T_c^2} = \frac{(1,17 \cdot 10^{-4})^2}{(28,6 \cdot 10^{-3})^2} + \frac{173,2^2}{100918^2} + \frac{2,11^2}{423^2}$$

$$u(\rho_c) = 5,46 \times 10^{-3} \text{ кг/м}^3$$

6.F.2.2.4 Стандартна невизначеність, пов'язана з локальними швидкостями

Стандартну невизначеність, пов'язана з локальними швидкостями, визначають за формулою (6.F.9):

$$\frac{u^2(v_i)}{v_i^2} = \frac{u^2(K)}{K^2} + \frac{u^2(\overline{\Delta p_i})}{4\overline{\Delta p_i}^2} + \frac{u^2(\rho)}{4\rho^2}, \quad (6.F.9)$$

Результати узагальнені в таблиці 6.F.7:

Таблиця 6.F.7

Значення, м/с	i-та точка				
	1	2	3	4	5
$u(v_i)$	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26

6.F.2.3 Обчислення невизначеності, пов'язаної із середньою швидкістю

Невизначеність, пов'язана із середньою швидкістю, обчислюють наступним чином:

$$\frac{u^2(\bar{v})}{\bar{v}^2} = \frac{u^2(K)}{4K^2} + \frac{u^2(\rho)}{4\rho^2} + \frac{u^2 \sum_{i=1}^n [u^2(\overline{\Delta p_i}/4\overline{\Delta p_i})]}{\left(\sum_{i=1}^n \sqrt{\overline{\Delta p_i}}\right)^2}, \quad (6.F.10)$$

де

$$u^2\left(\sum_{i=1}^n \sqrt{\overline{\Delta p_i}}\right) = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{1}{2\sqrt{\overline{\Delta p_i}}}\right)^2 \cdot u^2(\overline{\Delta p_i}) \right] = \sum_{i=1}^n \frac{u^2(\overline{\Delta p_i})}{4\overline{\Delta p_i}}, \quad (6.F.11)$$

$$\frac{u^2(\bar{v})}{\bar{v}^2} = \frac{u^2(K)}{4K^2} + \frac{u^2(p_{atm}) + u^2(\overline{p_{stat}})}{4 \cdot \rho_c^2} + \frac{u^2(T_c)}{4 \cdot T_c^2} + \quad (6.F.12)$$

$$\frac{(4 \cdot 10^{-5})^2 \cdot u^2(\varphi_{O_2,d}) + (16 \cdot 10^{-5})^2 \cdot u^2(\varphi_{CO_2,d}) + (10^{-4})^2 \cdot u^2(\varphi_{H_2O})}{4 \cdot M^2} +$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n [u^2(\Delta p_i / 4\Delta p_i)]}{\left(\sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta p_i}\right)^2},$$

Результат сумарної стандартної невизначеності для середньої швидкості:

$$u(\bar{v}) = 0,24 \text{ м/с}$$

Результат розширеної невизначеності:

$$U_c(\bar{v}) = \pm 0,47 \text{ м/с } (k = 2)$$

$$U_{c,rel}(\bar{v}) = \pm 2,1 \% (k = 2)$$

6.F.2.4 Обчислення невизначеності для отриманих значень

6.F.2.4.1 Об'ємна витрата за реальних умов температури, тиску, вмісту водяної пари та кисню

Стандартна невизначеність, пов'язана з об'ємною витратою за температури та тиску реальних умов, вміст водяної пари та кисню, визначають наступним чином:

$$\frac{u^2(q_{V,w})}{q_{V,w}^2} = \frac{u^2(\bar{v})}{\bar{v}^2} + \frac{u^2(A)}{A^2}, \quad (6.F.13)$$

де у разі повітроводу круглого перерізу діаметром D :

$$\frac{u^2(A)}{A^2} = 4 \cdot \frac{u^2(D)}{D^2}$$

— у разі повітроводу прямокутного перерізу зі сторонами a та b :

$$\frac{u^2(A)}{A^2} = \frac{u^2(a)}{a^2} + \frac{u^2(b)}{b^2}$$

Обчислення сумарної стандартної невизначеності:

$$\frac{u^2(A)}{A^2} = 4 \cdot \frac{u^2(D)}{D^2} = 4 \cdot \frac{[(2/100 \cdot 1)/\sqrt{3}]^2}{1^2}$$

$$u(q_{V,w}) = 1597 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Обчислення розширеної сумарної невизначеності:

$$U_c(q_{V,w}) = \pm 3194 \text{ м}^3/\text{год } (k = 2)$$

$$U_{c,rel}(q_{V,w}) = \pm 5,1 (k = 2)$$