

ДОДАТОК 5.F (довідковий)

Приклад оцінки відповідності хеміюмінесцентного методу для NO_x вимогам щодо вимірювання викидів

5.F.1 Загальні положення

Цей довідковий додаток надає приклад розрахунку бюджету невизначеності, встановленого для конфігурації 1, щоб продемонструвати відповідність заданим вимогам щодо невизначеності.

Наступна процедура розрахунку невизначеності вимірювання базується на законі поширення невизначеності, описаного в EN ISO 14956 або ISO/IEC Guide 98-3 (GUM). Окремі стандартні невизначеності, комбінована стандартна невизначеність та розширена невизначеність визначаються відповідно до вимог EN ISO 14956 або ISO/IEC Guide 98-3.

5.F.2 Елементи, необхідні для визначення невизначеності

5.F.2.1 Модель рівняння

На першому етапі встановлюється модельне рівняння. Модельне рівняння описує математичний зв'язок між вимірюваною величиною та всіма параметрами, які впливають на результат вимірювання. Ці параметри називаються вхідними величинами. Необхідно чітко визначити вимірювану величину та вхідні величини.

Модельна функція використовується для розрахунку результату вимірювання на основі значень, присвоєних вхідним величинам, та для отримання комбінованої невизначеності результату вимірювання шляхом застосування закону поширення невизначеності.

Модельне рівняння для концентрації C_{NO} може бути загалом виражене як сума окремих внесків C_i, як показано у формулі (5.F.1):

$$C_{NO} = \sum_{i=1}^N C_i \quad (5.F.1)$$

Окремі внески C_i представляють об'ємну концентрацію, вказану

аналізатором, та додаткові поправки через відхилення, причиною яких є характеристики продуктивності аналізатора та впливові величини, як наведено в таблиці 5.F.1.

Таблиця 5.F.1 - Параметри та внески сигналу і невизначеності

Номер i	Параметр	Внесок сигналу C_i	Внесок похибки u_i
1	об'ємна концентрація, показана аналізатором	C_{read}	u_{read}
2	повторюваність	C_r	$u_r = S_r$
3	недостатнє прилягання	C_{lof}	u_{lof}
4	короткостроковий нульовий дрейф	$C_{d,z}$	$u_{d,z}$
5	короткочасний дрейф прольоту	$C_{d,s}$	$u_{d,s}$
6	вплив температури навколишнього середовища при нульовому значенні ^a	$C_{t,z}$	$u_{t,z}$
7	Вплив температури навколишнього середовища на прольоті ^a	$C_{t,s}$	$u_{t,s}$
8	вплив тиску досліджуваного газу	C_p	u_p
9	вплив потоку досліджуваного газу	C_f	u_f
10	вплив напруги живлення	C_v	u_v
11	перехресна чутливість (перешкоди)	C_i	u_i
12	регулювання (калібрувальний газ)	C_{adj}	u_{adj}

^a вибрати найбільш підходящий з обох відповідно до рівня виміряної концентрації

5.F.2.2 Комбінована похибка

Комбінована похибка $U(C_{NO})$ концентрації C_{NO} отримується шляхом застосування закону поширення невизначеності до формули (5.F.1), що призводить до квадратичного підсумовування внесків невизначеності u_i , перелічених у таблиці 5.F.1:

$$u_c(C_{NO}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N C_i \left[\left(\frac{\partial C_{NO}}{\partial C_i} \right)^2 \right] u^2(C_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(C_i)} \quad (5.F.2)$$

Внески невизначеності u_i кількісно визначаються на основі доступних характеристик продуктивності вимірювальної системи, даних про розподіл

повторюваних вимірювань, даних, що описують діапазон впливових величин, або даних, наведених у сертифікатах калібрування. Якщо внесок невизначеності не виражений як стандартна невизначеність (стандартне відхилення), потрібно перетворити його на стандартну невизначеність.

5.F.2.3 Розширена похибка

Загалом невизначеність, пов'язана з результатом вимірювання, виражається як розширена невизначеність, яка відповідає комбінованій стандартній невизначеності, помноженій на коефіцієнт охоплення k . Оскільки більшість значень компонентів невизначеності ці визначаються з тестових даних, де розподіл значень є прямокутним для більшості параметрів і нормальним для деяких параметрів, використовується коефіцієнт $k=2,0$ для рівня довіри приблизно 95 %, оскільки кількість вимірювань для визначення внесків невизначеності та відповідна кількість ступенів свободи є достатньою або припускається прямокутний розподіл.

Розширена невизначеність $U(CNO)$ концентрації CNO визначається за формулою (5.F.3):

$$U(C|NO) = 2,0u_c(C|NO) \quad (5.F.3)$$

Об'ємна частка NO та стандартна невизначеність надаються формулами (5.F.4) та (5.F.5):

$$C_{NO_x} = C_{NO} + C_{NO_2} \quad (5.F.4)$$

$$u^2(C|NO_x) = u^2(C_{NO}) + u^2(C|NO_2) \quad (5.F.5)$$

Якщо ефективність конверсії не дорівнює 100 %, концентрація $C_{NO_x,stack} NO_2$ у димарі не дорівнює концентрації C_{NO_x} , наданій аналізатором. Концентрація $C_{NO_x,stack}$ дорівнює сумі концентрації $C_{NO_2,stack} NO_2$ та концентрації $C_{NO_x,stack} NO$ у димарі. При вимірюванні NO ефект конвертера нульовий, і можна вважати, що $C_{NO_x,stack} = CNO$, де CNO — концентрація, надана аналізатором. Це призводить до формул (5.F.6) – (5.F.8):

$$C_{NO_x} = C_{NO} + C_{NO_2}, \quad (5.F.6)$$

$$C_{NO_x} = C_{NO} + \frac{C_{NO_2}}{\eta} * 100\% \quad (5.F.7)$$

$$C_{NO_x} = C_{NO} + \frac{C_{NO_x} - C_{NO}}{\eta} * 100\% \quad (5.F.8)$$

Значення C_{NO} та C_{NO_x} корелюють. Тоді стандартна невизначеність, пов'язана з концентрацією NO_x , надається формулою (5.F.9):

$$u_c^2 \quad (5.F.9)$$

де

$$(5.F.10)$$

$$(5.F.11)$$

$$(5.F.12)$$

та $r(C_{NO}, C_{NO_x})$ - коефіцієнт кореляції. Це призводить до формули (5.F.13):

$$u_c^2 \quad (5.F.13)$$

де $u(C_{NO_x})$ розраховується так само, як $u(C_{NO})$.

Оскільки зміна концентрації NO_x відбувається в тому ж напрямку, що й зміна концентрації NO , коефіцієнт кореляції $r(C_{NO}, C_{NO_x})$ є додатним або дорівнює нулю. Значення $((\eta - 100\%) \eta) \times (100\% \eta)$ є від'ємним. Тоді останній член рівняння є від'ємним. Невизначеність максимізується, якщо вважати цей член рівним нулю.

У цьому випадку розрахунок спрощується і надається формулою (5.F.14):

$$u_c^2 \quad (5.F.14)$$

5.F.2.4 Визначення внесків невизначеності у випадку прямокутних розподілів

У випадку прямокутних розподілів стандартна невизначеність u_i розраховується відповідно до EN ISO 14956 за формулою (5.F.15):

$$u_i = \sqrt{\frac{(C_{i,max} - C_{i,adj})^2 + (C_{i,min} - C_{i,adj})(C_{i,max} - C_{i,adj}) + (C_{i,min} - C_{i,adj})^2}{3}} \quad (5.F.15),$$

де

$C_{i,min}$ - похибка, пов'язана з концентрацією, вираженою при опорній концентрації кисню;

$C_{i,max}$ - похибка, пов'язана з концентрацією при фактичній об'ємній частці кисню;

$C_{i,adj}$ - похибка, пов'язана з фактичною об'ємною часткою кисню в димовому газі на сухій основі.

Рівняння (5.F.15) можна спростити у таких випадках:

якщо значення $C_{i,adj}$ знаходиться в центрі інтервалу, обмеженого максимальним значенням $C_{i,max}$ та мінімальним значенням $C_{i,min}$ всіх значень C_i , тоді стандартна невизначеність u_i надається формулою (5.F.16):

$$u_i = \frac{\left(\frac{C_{i,max} - C_{i,min}}{\sqrt{12}}\right)}{\sqrt{12}} \quad (5.F.16)$$

Якщо абсолютне значення відхилення вище та нижче центрального значення виражається як ΔC_i (див. формулу (5.F.17)), тоді стандартна невизначеність u_i надається формулою (5.F.18):

$$|C_{i,max} - C_{i,adj}| = |C_{i,min} - C_{i,adj}| = \Delta C_i \quad (5.F.17)$$

$$u_i = \frac{\Delta C_i}{\sqrt{3}} \quad (5.F.18)$$

якщо значення $C_{i,adj}$ збігається з $C_{i,min}$ або $C_{i,max}$, тоді стандартна невизначеність u_i надається формулою (5.F.19):

$$u_i = \frac{(C_{i,max} - C_{i,min})}{\sqrt{3}} \quad (5.F.19)$$

5.F.2.5 Визначення внесків невизначеності за допомогою коефіцієнтів чутливості

Внесок C_i у вимірне значення, спричинений параметром i , можна розрахувати за допомогою значення X_i параметра та відповідного коефіцієнта чутливості b_i цього параметра, як показано у формулі (5.F.20):

$$C_i = b_i * X_i \quad (5.F.20)$$

Внесок зміни параметра до загальної невизначеності вимірних значень можна розрахувати на основі діапазону значень параметра в даному застосуванні та коефіцієнта чутливості цього параметра, визначеного в лабораторному тесті аналізатора, за формулою (5.F.21):

$$u_i = |b_i|u(X_i) \quad (5.F.21)$$

де

u_i - внесок невизначеності до загальної невизначеності вимірних значень, спричинений зміною параметра i ;

b_i - коефіцієнт чутливості параметра i ;

$u(X_i)$ - стандартна невизначеність через зміну параметра i ;

Зміна параметра i може бути перетворена на стандартну невизначеність за допомогою формул (5.F.15) – (5.F.19).

5.F.3 Приклад розрахунку похибки

5.F.3.1 Умови на підприємстві

Таблиця 5.F.2 надає специфічні умови на підприємстві, тобто значення та діапазони впливових величин, що використовуються в цьому прикладі.

Таблиця 5.Ф.2 - Специфічні умови на об'єкті та значення або діапазони параметрів впливу, застосовані для прикладу

Специфічні умови	Значення або діапазон
Досліджувана концентрація NO _x (граничне значення NO _x для місця) виражена при стандартних умовах температури та тиску та при опорній об'ємній концентрації кисню	200 мг/м ³ виражено як NO ₂
Концентрація кисню в еталонному об'ємі	11%
Співвідношення NO ₂ /NO _x	10%
Умови в польових умовах Об'ємна витрата проби Температура під час регулювання Коливання температури навколишнього середовища під час вимірювання Зміна напруги Тиск газу під час регулювання Зміна тиску газу Зміни об'ємної концентрації CO ₂ Зміни масової концентрації NH	60 л/г + 5 л/г 285 К 283 К до 308 К 230 В x (1 ± 5 %) 99 кПа 99 кПа до 100 кПа від 8 % до 15 від 0 мг/м ³ до 20 мг/м ³
Калібрувальний газ (об'ємна концентрація NO в N ₂ , без домішок)	180 x 10 ⁻⁶ x (1± 2%)

5.Ф.3.1 Характеристики ефективності методу

Таблиця 5.Ф.3 надає характеристики продуктивності методу, що використовуються в цьому прикладі. Ці параметри можуть впливати на реакцію аналізатора та включають метрологічні характеристики аналізатора та вплив впливових величин (умови навколишнього середовища, такі як температура навколишнього середовища, напруга, тиск та хімічні взаємодії).

Таблиця 5.F.3 - Специфічні умови на об'єкті та значення або діапазони параметрів впливу, застосовані для прикладу

Характеристика продуктивності	Критерій ефективності	Результати лабораторних та польові випробування
Час відгуку	≤ 200 s	120s
Стандартне відхилення повторюваності в лабораторії при нульовій точці	$\leq 1,0$ % ^a	0,65 % ^a
Стандартне відхилення повторюваності в лабораторії в точці розкиду	$\leq 2,0$ % ^a	0,8 % ^a
Відсутність відповідності	$\leq 2,0$ % ^a	0,7 % ^a
Короткостроковий нульовий дрейф	$\leq 2,0$ % ^a	0,01 % ^a
Короткостроковий дрейф прольоту	$\leq 2,0$ % ^a	0,5 % ^a
Вплив зміни температури навколишнього середовища від 5 °C до 25 °C та від 40 °C до 20 °C на нульовій точці	$\leq 5,0$ % ^a	0,5 % ^a
Вплив зміни температури навколишнього середовища від 5 °C до 25 °C та від 40 °C до 20 °C на точці діапазону	$\leq 5,0$ % ^a	1,0 % ^a
Вплив тиску проб газу на точці діапазону, для зміни тиску Δp на 3 кПа	$\leq 2,0$ % ^a	1,6 % від виміряного значення
Вплив об'ємної витрати проб газу, для зміни витрати на 10 л/год	$\leq 2,0$ % ^a	1,0 % ^a
Вплив напруги живлення, для зміни напруги на 10 В на точці діапазону	$\leq 2,0$ % ^a	0,12 % ^a
Перехресна чутливість CO ₂ (15 %) NH ₃ (20 мг/м ³)	всього: $\leq 4,0$ % ^a	-2,6 мг/м ³ у перерахунку на NO ₂ 1,5 мг/м ³ у перерахунку на NO ₂
Втрати NO ₂ в P-AMS	$< 10,0$ %	8%
Дрейф ефективності перетворення між двома калібруваннями Стандартне відхилення повторюваності ефективності конверсії		3 % (абсолютний) 1,0 % (абсолютний)
Регулювання за допомогою калібрувальних газів		2,0 % від виміряного значення
^a виражене у відсотках від діапазону		

5.F.3.3 Розрахунок значень концентрації

На основі досліджуваного діапазону концентрації NO_x , співвідношення NO_2/NO_x та втрат NO_2 у P-AMS, наведених у таблицях 5.F.2 та 5.F.3, розраховуються наступні значення концентрації:

$$C_{\text{NO}_x} = C_{\text{NO}} + C_{\text{NO}_2} = C_{\text{NO}} + \frac{C_{\text{NO}_2}}{0,92} = C_{\text{NO}} + \frac{10 \cdot C_{\text{NO}}}{90} = 1,1208 C_{\text{NO}}$$

$$C_{\text{NO}} = C_{\text{NO}_2} = 178,4 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3}, \text{ виражена як } \text{NO}_2$$

$$C_{\text{NO}_2} = \frac{10}{90} * 178,4 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3} = 19,83 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3}, \text{ виражена як } \text{NO}_2$$

$$C_{\text{NO}_2} = \frac{C_{\text{NO}_2}}{0,92} = 21,55 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3}, \text{ виражена як } \text{NO}_2$$

5.F.3.4 Визначення внесків похибки

- а) Об'ємна концентрація, вказана аналізатором

Невизначеність u_{read} , пов'язана зі зчитуванням концентрації, обумовлена роздільною здатністю аналізатора та системи збору даних. Її можна вважати незначною.

- б) Повторюваність

Стандартна невизначеність u_r , обумовлена повторюваністю, дорівнює стандартному відхиленню повторюваності s_r , розрахованому на основі результатів повторень вимірювань.

Можна провести кілька тестів при різних концентраціях, але лише одне з значень включається до розрахунку бюджету невизначеності, наприклад:

- стандартне відхилення повторюваності, що відповідає найближчій концентрації, виміряній у димарі;
- найвище (відносне) стандартне відхилення повторюваності незалежно від концентрації, виміряної у димарі.

- с) Відсутність відповідності

Якщо $C_{\text{lof,max}}$ є максимальним відхиленням між вимірними значеннями та відповідними значеннями, отриманими за лінійною регресією під час лабораторного тесту, тоді можна припустити, що відсутність відповідності має однакову ймовірність приймати будь-яке значення в інтервалі $[-C_{\text{lof,max}}; + C_{\text{lof,max}}]$.

Стандартна невизначеність u_{lof} розраховується за допомогою прямокутного розподілу ймовірностей за формулою (5.F.22):

$$u_{lof} = \frac{C_{lof.max}}{\sqrt{3}} \quad (5.F.22)$$

d) Короткостроковий нульовий дрейф

Можна вважати, що дрейф нуля $C_{d,z}$ має однакову ймовірність приймати будь-яке значення в інтервалі $[-C_{d,z}; + C_{d,z}]$. Стандартна невизначеність $u_{d,z}$ обчислюється із застосуванням прямокутного розподілу ймовірностей за формулою (5.F.23):

$$u_{d,z} = \frac{C_{d,z}}{\sqrt{3}} \quad (5.F.23)$$

e) Короткостроковий дрейф діапазону

Можна припустити, що дрейф діапазону $C_{d,s}$ має однакову ймовірність приймати будь-яке значення в інтервалі $[-C_{d,s}; + C_{d,s}]$. Стандартна невизначеність $u_{d,s}$ розраховується за допомогою прямокутного розподілу ймовірностей за формулою (5.F.24):

$$u_{d,s} = \frac{C_{d,s}}{\sqrt{3}} \quad (5.F.24)$$

f) Перехресна чутливість (взаємодія)

Особливо з хімічними компонентами відхилення, спричинені різними взаємодіями, виникають одночасно в однаковій пропорції, тобто стандартні невизначеності цих речовин корелюють. Щоб уникнути недооцінки адитивних ефектів та переоцінки ефектів компенсації, EN ISO 14956 рекомендує визначити суму всіх стандартних похибок взаємодій із позитивним впливом на вимірне значення та суму всіх стандартних похибок взаємодій з негативним впливом на вимірне значення та зберегти найвищу суму як представницьке значення для всіх взаємодій.

Перехресна чутливість тестується в лабораторному тесті для однієї

концентрації взаємодії та вважається пропорційною значенню взаємодії. Поправка $C_{i,j}$ перехресної чутливості взаємодії j також пропорційна її варіації $X_{i,j}$:

$$C_{i,j} = b_{i,j} * X_{i,j} \quad (5.F.25)$$

де b_{ij} — (постійний) коефіцієнт чутливості взаємодії jj , визначений у лабораторному тесті.

Загалом концентрація взаємодії в калібрувальному газі, що використовується для налаштування аналізатора, дорівнює нулю.

Якщо відомо лише максимальне відхилення $C_{ip,j}$ виміряного значення, спричинене взаємодією j , або максимальне значення $X_{ip,j}$ взаємодії j з позитивним впливом на виміряне значення, тоді можна припустити, що відхилення, спричинене цією взаємодією, має однакову ймовірність приймати будь-яке значення в інтервалі між нулем та максимальним значенням. У цьому випадку відповідна стандартна невизначеність $u_{ip,j}$ надається формулою (5.F.26):

$$u_{ip,j} = \frac{C_{ip,j}}{\sqrt{3}} = \frac{|b_{ip,j}| * X_{ip,j}}{\sqrt{3}} \quad (5.F.26)$$

Якщо значення $X_{ip,j,adj}$ під час налаштування аналізатора та мінімальне та максимальне значення, $X_{ip,j,min}$ та $X_{ip,j,max}$, під час періоду вимірювання відомі, тоді стандартну невизначеність взаємодії j з позитивним впливом на виміряне значення можна розрахувати на основі формул (5.F.14) та (5.F.19) за формулою (5.F.27):

$$u_{ip,j} = |b_{ip,j}| \sqrt{(X_{ip,j,max})^2 + (X_{ip,j,min})(X_{ip,j,max}) + \frac{(X_{ip,j,adj})^2}{3}} \quad (5.F.27)$$

Якщо значення $X_{ip,j,adj}$ під час налаштування аналізатора дорівнює нулю, тоді стандартна невизначеність взаємодії j з позитивним впливом на виміряне значення надається формулою (5.F.28):

$$= |b_{ip,j}| \sqrt{u_{ip,j} \left[(X|_{ip,j,max})^2 + (X|_{ip,j,min})(X|_{ip,j,max}) + \frac{(X|_{ip,j})^2}{u_{ip,j}} \right]} \quad (5.F.28)$$

Сума всіх стандартних невизначеностей взаємодій з позитивним впливом на вимірне значення розраховується за формулою (5.F.29):

$$u_{ip} = \sum_{j=1}^p u_{ip,j} \quad (5.F.29)$$

Стандартні невизначеності $u_{in,j}$ та сума $u_{in,j}$ всіх стандартних невизначеностей взаємодій з негативним впливом на вимірне значення розраховуються так само, як невизначеності взаємодій з позитивним впливом:

$$u_{in} = \sum_{j=1}^n u_{in,j} \quad (5.F.30)$$

Стандартна невизначеність u_i через перехресну чутливість, спричинену корельованими взаємодіями, – максимальне значення u_{ip} та u_{in} :

$$u_i = (u_{ip}; u_{in}) \quad (5.F.31)$$

Некорельовані взаємодії обробляються окремо.

f) Впливові величини

Впливові величини, такі як температура навколишнього середовища, атмосферний тиск, витрата проб газу та напруга живлення, тестуються в лабораторному тесті для одного значення величини, і вважається, що ефекти впливових величин пропорційні значенню величини. Поправка C_i ефекту впливової величини i також пропорційна її варіації X_i (див. формулу (5.F.32)):

$$C_i = b_i * X_i \quad (5.F.32),$$

де b_i — (постійний) коефіцієнт чутливості впливової величини i , визначений

у лабораторному тесті.

Розрахунок стандартної невизначеності, пов'язаної з поправкою відхилень, спричинених змінами впливових величин, залежить від значення $X_{i,adj}$ впливової величини під час налаштування аналізатора та мінімального та максимального значення, $X_{i,min}$ та $X_{i,max}$, впливової величини під час періоду вимірювання. Невизначеність можна розрахувати за допомогою формул (5.F.4) – (5.F.10) або безпосередньо з відхилень вимірних значень.

h) Налаштування

Стандартна невизначеність U_{adj} розраховується з невизначеності калібрувального газу. Загалом невизначеність, надана виробником, є розширеною невизначеністю U_{cal} . Для рівня довіри 95 % стандартна невизначеність U_{adj} приблизно надається формулою (5.F.33):

$$u_{adj} = \frac{U_{cal}}{2,0} \quad (5.F.33)$$

Якщо розширена невизначеність виражена як відносна невизначеність $U_{cal,rel}$ у відсотках, стандартна невизначеність поправки при концентрації C_{NO} надається формулою (5.F.34):

$$u_{adj} = \frac{U_{cal,rel} C_{NO}}{2,0} \quad (5.F.34)$$

5.F.3.5 Результати розрахунку похибок

5.F.3.5.1 Стандартні похибки

У таблиці 5.F.4 наведено результати розрахунку похибок на основі даних, наведених у Таблиці 5.F.2 та Таблиці 5.F.3.

Таблиця 5.Ф.4 - Результати розрахунку похибок

Параметр	Стандартна похибка	Значення стандартної невизначеності при граничному значенні (у мг/м ³)
Повторюваність у лабораторії на рівні діапазону	u_r	$ 0,8\% * 200 = 1,60$
Відсутність відповідності	u_{lof}	$\frac{ 0,7\% * 200}{\sqrt{3}} = 0,81$
Короткостроковий дрейф нуля	u_{dz}	$\frac{ 0,01\% *200}{\sqrt{3}} = 0,01$
Короткостроковий дрейф діапазону	u_{ds}	$\frac{ 0,5\% *200}{\sqrt{3}} = 0,58$
Вплив витрати проб газу	u_f	$\frac{ \frac{1\%}{10} * 200 * 5}{\sqrt{3}} = 0,58$
Вплив тиску проб газу	u_p	$\frac{ \frac{1,6\%}{3} *198,2*100-99}{\sqrt{3}} = 0,61$ для NO_x
		$\frac{ \frac{1,6\%}{3} * 178,4 * 100 - 99}{\sqrt{3}} = 0,55$ для NO
Вплив температури навколишнього середовища	u_{fs}	$\frac{ \frac{1\%}{20} * 200}{\sqrt{3}} * \sqrt{\frac{(308 - 285)^2 + (308 - 285)(283 - 285) + (283 - 285)^2}{3}}$ = 1,27
Вплив напруги живлення	u_v	$\frac{ \frac{0,12\%}{10} *200*(\frac{230}{100}*5)}{\sqrt{3}} = 0,16$
Взаємодія: NH_3	u_{iNH_3}	$\frac{1,5}{20} * \sqrt{\frac{20^2}{3}} = 0,87$
Взаємодія: CO_2	u_{i, CO_2}	$\frac{ -2,6 }{15} * \sqrt{\frac{15^2 + 15 * 8 + 8^2}{3}} = 2,03$
Похибка калібрувального газу	u_{adj}	$\frac{2\% + 198,2}{2} = 1,98$ для NO_x

		$\frac{2\% + 178,4}{2} = 1,78 \text{ для } NO$ $\frac{2\% + 19,83}{2} = 0,20 \text{ для } NO_2$
Ефективність конверсії	u_n	$\sqrt{\left(\frac{3}{\sqrt{3}}\right)^2 + 1,0^2}$ $= 2,00\% \text{ (абсолютне значення)}$

5.F.3.5.2 Комбінована похибка

Сума стандартних невизначеностей взаємодій з негативним впливом на вимірне значення є більшою за суму всіх стандартних невизначеностей взаємодій з позитивним впливом на вимірне значення:

$$u_i = (u_{ip}; u_{in}) = 2,03 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3}, \text{ виражена як } NO_2$$

Відповідно до Формули 5.F.2 та Формули 5.F.4, розраховуємо комбіновані невизначеності значень концентрацій:

$$\begin{aligned}
 u_c(C_{NON}) &= \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2} = \sqrt{u_i^2 + u_{tot}^2 + u_{d,s}^2 + u_{t,s}^2 + u_t^2 + u_p^2 + u_r^2 + u_v^2 + u_{adj}^2} \\
 &= \sqrt{1,60^2 + 0,81^2 + 0,01^2 + 0,58^2 + 2,03^2 + 1,27^2 + 0,61^2 + 0,58^2 + 0,16^2 + 1,98^2} \frac{\text{мг}}{\text{м}^3} \\
 &= \sqrt{13,94 \text{ мг/м}^3} = 3,73 \text{ мг/м}^3, \text{ виражена як } NO_2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u_c(C_{NO}) &= \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2} = \sqrt{u_i^2 + u_{tot}^2 + u_{d,s}^2 + u_{t,s}^2 + u_t^2 + u_p^2 + u_r^2 + u_v^2 + u_{adj}^2} \\
 &= \sqrt{1,60^2 + 0,81^2 + 0,01^2 + 0,58^2 + 2,03^2 + 1,27^2 + 0,55^2 + 0,58^2 + 0,16^2 + 1,78^2} \frac{\text{мг}}{\text{м}^3} \\
 &= \sqrt{13,12 \text{ мг/м}^3} = 3,60 \text{ мг/м}^3, \text{ виражена як } NO_2
 \end{aligned}$$

$$u_c^2$$

u

5.Ф.3.5.3 Розширена похибка

Абсолютна та відносна розширена невизначеність масової концентрації NO для $k=2$ надаються наступним чином:

$$U(C_{NO}) = 7,20 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3}, \text{ виражена як } NO_2$$

$$U_{rel}(C_{NO}) = 4,00\%$$

Абсолютна та відносна розширена невизначеність масової концентрації NOx для $k=2$ надаються наступним чином:

$$U(C_{NO}) = 7,50 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3}, \text{ виражена як } NO_2$$

$$U_{rel}(C_{NO}) = 3,80\%$$

5.Ф.3.5.4 Оцінка відповідності вимогам щодо якості вимірювання

Критерій продуктивності щодо перехресної чутливості виконується для суми взаємодій з позитивним впливом на виміряні значення, а також для суми взаємодій з негативним впливом:

$$C_{ip} = 0,87\% < 4,00\%$$

$$C_{\square} = 2,031\% < 4,00\%$$

Усі значення характеристик продуктивності, отримані в лабораторних та польових випробуваннях, відповідають критеріям продуктивності. Отже, метод вимірювання відповідає вимогам.