

ДОДАТОК 6.Е

(обов'язковий)

ОБЧИСЛЕННЯ ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ ДИМОВИХ ГАЗІВ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ

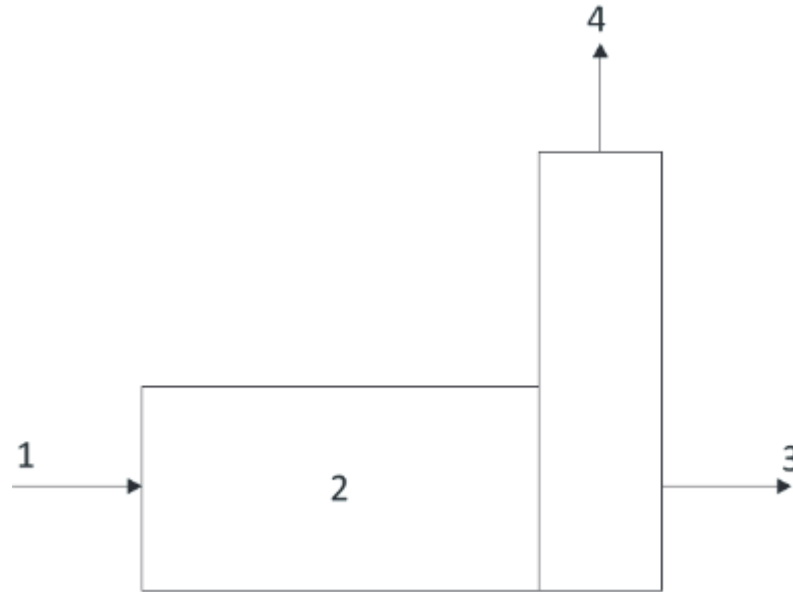
6.Е.1 Суть

У цьому додатку описана процедура обчислення об'ємної витрати димових газів. Загальний метод полягає в тому, щоб помножити енергоспоживання на паливну складову для отримання витрати сухого стехіометричного димового газу за стандартних контрольних умов (0 % O_2 , 273,15 К і 101,325 кПа). Споживання енергії може бути визначено безпосередньо, шляхом вимірювання витрати палива та питомої енергії, або в непрямий спосіб, виходячи з продуктивності установки та теплового ККД.

При складанні звіту про викиди, витрату сухого стехіометричного потоку коригують на заданий контрольний вміст кисню для подальшого множення на концентрацію викидів, зареєстровану за тих самих контрольних умов.

Для моделювання розподілення та певних інших цілей сухий стехіометричний потік обчислюють відповідно до переважаючих або очікуваних умов зберігання, зокрема вмісту кисню, вологи, температури та тиску.

Необхідні вхідні дані, етапи обчислення і вихідні дані представлені на рисунку 6.Е.1 і вказані в наступних розділах цього додатка.



Умовні позначки:

- 1 — вхідні дані: витрата палива, $q_{m,F}$, кг/с, з чистою питомою енергією, $e_{(N)}$, МДж/кг;
вхідні дані: викид газу (паливна складова), S [м³/МДж]
- 2 — обчислення: тепловиділення в процесі, $\Phi_{(N)F}$ [МВт] = $q_{m,F} e_{(N)} = P/\eta$
- 3 — вхідні дані (альтернативні): виробництво енергії, P , МВт, з тепловим ККД η
- 4 — обчислення: об'ємна витрата димових газів $q_{V,0d}$ [м³/с] = $S\Phi_{(N)F}$ (за
273,15 К, 101,325 кПа, 0 % об'ємної частки O₂, 0 % об'ємної частки H₂O)

Рисунок 6.Е.1 – Принцип обчислення витрати димового газу в залежності від енергоспоживання

6.Е.2 Паливна складова

6.Е.2.1 Фіксовані складові для видів викопного палива, що надходять у продаж

Необхідно визначити об'єм димових газів, що утворюються при спалюванні відомої кількості палива. Залежно від теплового навантаження паливна складова істотно не змінюється для даного виду палива, і часто може бути достатньо фіксованого значення. Об'єм сухого стехіометричного димового газу на 1 МДж чистої поданої енергії, S , для ряду видів палива наведено в таблиці 6.Е.1. Оцінювання невизначеності паливної сталої також наведено в таблиці на основі

порівняння корельованих значень з точним балансом маси для широкого спектру зразків. Коефіцієнти палива обчислюють відповідно до EN 12952-15 [7].

Паливна стала природного газу відповідає природному газу групи Н (EN 437:2003 [6]) за умови, що природний газ також відповідає визначенню Директиви 2010/75/EU [25], в якому вміст метану перевищує 80 %.

Таблиця 6.Е.1 – Паливні сталі для викопного палива

Паливна стала S	Тип палива			
	Природний газ	Газойль	Паливна олива	Кам'яне вугілля
$\text{м}^3/\text{МДж}$ за 0 % сухого O_2 273,15 К, 101,325 кПа	0,240	0,244	0,248	0,256
$U_{rel,95\%}$, %	$\pm 0,7$	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$

Примітка. Відносна невизначеність, U_{rel} , вказана з довірчою ймовірністю 95 %, що передбачає нормальне розподілення даних і коефіцієнт охоплення 1,96, якщо не вказано інше.

Сталу газойлю можна використовувати для газойлю, дизельного палива, легких дистилатів і гасу. Сталу мазуту можна використовувати для інших комерційно доступних нафтопродуктів від легкого до важкого мазуту.

Сталу для кам'яного вугілля можна використовувати для кам'яного вугілля, що надходить у продаж, і палива з чистої біомаси з вмістом вологи менше ніж 25 % за масою.

Менша невизначеність може бути досягнута для цих видів палива шляхом застосування поправки на чисту питому енергію (ЧПЕ) або шляхом визначення паливної сталої на основі складу палива, як описано нижче.

Паливні сталі для вологої біомаси наведені в таблиці 6.Е.2, яка також обчислена відповідно до EN 12952-15 [7]. Невизначеність пов'язана зі зміною вмісту вологи на ± 10 %, наприклад, вміст вологи в 30 % по масі охоплює діапазон вмісту вологи від 20 % до 40 %. За високого вмісту вологи невизначеність зростає нелінійно.

Таблиця 6.Е.2 – Паливні сталі для палива з біомаси

Вологість палива (масова частка в %)	20	30	40	50	60
Паливна стала, S , м ³ /МДж за 0 % сухого O ₂	0,260	0,267	0,276	0,290	0,314
Невизначеність, $U_{rel,95\%}$, % (масова частка вологи ± 10 %)	2,8	3,6	5,0	7,7	13,9

6.Е.2.2 Коефіцієнти з поправкою на питому енергію

Можна розглянути ширший діапазон видів палива і отримати меншу невизначеність, застосувавши поправку на ЧПЕ отриманого палива. «Як отримано»/«отриманого» – означає, що теплота згоряння палива вказана за умови, що присутні всі мінерали, які утворюють вологу та золу.

Поправка ЧПЕ взята зі стандарту EN 12952-15:2003 [2], додаток А:

$$S = \frac{a}{e_{(N)}} + b, \quad (6.E.1)$$

де $e_{(N)}$ – ЧПЕ отриманого палива, МДж/кг;

a, b – поправочні коефіцієнти, див. Таблицю 6.Е.3.

Таблиця 6.Е.3 – Поправочні коефіцієнти ЧПЕ

Параметр	Тип палива		
	Газ	Рідке	Тверде
a	0,64972	1,76435	-0,06018 w_f
b	0,22553	0,20060	0,25437 (1 + 2,4425 $w_{H_2O}/e_{(N)}$)

Для газоподібного палива, можливо, зручніше використовувати об'ємне значення ЧПЕ (МДж/м³ за 0 °С) у формулі (6.Е.1), у цьому випадку $a = 0,2$, $b = 0,234$. Цей підхід не підходить для газоподібного палива з низькою питомою енергією, для яких паливну сталу визначають на основі складу газу відповідно до EN 12952-15 [7], розділ 8.

Що стосується рідкого палива, то такий підхід придатний тільки для легких нафтових фракцій. Інші види рідкого палива оцінюють з використанням виміряного складу та теплотворної здатності, як описано в 6.Е.2.3.

Для твердих видів палива необхідно враховувати масові частки виходу золи w_{ash} та вологи w_{H_2O} в отриманому паливі, використовуючи масову частку сухого палива, що не містить золи w_f , де:

$$w_f = 1 - w_{ash} - w_{H_2O}, \quad (6.E.2)$$

Якщо ЧПЕ паливного потоку є змінною, невизначеність, пов'язану з мінливістю палива, слід оцінювати на основі декількох зразків палива. Цей метод не придатний для палива з виходом золи більше ніж 20 % по масі, в цьому випадку оцінювання ґрунтуватиметься на виміряному складі і теплотворній здатності, як описано в 6.E.2.3.

6.E.2.3 Фактори, що залежать від складу палива

Для твердого та рідкого палива в стандарті EN 12952-15:2003 [7], 8.3.4.2 також описано метод визначення питомої ваги палива $q_{V,od}$, м³/кг, в складі отриманого палива на основі остаточного аналізу:

$$q_{V,od} = 8,8930w_C + 20,9724w_H + 3,3190w_S - 2,6424w_O + 0,7997w_N, \quad (6.E.3)$$

де w – масова частка окремого компонента палива в поставленому паливі (у тому вигляді, в якому воно отримано);

C, H, S, O та N – елементи вуглецю, водню, сірки, кисню та азоту відповідно

Це значення ділять на $e_{(N)}$ для отримання питомої енергетичної паливної сталої S :

$$S = \frac{q_{V,od}}{e_{(N)}}, \quad (6.E.4)$$

Для неоднорідного твердого палива, для якого важко отримати репрезентативні зразки, рекомендовано перевіряти виміряну питому енергію, використовуючи обчислювальне значення $e_{(N)}$, МДж/кг, за наступними формулами.

$$e_{(N)} = e_{(G)} - 21,22w_H - 0,08 \cdot (w_O + w_N) - 2,4425w_{H_2O}, \quad (6.E.5)$$

Формула (6.E.5) взята зі стандарту ISO 1928 [2] і вимагає відомої $e_{(G)}$, валової питомої енергії, виміряної або обчисленої наступним чином.

$$e_{(G)} = 34,1w_C + 132,2w_H + 6,86w_S - 12w_O - 12w_N - 1,53w_{ash}, \quad (6.E.6)$$

Формула (6.Е.6) взята з [27]. Зверніть увагу, що методи отримання складу палива «як отримано» описані в стандарті ISO 1170 [1].

Якщо склад потоку палива є мінливим, то невизначеність, пов'язана з мінливістю складу палива, повинна бути оцінена за кількома зразками палива. У будь-якому випадку рекомендовано розглянути кілька зразків палива, щоб мінімізувати вплив невизначеності, пов'язаний з аналізуванням складу.

6.Е.3 Енергоспоживання

Для газоподібного та рідкого палива енергоспоживання, $\Phi_{(N)F}$, МВт, може бути визначено безпосередньо на основі вимірюного споживання палива $q_{m,F}$, кг/с, і вимірної або відомої ЧПЕ $e_{(N)}$, МДж/кг.

$$\Phi_{(N)F} = q_{m,F}e_{(N)}, \quad (6.Е.7)$$

За умови якісного обліку та визначення питомої енергії оціночна розширена невизначеність у найгіршому випадку становить $\pm 1,6 \%$, хоча, якщо це обґрунтовано, можна використовувати і нижчі значення.

Для твердого палива з безпосередньо вимірною витратою палива за допомогою, наприклад, каліброваних гравіметричних дозаторів та зі стабільним складом (питомою енергією) палива можна досягти подібної невизначеності. Однак у багатьох ситуаціях миттєве споживання палива та питома енергія недоступні, і в цьому випадку споживання енергії має бути отримане на основі потужності теплоелектростанції (ТЕС), P , МВт, та термічного ККД, η :

$$\Phi_{(N)F} = \frac{P}{\eta}, \quad (6.Е.8)$$

Невизначеність щодо термічного ККД повинна бути обґрунтована з метою відповідності вимогам. Наприклад, вугільна ТЕС з налагодженою системою обліку теплової енергії та управління паливом має розширену невизначеність миттєвого термічного ККД близько $\pm 5 \%$. Це значення може бути знижено приблизно до $\pm 3 \%$ при оперативному коригуванні обчислення ефективності з урахуванням змін в роботі ТЕС і умов навколишнього середовища. Для ТЕС із типовим тепловим ККД близько 90% ця невизначеність становить менше ніж 1% . Парогенеруюча установка на біомасі має вищий абсолютний термічний ККД і тому може досягти

нижчої розширеної невизначеності теплової потужності, як правило, від 2 % до 3 %, за умови, що вимірювання теплової потужності має низьку невизначеність.

6.Е.4 Обчислення об'ємної витрати димових газів X

Стехіометричну об'ємну витрату сухого димового газу за температури 273,15 К і тиску 101,325 кПа, $q_{V,0d}$, м³/с, обчислюють на основі паливної сталої, S , і теплової потужності $\Phi_{(N)F}$:

$$q_{V,0d} = S\Phi_{(N)F}, \quad (6.Е.9)$$

Для звітування про масові викиди цю об'ємну витрату димових газів коригують відповідно до необхідного стандартного контрольного вмісту кисню:

$$q_{V,0d,O_2,ref} = \frac{0,2095 \cdot q_{V,0d}}{0,2095 - \varphi_{O_2,ref}}, \quad (6.Е.10)$$

де $\varphi_{O_2,ref}$ – початкове значення вмісту сухого кисню для ТЕС у вигляді об'ємної частки сухої речовини.

Для котлів цей показник зазвичай становить 0,03 для газоподібного та рідкого палива та 0,06 для твердого палива, а для газових турбін – 0,15. Додаткові поправки необхідні при обчисленні витрати димових газів за умов вільного потоку в димовій трубі:

$$q_V = \frac{0,2095}{(0,2095 - \varphi_{O_2})} \cdot \frac{1}{(1 - \varphi_{H_2O})} \cdot \frac{T}{273,15} \cdot \frac{101,325}{p} \cdot q_{V,0d} \quad (6.Е.11)$$

де φ_{O_2} – вміст кисню в димових газах, об'ємна частка сухої речовини;

φ_{H_2O} – вміст води у димових газах, об'ємна частка вологи;

T – температура димових газів, К.

p – тиск димових газів, кПа.

6.Е.5 Експлуатаційні вимоги

Цільова загальна вимога до витрати сухих димових газів наведена за видами палива в таблиці 6.Е.4 або її визначають методом обчислення 6.Е.4 на основі паливної сталої 6.Е.2 та енергоспоживання 6.Е.3. Експлуатаційні вимоги наведені у вигляді розширених невизначеностей з достовірністю 95 %.

Таблиця 6.Е.4 – Експлуатаційні вимоги до розрахункового підходу

Паливо	Критерій
Газ	< 2,0 % від витрати
Рідке	< 3,0 % від витрати
Тверде	< 7,5 % від витрати

Експлуатаційні вимоги для основних обчислювальних параметрів наведені в таблиці 6.Е.5.

Таблиця 6.Е.5 – Експлуатаційні вимоги до основних вхідних параметрів

Параметр	Критерій	Метод визначення
Надходження енергії – за рахунок витрати палива		
Витрата палива	≤ 1,5 % від значення	Масовий або об'ємний витратомір з відстежуваним сертифікатом калібрування
Чиста питома енергія	≤ 0,5 % від значення	Визначення або калібрування приладу проводить лабораторія, акредитована, наприклад, за вимогами стандарту ISO/IEC 17025
Надходження енергії – на основі виробництва енергії		
Споживана потужність	≤ 0,5 % від значення	Лічильник електроенергії
Чистий тепловий ККД	≤ 5,0 % від значення	Тепловий баланс перевіряють шляхом тестування ефективності або річного споживання палива та виробництва енергії
Паливна стала		
Газ	≤ 1,0 % від значення	Визначення за складом палива, ЧПЕ або визначеною паливною сталою
Рідке	≤ 1,5 % від значення	
Тверде	≤ 7,5 % від значення	

6.Е.6 Приклад обчислень невизначеності

6.Е.6.1 Приклад 1 – вугільна ТЕС

Для обчислення масового викиду при базовому робочому навантаженні потрібна об'ємна витрата димових газів при вихідному значенні 6 % об'ємної частки сухого кисню, 273,15 К, 101,325 кПа.

Киснева корекція полягає в наступному

$$\frac{0,2095}{0,2095-0,06} = 1,40$$

Паливну сталу, $S = 0,256$, для кам'яного вугілля наведено в таблиці 6.Е.1, а теплове споживання визначають на основі електричної потужності ТЕС, $P = 500$

МВт, і термічного ККД, $\eta = 0,40$, для отримання об'ємної витрати за контрольних умов:

$$q_V = 1,4S \frac{P}{\eta} = 1,4 \cdot 0,256 \cdot \frac{500}{0,4} = 448 \text{ м}^3/\text{с}$$

Оскільки зв'язок між параметрами є лінійно пропорційним, достатньо об'єднати стандартні відносні невизначеності за допомогою простого середньоквадратичного підходу та коефіцієнта охоплення 2,0.

Паливна стала, S , стандартна невизначеність для кам'яного вугілля (таблиця 6.Е.1): 1,0 %

Вихідна потужність, P , стандартна невизначеність: 0,25 %

Термічний ККД, η , стандартна невизначеність: 2,5 %

Комбінований потік димових газів, q_V , розширена невизначеність:

$$2 \cdot \sqrt{1,0^2 + 0,25^2 + 2,5^2} = 5,4\%$$

6.Е.6.2 Приклад 2 – теплоелектростанція, що працює на біомасі

Для обчислення масового викиду потрібна об'ємна витрата димових газів при вихідному значенні 8 % об'ємної частки сухого кисню, 273,15 К, 101,325 кПа.

Киснева корекція полягає в наступному

$$\frac{0,2095}{0,2095 - 0,08} = 1,62$$

Паливо з біомаси має середній вміст вологи 50 % по масі з типовим відхиленням в ± 10 %. Оскільки невизначеність, пов'язана зі зміною вологості (таблиця 6.Е.2), є вищою, ніж бажана, відбирають зразки поставок і для кожної поставки проводять аналізування вологості з розширеною невизначеністю 5 % (за даними лабораторії). Вихід золи є стабільно низьким (2 % масова частка на сухій основі), а питома енергія та кінцеве аналізування сухого палива є незмінними (однорідне джерело біомаси). Стандартна невизначеність паливної сталої для кожного вимірювання може бути оцінена наступним чином.

- а) Помножують загальну питому енергію (ЗПЕ), $e_{(G)}$, сухого беззольного матеріалу (СБМ) на $(1 - w_{ash} - w_{H_2O})$, щоб отримати загальну питому енергію зразка вологого палива. Для зразка зі вмістом вологи 48 % і

виходом золи 2 % при загальному значенні питомої енергії сухого беззольного матеріалу 20 МДж/кг фактичне значення питомої енергії становить $20(1 - 0,02 - 0,48) = 10$ МДж/кг. Повторюють процедуру для значень вологості ± 5 %: 45,6 % вологості (10,48 МДж/кг) і 50,4 % вологості (9,52 МДж/кг).

- b) Обчислюють чисту питому енергію із загальної питомої енергії, використовуючи формулу (6.Е.5):

$$e_{(N)} = e_{(G)} - 21,22w_H - 0,08(w_O + w_N) - 2,4425w_{H_2O}$$

Масові частки палива, що використовують в цій формулі, обчислюють на основі значень сухого беззольного матеріалу, використовуючи виміряні значення вологості та зольності, з тим самим множником, що і раніше $(1 - w_{ash} - w_{H_2O})$. Частка сухого беззольного матеріалу в паливі СБМ для цього палива становить 0,06, а частка $(O + N) = 0,421$. Таким чином, значення $e_{(N)}$ варіюються від 8,852 МДж/кг (вологість 45,6 %) до 7,855 МДж/кг (вологість 50,4 %), при значенні вологості 48 % $e_{(N)}$ становить 8,354 МДж/кг.

- c) Обчислюють паливну сталу для кожного значення вологості за формулою (6.Е.1), використовуючи відповідні значення $e_{(N)}$ і параметри, a та b , для твердого палива. Для цих параметрів також потрібне значення відповідного вмісту води і золи. Тоді діапазон паливних сталей становить від 0,2828 до 0,2905 з паливною сталюю 0,2864 м³/МДж за вологості 48 %. Відносну стандартну невизначеність обчислюють з половини діапазону звичайним чином

$$[(0,2905 - 0,2828)/2/\sqrt{3}]/0,2864$$

та отримують 0,78 %. Це в поєднанні з додатковою стандартною невизначеністю 0,55 %, пов'язаною з використанням формули (6.Е.5), дає 0,96 %.

Зверніть увагу, що для менш однорідного палива може знадобитися визначення складу та/або питомої енергії зразків.

Теплову потужність визначають виходячи з ефективності ТЕС по пару ($P = 20$ МВт теплової енергії) і термічного ККД ($\eta = 0,9$), що дозволяє отримати об'ємну витрату за контрольних умов:

$$q_V = 1,62S \frac{P}{\eta} = 1,62 \cdot 0,2864 \cdot \frac{20}{0,90} = 10,31 \text{ м}^3/\text{с}$$

Оскільки зв'язок між параметрами є лінійно пропорційним, достатньо об'єднати стандартні відносні невизначеності за допомогою простого середньоквадратичного підходу та коефіцієнта охоплення 2,0.

Паливна стала, S , стандартна невизначеність для зразка біомаси (див. вище):
~1,0 %

Теплова потужність, P , стандартна похибка при калібруванні витратомірів і термопар: 2,5 %

Термічний ККД, η , стандартна похибка при аналізуванні ефективності котла:
2,0 %

Сумарна об'ємна витрата димових газів, q_V , розширена невизначеність:

$$2 \cdot \sqrt{1^2 + 2,5^2 + 2^2} = 6,7\%$$

6.Е.6.3 Приклад 3 – газотурбінна установка, що працює на природному газі

Для обчислення масового викиду потрібна об'ємна витрата димових газів при вихідному значенні 15 % об'ємної частки сухого кисню, 273,15 К, 101,325 кПа.

Киснева корекція полягає в наступному

$$\frac{0,2095}{0,2095-0,15} = 3,521$$

Паливну сталу, $S = 0,240$, для природного газу наведено в таблиці 6.Е.1, а теплову потужність визначають виходячи з дозованої витрати палива $q_{m,F} = 10$ кг/с, і вимірної чистої питомої енергії, $e_{(N)} = 50$ МДж/кг, що дає за контрольних умов значення об'ємної витрати:

$$q_V = 3,521 \cdot S q_{m,F} e_{(N)} = 3,521 \cdot 0,240 \cdot 10 \cdot 50 = 422,5 \text{ м}^3/\text{с}$$

Оскільки зв'язок між параметрами є лінійно пропорційним, достатньо об'єднати стандартні відносні невизначеності за допомогою простого середньоквадратичного підходу та коефіцієнта охоплення 2,0.

Паливна стала, S , стандартна невизначеність для природного газу (таблиця 6.Е.1): 0,35 %

Теплова потужність, P , стандартна похибка витратоміра для комерційного обліку та газового хроматографа: 0,8 %

Сумарна об'ємна витрата димових газів, q_V , розширена невизначеність:

$$2 \cdot \sqrt{0,7^2 + 0,8^2} = 2,1\%$$