

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Київський національний університет будівництва і архітектури

# **МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО ВІДБИТКУ СПОРУД ОЧИСТКИ СТІЧНИХ ВОД**

Методичні рекомендації  
до виконання індивідуальної роботи  
для студентів II освітнього рівня підготовки (магістр)  
спеціальностей 183 «Технології захисту  
навколишнього середовища» та 101 «Екологія»

Київ 2023

УДК 574.4

М54

Укладачі: О.С. Волошкіна, д-р техн. наук, професор;

О.Г. Жукова, канд. техн. наук, доцент;

Н.В. Негода, аспірант

Рецензент І.Б. Кордуба, канд. техн. наук, доцент

Відповідальний за випуск Т.М. Ткаченко, д-р техн. наук,  
професор

*Затверджено на засіданні кафедри охорони праці  
і навколишнього середовища, протокол № 8 від 14 лютого 2023 року.*

В авторській редакції.

**Методика** визначення вуглецевого відбитку споруд очистки  
М54 стічних вод: методичні рекомендації до виконання індивідуальної  
роботи / уклад.: О.С. Волошкіна та ін. – Київ: КНУБА, 2023. – 28 с.

Містять зміст, порядок оформлення і вказівки до виконання  
окремих розділів роботи.

Призначено для здобувачів II освітнього рівня підготовки  
(магістр) спеціальностей 183 «Технології захисту навколишнього  
середовища» та 101 «Екологія».

## ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ.....	4
1. ВУГЛЕЦЕВИЙ ВІДБИТОК ОЧИСНИХ СПОРУД.....	6
2. МЕТОДОЛОГІЇ ВИЗНАЧЕННЯ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ, РЕКОМЕНДОВАНІ РАМКОВОЮ КОНВЕНЦІЄЮ ООН ЩОДО ЗМІНИ КЛІМАТУ.....	10
2.1. Визначення викидів метану .....	10
2.2. Визначення викидів закису азоту під час розміщення осаду .....	15
2.3. Визначення викидів парникових газів, пов'язаних із виробництвом електроенергії .....	15
2.4. Визначення викидів парникових газів, пов'язаних зі споживанням палива .....	16
2.5. Визначення викидів парникових газів, пов'язаних із придбанням тепла зовнішніх джерел .....	17
2.6. Визначення викидів парникових газів, пов'язаних із перевезенням мулового осаду .....	19
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	21
ДОДАТКИ.....	23
Додаток 1 .....	23
Додаток 2.....	24
Додаток 3.....	26

## ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Індивідуальна робота виконується здобувачами II рівня освіти спеціальностей 183 «Технології захисту навколишнього середовища» та 101 «Екологія» відповідно до програми навчання з метою набуття ними практичного досвіду застосування моніторингової інформації для розрахунків вуглецевого відбитку каналізаційних очисних споруд та інших підприємств водовідведення. Виконання роботи сприяє вмінню застосовування навичок з питань взаємозв'язку сталого розвитку будівельної галузі та глобальних кліматичних змін; оцінками, інструментами та моделями визначення цього взаємозв'язку, зменшення вуглецевого сліду як механізм адаптації до змін клімату для сталого розвитку урбанізованих територій.

В індивідуальному завданні передбачається засвоєння застосування отриманих навичок при відновленні споруд водовідведення, які потребують ремонту та реконструкції.

*Вуглецевий відбиток* як складова екологічного відбитку – це сукупність викидів парникових газів (ПГ), що прямо або опосередковано вироблено внаслідок діяльності підприємства протягом його життєвого циклу. Оцінка вуглецевого відбитку визначається шляхом розрахунку перед усім діоксиду вуглецю, метану, закису азоту та фтормістних речовин. Від цього залежить насамперед ефективність споруд очистки стічних вод у розрізі енергетичних витрат на проведення процесу очищення.

Вперше необхідність розробки індикаторів сталого розвитку було зазначено на Конференції ООН в Ріо-де-Жанейро в 1992 р. З того часу розробка показників сталого розвитку прямує двома шляхами:

1. Через будову системи індикаторів, або, іншими словами, груп показників, що характеризують екологічний, економічний і соціальний розвиток.

2. Через формування інтегральних показників, які комплексно оцінюють ситуацію в даному районі, галузі тощо.

Так звані «відбитки», екологічний і вуглецевий, – це приклади інтегральних показників; індикатор «екологічний відбиток» був розроблений у 1995 р. на основі концепції про асиміляційну ємність біосфери.

Екологічний відбиток щодо споруд водопостачання та водовідведення загалом зводиться до розрахунку вуглецевого відбитку.

Процес визначення вуглецевого відбитку передбачає такі етапи:

1. Визначення часових і просторових меж оцінки (період оцінки, етапи виробництва).

2. Аналіз етапів життєвого циклу.

3. Визначення існуючих правил оцінки, характерних для певного виробничого процесу, галузі тощо.

4. Пошук інформації щодо кожного технологічного процесу (інформація про ресурси, які споживаються, а саме енергетичних, власний виріб енергії, відходи тощо).

5. Верифікації.

Індивідуальне завдання виконують у вигляді розрахунково-пояснювальної записки, з окремими графічними фрагментами.

## 1. ВУГЛЕЦЕВИЙ ВІДБИТОК ОЧИСНИХ СПОРУД

Визначення вуглецевого відбитку будь-якого підприємства вперше було запропоновано Інститутом світових ресурсів [1]. Залежно від масштабу охоплення процесів розрізняють три наближення:

*Наближення 1.* Підрахунок викидів ПГ обмежується тільки виробничим майданчиком підприємства. Це безпосередньо можуть бути викиди з труб (організованих джерел викидів) і викиди неорганізовані (наприклад, витік хладонів із холодильників або кондиціонерів).

*Наближення 2.* У цьому випадку враховується вся електрична та теплова енергія, що виробляється на промисловому майданчику. Оскільки зазвичай маємо централізоване електропостачання, в даному наближенні викиди ПГ визначаються шляхом множення величини енергії, що споживається на деякий національний коефіцієнт, який визначає викиди ПГ в CO<sub>2</sub>-еквіваленті на одиницю (кіловат-год) електроенергії, що споживається.

*Наближення 3.* Враховуються викиди ПГ поза виробничим майданчиком, що не пов'язані з регенерацією енергії на підприємстві. Наприклад, це викиди ПГ від транспорту, який використовується на підприємстві. Можуть бути також враховані викиди від виробництва матеріалів, які використовуються підприємством. Так, для будівельної компанії, наприклад, це виробництво цементу і цегли, які використовуються в процесі будівництва будівель і споруд.

Для комунальних очисних споруд наближення 1 враховує:

- викиди ПГ в процесі очистки стічних вод;
- викиди від палива, що закупається для процесу очистки;
- викиди від транспортних операцій в межах виробничого майданчика.

До неорганізованих викидів ПГ відносяться:

- викиди метану (CH<sub>4</sub>) внаслідок анаеробних процесів у первинних відстійниках;

- викиди закису азоту (N<sub>2</sub>O) внаслідок процесів нітрофікації і денітрофікації;

- викиди метану в процесах зброджування та компостування осаду, передачі газу трубами, компостування, розміщення на мулових майданчиках і полігонах.

У наближенні 2 враховуються викиди ПГ під час виробництва підприємством електроенергії (вона витрачається на перекачування стічних

вод, аерацію, здійснення виробничих приміщень і майданчики, ультрафіолетове знезараження), а також пов'язані з виробництвом енергії, яка витрачається у формі тепла, пари, холоду і т.д.

У наближенні 3 враховуються всі викиди ПГ, які не враховані в наближеннях 1 та 2, але пов'язані з виробничим процесом. Це насамперед транспортування персоналу (особистий та громадський транспорт), а також доставка необхідних для очищення стічних вод видаткових матеріалів (хімічні реагенти, запчастини). У низці моделей враховуються також викиди парникових газів у процесі виробництва реагентів. У цьому випадку важливо правильно вибрати «місце обліку», щоб не було подвійного рахунку. Так, якщо солі металів (заліза або алюмінію) використовуються для видалення фосфору зі стічних вод, то викиди ПГ під час їх виробництва мають бути враховані у вуглецевому сліді комунальних очисних споруд. Аналогічна ситуація виникає з іншими реагентами (метанолом, флокулянтами).

Джерелами викидів на комунальних очисних спорудах є:

- метану – анаеробні процеси у первинних відстійниках, ущільнення та зневоднення осаду на мулових майданчиках, витоку при зброджуванні осаду в метантенках, розміщення осаду на полігонах;
- закису азоту – процеси нітрифікації та денітрифікації.

Відповідно до прийнятих підходів обліку ПГ не враховується викид вуглекислого газу, що утворюється в процесах очищення стічних вод і спалювання мулового осаду. Вважається, що той вуглець, який викидається в атмосферу при розкладанні органічних речовин, присутніх у стічних водах, при створенні біомаси атмосфери було вилучено. Подібне припущення приймається і при відмові від обліку викидів вуглекислого газу, що утворюються під час спалювання біопалива, одержуваного з таких відновлюваних джерел, як деревина, очерет або водорості.

На рис. 1 показано в загальному вигляді найбільш поширена схема біологічної очистки стічних вод. Біореактор з активним мулом є або простим аеротенком, або, залежно від поставленого завдання біологічного видалення сполук азоту та фосфору, комбінацією анаеробних, аноксидних та аеробних зон.

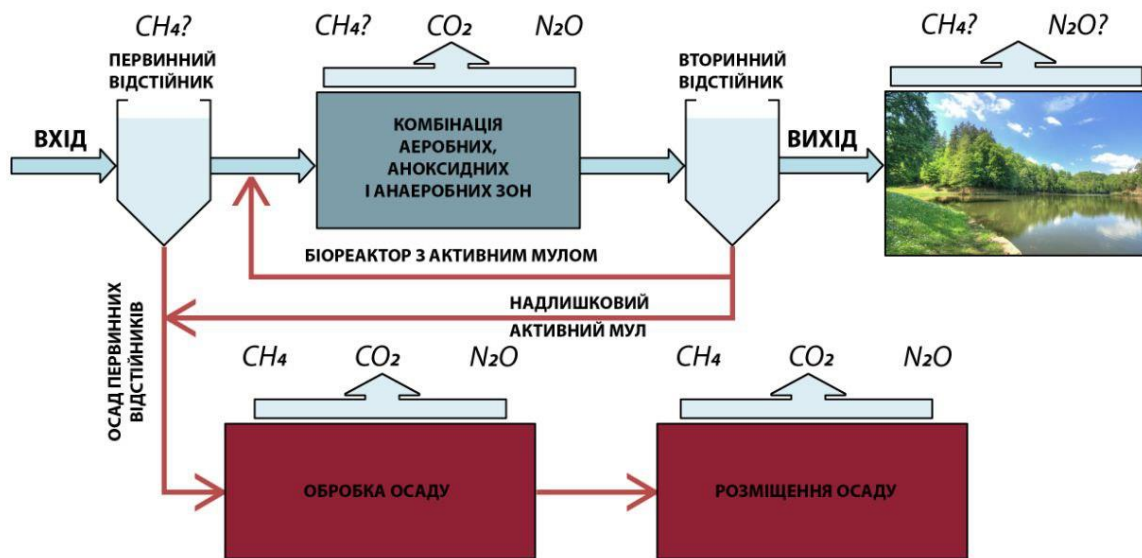


Рис. 1. Схема біологічної очистки стічних вод

Первинний відстійник може бути джерелом викидів метану у разі, якщо осад довгий час не вивантажується і піддається анаеробному розкладанню. Біореактор зазвичай джерелом метану не є, оскільки мул циркулює між різними зонами і час його перебування в анаеробній зоні незначний. Утворення метану в біореакторі з активним мулом є ознакою перевантаження очисних споруд та утворення застійних зон, де відбувається загнивання активного мулу. Закис азоту в реакторі утворюється у процесах нітрифікації та денітрифікації. Основними джерелами утворення метану є процеси обробки та розміщення осаду. У табл. 1 наведено основні джерела врахування викидів парникових газів [2, 3, 4].

Таблиця 1

**Джерела викидів ПГ на комунальних очисних спорудах [2, 3, 4]**

Джерело	Газ	Чи входить в розрахунок	Обґрунтування
1	2	3	4
Очищення стічної води та переробка осаду	CH <sub>4</sub>	Так	Головне джерело викидів головним чином у процесах нітрифікації та денітрифікації
	N <sub>2</sub> O	Так	Якщо муловий осад вноситься в ґрунт для добрива і поліпшення її структури, він також може бути важливим джерелом викиду закису азоту



1	2	3	4
	CO <sub>2</sub>	Ні	Викиди CO <sub>2</sub> від розкладання органічної речовини не враховуються
Генерація електричної і теплової енергії	CO <sub>2</sub>	Так	Викиди, пов'язані з виробництвом електричної та теплової енергії, походять від: а) електричної та теплової енергії, що купується, використовуваної для очищення стічної води та обробки осаду; б) електричної та теплової енергії, що виробляється з копалин палива на майданчику. У тому разі, якщо частина електричної та теплової енергії виробляється при спалюванні осаду або використанні біогазу, ця частина при визначенні викидів ПГ не враховується
	CH <sub>4</sub>	Ні	Вплив незначний
	N <sub>2</sub> O	Ні	Вплив незначний
Транспортування мулового осаду	CO <sub>2</sub>	Так	Викиди від транспортування осаду можуть включатися
	CH <sub>4</sub>	Ні	Вплив незначний
	N <sub>2</sub> O	Ні	Вплив незначний
Використання транспорту для інших цілей	CO <sub>2</sub>	Так	Викиди від транспортних послуг можуть включатися
	CH <sub>4</sub>	Ні	Вплив незначний
	N <sub>2</sub> O	Ні	Вплив незначний
Використання реагентів	CO <sub>2</sub>	Так	Може включатися
	CH <sub>4</sub>	Ні	Для простоти виключено. Хоча у низці випадків потрібно аналізувати процес виробництва реагенту
	N <sub>2</sub> O	Ні	Для простоти виключено. Хоча у низці випадків потрібно аналізувати процес виробництва реагенту
Скидання стічних вод у водний об'єкт після очищення	CO <sub>2</sub>	Ні	Викиди CO <sub>2</sub> від розкладання органічної речовини не враховуються.
	CH <sub>4</sub>	Так	Може враховуватися, якщо рівень очищення від органічних речовин не відповідає нормативній.
	N <sub>2</sub> O	Ні	Це джерело викидів передбачається дуже малим

**Запитання для самопідготовки:**

1. Дайте визначення вуглецевому відбитку.
2. Які наближення до розрахунку вуглецевого відбитку очисних споруд використовуються, і що вони включають?

3. Проаналізувати найбільш традиційну схему очищення стічних вод і основні джерела утворення ПГ в ці схемі.

4. Назвіть основні джерела викидів, що враховуються при визначенні загального викиду ПГ на комунальних очисних спорудах.

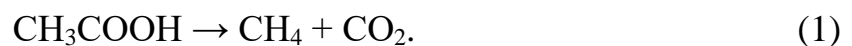
## **2. МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ, РЕКОМЕНДОВАНІ РАМКОВОЮ КОНВЕНЦІЄЮ ООН ЩОДО ЗМІНИ КЛІМАТУ**

### **2.1. Визначення викидів метану**

Потенціал глобального потепління метану відносно вуглекислого газу дорівнює 25 згідно з [5]. Частка метану в загальних викидах парникових газів при очищенні стічних вод та обробці осаду може становити до 75 % CO<sub>2</sub>-екв. [5]. Оскільки метан генерується при анаеробному розкладанні органічних речовини, його викиди зазвичай пов'язуються з параметрами органічного забруднення стічних вод.

Анаеробні мікроорганізми без розчиненого кисню переводять органічну речовину у вугіллі кислий газ і метан. Процес розкладання передбачає дві пов'язані між собою фази: утворення кислот і метану. Протягом «кислотної» фази бактерії перетворюють складні органічні речовини (вуглеводи, жири, протеїни) у простіші. Цими речовинами є леткі органічні кислоти: оцтова, пропіонова, молочна. Наступною фазою є утворення метану. Спочатку бактерії переводять органічні кислоти в ацетат, водень і вуглекислий газ. Далі, утворення метану за участю метаногенних мікроорганізмів йде двома шляхами:

1. Розклад оцтової кислоти з утворенням метану та вуглекислого газу:



2. Відновлення вуглекислого газу воднем з утворенням метану:



Утворення метану в анаеробних реакторах може відбуватися у досить вузькому діапазоні зовнішніх умов, основними з яких є температура та кислотність середовища (pH).

Такі ж мікробіологічні процеси протікають у метантенках для зброджування мулу. Відмінність полягає в тому, що в метантенках концентрація зважених речовин у багато разів вища, ніж у анаеробних реакторах.

Можливе виникнення анаеробних процесів і загнивання осаду в первинних відстійниках. Це відбувається у тих випадках, коли первинний сирий осад не вивантажується вчасно.

### ***Викиди метану при очищенні стічних вод в анаеробних умовах***

Згідно з методикою Міжурядової групи експертів зі зміни клімату [6], викиди метану при очищенні стічних вод анаеробних умовах визначаються залежністю:

$$E_{CH_4,wwt,an,y} = (Q_{an,y} * \Delta COD_{an,y} * MCF_{ww}) * B_{ww} * GWP_{CH_4}, \quad (3)$$

де  $E_{CH_4,wwt,an,y}$  – річні викиди метану при анаеробному очищенні стічних вод в тоннах CO<sub>2</sub>-екв.;  $Q_{an,y}$  – обсяг стічних вод (м<sup>3</sup>), що проходить через анаеробну частину очисних споруд за певний проміжок часу (рік);  $\Delta COD_{an,y}$  – зміна ХПК у стічній воді в анаеробних процесах за рік (т/м<sup>3</sup>). Для визначення даної величини, крім величини ХПК стічної води на вході в очисні споруди необхідно знати величину ХПК після первинних відстійників. Чим більша частка ХПК витрачається в анаеробних умовах первинного відстійника, тим більші будуть викиди метану. Проте, варто значити, що у разі правильно організованого процесу стадії аеробної очистки в аеротенках, викиди метану будуть незначними;  $MCF_{ww}$  – середньорічний коефіцієнт конверсії для метану, що показує частину органічної речовини, яка буде перетворена на метан. Залежить у тому числі від конструкції. Для малих очисних споруд можна використати табл. 2 [6];  $B_{ww}$  – питомий вихід метану при розпаді ХПК у стічній воді. Тобто величина, що показує, яка максимальна кількість метану буде утворена при заданому зменшенні ХПК (кг CH<sub>4</sub>/кг ХПК);  $GWP_{CH_4}$  – потенціал глобального потепління для метану.

**Значення коефіцієнтів конверсії метану  
залежно від типу очисних споруд [6]**

Тип очисних споруд	$MCF_{ww}$ (побутові стічні води)	Діапазон змін (побутові стічні води)	$MCF_{ww}$ (промислові стічні води)	Діапазон змін (промислові стічні води)
Скидання стічних вод без очищення в водний об'єкт	0,1	0-0,2	0,1	0-0,2
Добре організована аеробна очистка	0	0-0,1	0	0-0,1
Погано організоване або перевантажене аеробне очищення	0,3	0,2-0,4	0,3	0,2-0,4
Анаеробне зброджування осаду без утилізації метану	0,8	0,8-1,0	0,8	0,8-1,0
Анаеробний реактор без утилізації метану	0,8	0,8-1,0	0,8	0,8-1,0
Дрібний анаеробний відстійник (глибина менше 2 м)	0,2	0-0,3	0,2	0-0,3
Глибокий анаеробний відстійник (глибина понад 2 м)	0,8	0,8-1,0	0,8	0,8-1,0

Кількість метану, що утворився у відкритому відстійнику, залежить від його глибини та температури стічних вод у відстійнику. Тому, середньорічний множник конверсії для метану визначається як добуток двох параметрів:  $f_d$ , що визначає залежність інтенсивності утворення метану від глибини, і  $f_{T,y}$ , що визначає температурну залежність інтенсивності утворення метану:

$$MCF_{ww} = f_d * f_{T,y}. \quad (4)$$

Для коефіцієнта  $f_d$  методологія [6] рекомендує такі значення: за глибини відстійника понад 5 м величина  $f_d$  приймається рівною 0,7, за глибини від 1 до 5 м –  $f_d = 0,5$ , за глибини менше 1 м –  $f_d = 0$ .

Оскільки в багатьох регіонах температура стічної води може значно змінюватися протягом року, множник  $f_{T,y}$  має обчислюватися як інтеграл від щомісячних значень температурного коефіцієнта  $f_{T,m}$  і з урахуванням того, як багато кисню було витрачено в цьому місяці на розкладання органічних речовин. Величина середньомісячного коефіцієнта, що визначає інтенсивність утворення метану залежно від температури, визначається за допомогою рівняння Арреніуса, яке встановлює залежність константи швидкості хімічної реакції від температури:

$$f_{T,m} = 0, \text{ якщо } T_m < 283\text{K}; \quad (5)$$

$$f_{T,m} = \exp\left(\frac{E_a \times (T_m - T_1)}{R \times T_m \times T_1}\right), \text{ якщо } 283\text{K} < T_m < 303\text{K}; \quad (6)$$

$$f_{T,m} = 1, \text{ якщо } T_m > 303\text{K}, \quad (7)$$

де  $f_{T,m}$  – середньомісячний коефіцієнт, що визначає інтенсивність утворення метану від температури стічної води в анаеробній зоні;  $E_a$  – константа енергії активації (63,533 Дж/моль);  $T_1$  – 303,16 К (273,16 К +30 К);  $R$  – газова стала (8,314 Дж/К\*моль);  $T_m$  – середня температура стічної води в анаеробній зоні (К). Температура в кельвінах (Т) і температура в градусах Цельсія (t, °С) пов'язані співвідношенням  $T = t + 273,15$ .

Як очевидно з рівняння (6), величина температурного коефіцієнта неспроможна перевищувати 1, а за температури нижче 10 °С – приймається рівною нулю.

Величина  $B_{ww}$  – питомий вихід метану при розпаді ХПК стічної води дорівнює співвідношенню 0,25 кг СН<sub>4</sub>/кг ХПК<sub>12</sub>.

### ***Виділення метану при обробці осаду***

Кількість метану, що виділяється, залежить від способу обробки осаду. Якщо осад розміщується на муловій майданчику чи полігоні, то для визначення викидів метану з осаду за рік застосовується рівняння:

$$E_{CH_4,wwt,sl,y} = M_{sl,dry,y} \times MCF_{sl} \times DOC_{sl,dry} \times DOC_F \times F \times 16/12 \times GWP_{CH_4}, \quad (8)$$

де  $E_{CH_4,wwt,sl,y}$  – викиди метану при розкладанні осаду (т CO<sub>2</sub>-екв./рік);  $M_{sl,dry,y}$  – маса сухої речовини в осаді (т/рік);  $MCF_{sl}$  – коефіцієнт конверсії метану, що залежить від умов розміщення осаду;  $DOC_{sl,dry}$  – розклад органічної частини сухого осаду, розміщеного протягом року. Рекомендовані [6] значення становлять: 0,5 для мулового осаду господарсько-побутових стічних вод і 0,257 для промислових стічних вод;  $DOC_F$  – частка органічної речовини, що розкладається, перетвореного на біогаз. Рекомендоване значення становить 0,5; 16/12 – співвідношення молярних мас метану та вуглецю;  $GWP_{CH_4}$  – потенціал глобального потепління для метану.

Якщо осад очисних споруд підсушується за контрольованих аеробних умов і потім розміщується на полігоні з утилізацією метану, що виділяється, або використовується для добрива та поліпшення складу ґрунту, то відповідні викиди метану вважаються недбало малими, і для такої схеми обробки осаду приймаються  $E_{CH_4,wwt,sl,y} = 0$ .

#### ***Визначення викидів метану у разі обробки осаду у новому метантенку***

Для визначення парникового ефекту внаслідок витоків метану з метантенка у методиці [6] пропонується рівняння:

$$E_{CH_4,wwt,digest,y} = F_{biogas,y} \times FL_{biogas,digest} \times W_{CH_4,biogas,y} \times GWP_{CH_4} \times 0,001, \quad (9)$$

де  $E_{CH_4,wwt,digest,y}$  – викиди метану внаслідок витоків із метантенка (т CO<sub>2</sub>-екв./рік);  $F_{biogas,y}$  – кількість біогазу, зібране на виході з метантенка на рік (м<sup>3</sup>);  $FL_{biogas,digest}$  – частка біогазу, що йде в атмосферу з метантенка. [6] рекомендує величину, що дорівнює 0,05 м<sup>3</sup> біогазу, що йде в атмосферу на 1 м<sup>3</sup> виробленого біогазу;  $W_{CH_4,biogas,y}$  – концентрація метану в біогазі на виході з метантенка (кг CH<sub>4</sub>/м<sup>3</sup>);  $GWP_{CH_4}$  – потенціал глобального потепління метану; 0,001 – коефіцієнт перерахунку тонн у кілограми.

Виділення метану в зонах аеробного очищення не має відбуватися. Тільки в умовах перевантаженості очисних споруд або поганого управління

процесом можуть з'являтися області дефіциту кисню, де може відбуватися загнивання мулу з виділенням метану.

Крім того, в очищеній стічній воді, яка надходить у водний об'єкт, що приймає, містяться залишкові концентрації органічних речовин. Ці органічні речовини можуть залежно від властивостей водного об'єкта піддаватися анаеробному загниванню з виділенням метану. Розрахунок проводиться за умови ефективності очищення за ХПК – співвідношення між величиною окисленої органічної речовини в аеробній зоні і кількістю органічної речовини, що надійшли в аеробну зону протягом  $i$ -того дня рік становить понад 0,8.

## 2.2. Визначення викидів закису азоту під час розміщення осаду

Викиди закису азоту ( $N_2O$ ) враховуються для осаду мулу в тому у разі, якщо муловий осад вноситься в ґрунт для добрива та покращення його структури.

У цьому випадку застосовується рівняння:

$$E_{N_2O,sl,y} = M_{sl,dry,y} * w_{N,sl,y} * EF_{N_2O,sl,land} * 44/28 * GWP_{N_2O}, \quad (10)$$

де  $E_{N_2O,sl,y}$  – викиди  $N_2O$  від внесеного в ґрунт осаду на рік (т  $CO_2$ -екв./рік);  $M_{sl,dry,y}$  – маса мулового осаду, внесеного у ґрунт протягом року (т);  $w_{N,sl,y}$  – масова частка азоту в муловому осаді, внесеному в ґрунт (т N/т осаду);  $EF_{N_2O,sl,land}$  – коефіцієнт конверсії  $N_2O$  при розкладанні мулового осаду, внесеного в ґрунт. Використовується середній коефіцієнт конверсії, що дорівнює 0,01 т  $N_2O$ -N/т  $N_{16}$  [7]. 44/28 – величина, зворотна масовій частці азоту  $N_2O$ ;  $GWP_{N_2O}$  – потенціал глобального потепління для закису азоту (298).

У тому разі, якщо муловий осад висушується за контрольованих аеробних умов і потім розміщується на полігоні або переробляється в новому анаеробному метантенку, він зневоднюється і зберігається до остаточного розміщення на полігоні,  $E_{N_2O,sl,y} = 0$ .

## 2.3. Визначення викидів парникових газів, пов'язаних із виробництвом електроенергії

Найбільш загальне рівняння визначення викидів парникових газів можна представити у вигляді [8]:

$$E_{electr,y} = \sum_j C_{electr,j,y} * EF_{electr,j,y}, \quad (11)$$

де  $E_{electr,y}$  – викиди парникових газів, пов’язані зі споживанням електроенергії протягом року  $y$  (т  $CO_2$ /рік);  $C_{electr,j,y}$  – кількість електроенергії, спожитої на майданчику комунальних очисних споруд протягом року  $y$  від джерела  $j$  (МВт год/рік);  $EF_{electr,j,y}$  – середньорічний коефіцієнт викидів  $CO_2$  для джерела електроенергії  $j$  протягом року  $y$  (т  $CO_2$ /МВт год);  $j$  – кількість джерел електричної енергії.

Залежно від наявності у мережі «брудних» (ТЕЦ, що працюють на викопному паливі) і «чистих» (гідроелектростанції, вітрова і сонячна генерація, ТЕЦ, що працюють на відновлюваному паливі) джерел величина  $EF_{electr,j,y}$  може змінюватися від 1,3 т  $CO_2$ /МВт год до 0,25 т  $CO_2$ /МВт год.

#### **2.4. Визначення викидів парникових газів, пов’язаних зі споживанням палива**

Якщо на виробничому майданчику для виробничих потреб (отримання пари, гарячої води, опалення) проводиться спалювання палива, викиди парникових газів ( $CO_2$ ) можуть бути визначені за рівнянням [8]:

$$E_{FC,j,y} = \sum_i FC_{i,j,y} * COEF_{i,y}, \quad (12)$$

де  $E_{FC,j,y}$  – викиди в процесі спалювання  $j$  протягом року  $y$  (т  $CO_2$ /рік);  $FC_{i,j,y}$  – кількість палива типу  $i$ , використаного в процесі спалювання  $j$  протягом року  $y$  (одиниця маси чи обсягу);  $COEF_{i,y}$  – коефіцієнт викидів  $CO_2$  від спалювання викопного палива  $i$ , протягом року  $y$  (т  $CO_2$ /одиниця маси або обсягу);  $i$  – усі види палива, використаного у процесі спалювання  $j$  протягом року  $y$ .

Величина коефіцієнта викидів  $COEF_{i,y}$  може бути розрахована залежно від наявності даних про тип викопного палива  $i$ .

Якщо кількість палива  $FC_{i,j,y}$  вимірюється в одиницях маси, то:

$$COEF_{i,y} = w_{C,i,y} * 44/12. \quad (13)$$

Якщо кількість палива  $FC_{i,j,y}$  вимірюється в одиницях обсягу, то:



$$COEF_{i,y} = w_{C,i,y} * \rho_{i,y} * 44/12, \quad (14)$$

де  $w_{C,i,y}$  – середня масова частка вуглецю в паливі типу  $i$  протягом року  $y$  ( $T, ^\circ C$ / одиниця маси палива);  $\rho_{i,y}$  – середня щільність палива типу  $i$  протягом року  $y$  ( $t C$ / одиниця об'єму палива);  $44/12$  – відношення молярних мас вуглекислого газу ( $CO_2$ ) і вуглецю ( $C$ ).

Отримана внаслідок спалювання осаду теплова або електрична енергія віднімається з загальної потреби комунальних споруд у енергії, що купується із зовнішніх джерел.

## 2.5. Визначення викидів парникових газів, пов'язаних із придбанням тепла зовнішніх джерел

У тому разі, якщо потреба в теплі задовольняється за рахунок імпорту з окремої джерела (наприклад, котельні або ТЕЦ), розрахунок викидів парникових газів має включати втрати при транспортуванні. Як і в попередньому випадку, враховуються лише викиди  $CO_2$ .

Якщо тепло поставляється від єдиного джерела, маємо формулу [8]:

$$E_{CO_2,heat,y} = HC_y * EF_{CO_2,heat,y} * (1 + \delta_{net}), \quad (15)$$

де  $E_{CO_2,heat,y}$  – викиди вуглекислого газу від спожитого тепла протягом року  $y$  ( $t CO_2$ /рік);  $HC_y$  – величина спожитого тепла на майданчику за рік (ГДж);  $EF_{CO_2,heat,y}$  – коефіцієнт викидів вуглекислого газу при генерації тепла на джерелі – постачальник теплової енергії ( $t CO_2$ -екв./ГДж);  $\delta_{net}$  – коефіцієнт втрат тепла в мережі ( $y$  частках одиниці).

Розрахунок за рівнянням (15) легко можна виконати, якщо джерелом є котельня. У цьому разі можна вважати, що:

$$EF_{CO_2,heat,y} = EF_{CO_2,i,y} / \mu_{boiler,i}, \quad (16)$$

$$E_{CO_2,heat,y} = HC_y * EF_{CO_2,i,y} / \mu_{boiler,i} * (1 + \delta_{net}), \quad (17)$$

де  $E_{CO_2,heat,y}$  – викиди вуглекислого газу від спожитого тепла протягом року  $y$  ( $t CO_2$ /рік);  $\mu_{boiler,i}$  – коефіцієнт корисної дії котельні, що працює на паливі  $i$ , в частках одиниці;  $EF_{CO_2,i,y}$  – середній коефіцієнт викидів  $CO_2$  для

викопного палива  $i$  за рік  $y$  (т CO<sub>2</sub>-екв./ГДж);  $\delta_{net}$  – коефіцієнт втрат тепла в мережі (у частках одиниці).

У тому разі, коли теплопостачання здійснюється від ТЕЦ, величину  $EF_{CO_2,i,y}$  визначити дещо складніше, оскільки ТЕЦ виробляє і тепло, і електроенергію. У цьому випадку важливим параметром є співвідношення між всією виробленою тепловою та електричною енергією протягом року:

$$\theta_y = HG_{y,total} / (EG_{y,total} * 3,6), \quad (18)$$

де  $\theta_y$  – співвідношення між виробленою тепловою та електричною енергією протягом року  $y$ . Ця величина для конкретної ТЕЦ є відомою та однаковою для всіх споживачів;  $HG_{y,total}$  – загальна кількість тепла, яке вироблене на ТЕЦ протягом року  $y$  (ГДж);  $EG_{y,total}$  – загальна кількість електроенергії, вироблена на ТЕЦ протягом року  $y$  і на спрямована в мережу (МВт год); 3,6 – переводний коефіцієнт (ГДж/МВт год).

Кількість виробленого тепла можна пов'язати із кількістю спожитого палива  $i$  через співвідношення:

$$HG_y / \mu_{heat,i} + EG_y / \mu_{electr,i} = FC_{i,y} * NCV_{i,y}, \quad (19)$$

де  $\mu_{heat,i}$  – коефіцієнт корисної дії по теплу ТЕЦ, що працює на паливі  $i$ ;  $\mu_{electr,i}$  – коефіцієнт корисної дії по електриці ТЕЦ, що працює на паливі  $i$ ;  $FC_{i,y}$  – кількість палива типу  $i$ , використаного  $j$  протягом року  $y$  (одиниця маси або обсягу);  $NCV_{i,y}$  – середня нижча теплотворна здатність викопного палива  $i$ , за рік  $y$  (ГДж/ одиниця маси чи обсягу).

Остаточне рівняння для розрахунку викидів CO<sub>2</sub>, обумовлених споживанням тепла  $HS_y$ , виробленого на ТЕЦ:

$$EFC_{y,y} = HS_y * ( 1/ \mu_{heat,i} + 1/(3,6*\theta_y*\mu_{electr,i}) ) * EF_{CO_2,i,y} * (1 + \delta_{net}). \quad (20)$$

Величини коефіцієнтів викидів CO<sub>2</sub> для викопного палива різних видів можна знайти в довідковому посібнику [8], а також в інших посібниках з питань оцінки впливу ПГ на зміну клімату [9].

## 2.6. Визначення викидів парникових газів, пов'язаних із перевезенням мулового осаду

Якщо муловий осад транспортується автотранспортом до місць поховання або переробки, враховуються викиди парникових газів при згорянні автомобільного палива. Найбільше вплив на парниковий ефект надають викиди вуглекислого газу, тому викидами інших парникових газів нехтують.

Розрахунок викидів CO<sub>2</sub> здійснюється за рівнянням:

$$E_{TR,sl,y} = \sum_j \sum_i N_{i,y} * D_{i,y} * F_{i,y} * NCV_{j,y} * EF_{j,y}, \quad (21)$$

де  $E_{TR,sl,y}$  – викиди CO<sub>2</sub>, пов'язані перевезенням мулового осаду протягом року  $y$  (т CO<sub>2</sub>/рік);  $N_{i,y}$  – число поїздок (транспортним засобом типу  $i$  з однаковою вантажопідйомністю) для перевезення мулового осаду протягом року  $y$  (поїздок);  $D_{i,y}$  – середня відстань перевезення мулового осаду транспортним засобом типу  $i$  протягом року  $y$  (км);  $F_{i,y}$  – питоме споживання палива транспортним засобом типу  $i$  протягом року  $y$  (одиниця маси або об'єму/км);  $NCV_{j,y}$  – нижча теплотворна здатність автомобільного палива  $j$  протягом року  $y$  (ГДж /одиниця маси чи обсягу);  $EF_{j,y}$  – коефіцієнт викидів CO<sub>2</sub> автомобільного палива  $j$  протягом року  $y$  (т CO<sub>2</sub>/ГДж);  $i$  – тип транспортного засобу;  $j$  – вид автомобільного палива.

Число поїздок автомобіля типу  $i$  визначається як:

$$N_{i,y} = Q_{sl,y} / q_i, \quad (22)$$

де  $Q_{sl,y}$  – маса мулу, вироблена на майданчику і призначена до вивезення протягом року (т);  $q_i$  – середня вантажопідйомність транспортного засобу типу  $i$  протягом року  $y$  (т/поїздка).

Чисельні значення коефіцієнтів викидів CO<sub>2</sub> можуть бути знайдені в посібниках Міжурядової групи експертів зі зміни клімату та ІРРС [10,11].

### **Завдання для самопідготовки:**

1. Знайти вуглецевий відбиток, слід, зумовлений імпортованою електроенергією, споживаної на виробничому майданчику та в офісних приміщеннях згідно з дод. 1.

2. Визначити вуглецевий відбиток, обумовлений споживанням теплової енергії на комунальних очисних спорудах згідно з дод. 2.

3. Визначити вуглецевий відбиток, обумовлений використанням автомобільного транспорту згідно з дод. 3.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. World Resources Institute. The greenhouse gas protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard. World Business Council for Sustainable Development. – The Hague, 2001. – 27 p.

2. Ключові висновки з СОР 27. Чого досягла СОР 27 і що має статися далі?. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://unfccc.int/2860.php>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 20.02.2023

3. AMS-III.H. Methane recovery in wastewater treatment – Version 16.0. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/4ND00PCGC7WXR3L0LOJTS6SVZP4NSU>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 20.02.2023

4. Approved baseline and monitoring methodology AM0080. «Mitigation of greenhouse gases emissions with treatment of wastewater in aerobic wastewater treatment plants» – Version 1.0. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/6DITU9V0SFOR7EUYEBBVRHCAO2RD3Q>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 20.02.2023.

5. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 20.02.2023.

6. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2006). Volume 5, chapter 6 «Wastewater Treatment and Discharge». – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 20.02.2023.

7. Stehfest E., Bouwman A.F. N<sub>2</sub>O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10705-006-9000-7>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 20.02.2023.

8. Tool to calculate baseline, project and/or leakage emissions from electricity consumption» (Version 01). – [Електронний ресурс]. – Режим

доступу: <http://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-05-v1.pdf>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 20.02.2023

9. Energy star: Portfolio Manager Methodology for Greenhouse Gas Inventory and Tracking Calculations, у and Tracking Calculations, [http://www.energystar.gov/ia/business/evaluate\\_performance/Emissions\\_Supporting\\_Doc.pdf](http://www.energystar.gov/ia/business/evaluate_performance/Emissions_Supporting_Doc.pdf). – Назва з екрана. – Дата звернення: 20.02.2023.

10. Technical annex to the SEAP template instructions document: The emission factors. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.eumayors.eu/IMG/pdf/technical\\_annex\\_en.pdf](http://www.eumayors.eu/IMG/pdf/technical_annex_en.pdf). – Назва з екрана. – Дата звернення: 20.02.2023.

11. IPCC Guidebook: Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/2\\_3\\_Road\\_Transport.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/2_3_Road_Transport.pdf). – Назва з екрана. – Дата звернення: 20.02.2023.

12. Henze M., Harremoes P., La Cour Jansen J., Arvin E. Wastewater Treatment. Biological and Chemical Processes. Berlin, Springer-Verlag, 2002.

## ДОДАТКИ

Додаток 1

### Визначення вуглецевого відбитку, сліду, зумовленого імпортованою електроенергією, споживаної на виробничому майданчику та в офісних приміщеннях

Якщо електроенергія споживається з централізованої мережі, розрахунок проводиться за схемою, наведеною в табл. 1.

Таблиця 1

#### Розрахунок викидів парникових газів при споживанні електроенергії з мережі

Імпортована електроенергія (МВт год/рік)	Коефіцієнт викидів CO <sub>2</sub> для спожитої електроенергії (т CO <sub>2</sub> /МВт рік)	Викиди парникових газів при споживанні електроенергії з мережі (т CO <sub>2</sub> /рік)
1	2	3
A	B	AxB

Коефіцієнти викидів CO<sub>2</sub> по енергосистемі України  $EF_{electr,j,y}$  (т CO<sub>2</sub>/МВт ч) приймаємо умовно 0,65.

Якщо джерелом електроенергії є тепла генерація, а тип і кількість використовуваного палива відомі, то можна величини коефіцієнтів викидів розрахувати самостійно за рівнянням (11), наведеними в розділі 2. У тому випадку, якщо мова йде про відновлювані джерела енергії, коефіцієнт викидів парникових газів приймається рівним нулю.

### Визначення вуглецевого відбитку, обумовленого споживанням теплової енергії на комунальних очисних спорудах

Якщо на виробничому майданчику для виробничих потреб (отримання пари, гарячої води, опалення) проводиться спалювання викопного палива або відходів, викиди парникових газів (CO<sub>2</sub>) визначаються за схемою, наведеною в табл. 2.

Таблиця 2

#### Розрахунок викидів парникових газів при спалюванні палива чи відходів

Спалене паливо певного виду (т або м <sup>3</sup> ) на рік	Середня нижча теплотворна здатність палива (ГДж/т або м <sup>3</sup> )	Коефіцієнт викидів CO <sub>2</sub> для палива (т CO <sub>2</sub> /ГДж)	Викиди парникових газів при спалюванні палива (т CO <sub>2</sub> /рік)
1	2	3	4
А	В	С	АхВхС

Якщо на майданчику спалюється кілька видів викопного палива чи відходів, то величина викидів парникових газів розраховується в колонці 4 для кожного виду палива окремо, а потім отримані величини підсумовуються.

У табл. 3 наведено величини коефіцієнтів теплотворних здібностей та коефіцієнтів викидів CO<sub>2</sub> для найпоширеніших видів палив. В останній колонці таблиці подано величини коефіцієнтів викидів CO<sub>2</sub>, виражені в т CO<sub>2</sub>/МВт рік. Нагадаємо, що 1 МВт год = 3,6 ГДж.

Залежно від складу нижча теплотворна здатність природного газу становить зазвичай 0,034-0,036 ГДж/м<sup>3</sup>.

У тому разі, якщо для палива невідоме табличне значення середньої нижчої теплотворної здатності, але відомий хімічний склад палива, величина коефіцієнта викидів CO<sub>2</sub> визначається за рівняннями розділу 2.4 методичних рекомендацій.



Таблиця 3

**Значення середніх нижчих теплотворних здібностей та коефіцієнтів викидів CO<sub>2</sub> для низки палив**

<b>Вид палива</b>	<b>Середня нижча теплотворна здатність викопного палива (ГДж/т)</b>	<b>Коефіцієнт викидів CO<sub>2</sub> для викопного палива (т CO<sub>2</sub>/ГДж)</b>	<b>Коефіцієнт викидів CO<sub>2</sub> для викопного палива (т CO<sub>2</sub>/МВт год)</b>
Сира нафта	44,2	0,0733	0,264
Зріджений природний газ	44,2	0,0642	0,231
Автомобільний бензин	44,3	0,0693	0,249
Авіаційний бензин	44,3	0,0700	0,252
Авіаційний газ	44,1	0,0715	0,257
Інші види газу	43,8	0,0719	0,259
Сланцева олія	38,1	0,0733	0,264
Дизельне паливо (легке)	43,0	0,0741	0,267
Топковий мазут	40,4	0,0774	0,279
Зріджений попутний газ	47,3	0,0631	0,22
Антрацит	26,7	0,0983	0,354
Коксівне вугілля	28,2	0,0946	0,341
Бітумінозне (жирне) вугілля	25,8	0,0946	0,341
Буре вугілля (лігніт)	11,9	0,1010	0,364
Брикети із бурого вугілля	20,7	0,0975	0,351
Брикетоване паливо	20,7	0,0975	0,351
Кокс	28,2	0,1070	0,385
Природний газ	48,0	0,0561	0,202
Тверді комунальні відходи (не біомаса)	10	0,515	0,515
Відпрацьована олія	40,2	0,0733	0,264
Торф	9,76 0	0,106	0,382
Муловий осад (сухий)	48 25	0,1096	0,39

### Визначення вуглецевого відбитку, обумовленого використанням автомобільного транспорту

Використання автомобільного транспорту на спорудах очищення стічних вод, головним чином, пов'язане з транспортуванням осаду мулу. Найбільший вплив внесок у хлопцевий ефект у даному випадку надають викиди вуглекислого газу, які визначаються за схемою, поданою в табл. 4.

Таблиця 4

#### Розрахунок викидів парникових газів при транспортуванні мулового осаду однотиповим транспортним засобом

Число поїздок однотипного транспортного засобу протягом року	Середня відстань перевезення мулового осаду одним транспортним засобом (Км)	Середня питома потреба палива транспортним засобом (т або м <sup>3</sup> /км)	Середня нижча теплотворна здатність палива (ГДж/т або м <sup>3</sup> )	Коефіцієнт викидів СО <sub>2</sub> для автомобільного палива (т СО <sub>2</sub> /ГДж)	Викиди парникових газів при транспортуванні мулового осаду (т СО <sub>2</sub> )
1	2	3	4	5	6
A	B	C	D	E	FxDxCxDxE

У тому разі, якщо весь муловий осад транспортується однотипними транспортними засобами, число поїздок (A) визначається розподілом усієї маси осаду, виробленого на майданчику і призначеного до вивезення протягом року на вантажопідйомність транспортного засобу.

У випадку, якщо використовуються транспортні засоби різної вантажопідйомності та працюють на різному паливі, для визначення вуглецевого сліду необхідно вести окремий облік поїздок транспортних засобів кожного типу. Тоді розрахунки за табл. 4 проводяться для кожного транспортного засобу та виду палива, а потім результати, отримані в стовпці 6, підсумовуються.

Розмір питомого споживання палива (табл. 4, стовпець 3) визначається за паспортом транспортного засобу чи експериментально.

Значення середньої нижчої теплотворної здатності автомобільного палива (стовпець 4) та коефіцієнта викидів CO<sub>2</sub> (стовпець 5) наведено у табл. 1.

Вуглецевий слід буде визначений більш точно, якщо враховуються всі автотранспортні перевезення. Сюди можуть бути включені автомобільні перевезення реагентів, що використовуються на комунальних очисних спорудах, перевезення службовим автотранспортом працівників підприємства. Для цього необхідно вести на підприємстві облік спожитого автомобільного палива окремо за кожною категорією палива. Схема розрахунку виглядає так (див. табл. 5).

Розрахунок за таблицею проводиться для кожного виду палива, а потім результати, отримані у стовпцях 4, підсумовуються.

Таблиця 5

**Розрахунок викидів парникових газів від використання  
автомобільного транспорту на підприємстві**

<b>Використане протягом року автомобільне паливо одного типу (т або м<sup>3</sup>)</b>	<b>Середня нижча тепло творна здатність палива (ГДж/т або м<sup>3</sup>)</b>	<b>Коефіцієнт викидів CO<sub>2</sub> для автомобільного палива (т CO<sub>2</sub>/ГДж)</b>	<b>Викиди парникових газів від використання автомобільного транспорту (т CO<sub>2</sub>)</b>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
А	В	С	А*В*С

Навчально-методичне видання

# **МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО ВІДБИТКУ СПОРУД ОЧИСТКИ СТІЧНИХ ВОД**

Методичні рекомендації  
до виконання індивідуальної роботи  
для студентів II освітнього рівня підготовки (магістр)  
спеціальностей 183 «Технології захисту  
навколишнього середовища» та 101 «Екологія»

Укладачі: **ВОЛОШКІНА** Олена Семенівна,  
**ЖУКОВА** Олена Григорівна,  
**НЕГОДА** Назарій В'ячеславович

Випусковий редактор *В.С. Сасько*  
Комп'ютерне верстання *Д.М. Ніколаєвич*

Підписано до друку 05.09. 2023. Формат 60x84<sub>1/16</sub>  
Ум. друк. арк. 1,63. Обл.-вид. арк. 1,75.  
Електронний документ. Вид. № 74/III-23

Видавець і виготовлювач:  
Київський національний університет будівництва і архітектури  
Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03037

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів  
видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002 р.