

ВИЗНАЧЕННЯ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

*Косинчук О. В., **Кондратюк Г. Г., *Козлова Н. М., ст. наук. співроб.; *Новицька Є. Г.

*Національний авіаційний університет

**Інститут відновлюваної енергетики НАН України

kosinchuk@ukr.net

Перелічено парникові гази, що регулюються Кіотським протоколом. Описано методіку оцінювання кількості викидів парникових газів у CO₂-еквіваленті. Запропоновано метод визначення зменшення викидів CO₂ за рахунок використання відновлюваних джерел енергії.

Ключові слова: парникові гази, впровадження відновлювальних джерел енергії, енергетичні установки, заміна енергетичних установок; гази, що регулюються Кіотським протоколом.

The greenhouse gases regulated by the Ciot's Protocol are mentioned. The methodology for quantitative estimation of greenhouse gases emission in CO₂ equivalent is described. The method for long-time CO₂ emission estimation proposed by means of renewable energy sources application.

Key words: dot's Protocole, gveenhouse gases, renewable energy sources, emission in CO₂.

Вступ

Упровадження енергетичних установок на основі відновлюваних джерел енергії дає змогу зменшити викиди в атмосферу антропогенних парникових газів. Визначення об'ємів цього скорочення потрібне для оцінювання еколого-економічної ефективності будь-якого проекту впровадження відновлюваних джерел енергії, оцінювання обсягів торгівлі квотами на викиди антропогенних парникових газів, визначення доцільності розробки та реалізації проектів спільного впровадження в галузі відновлюваної енергетики.

Як відомо, парникові гази — це гази, що утримують в атмосфері інфрачервоне випромінювання. Вони бувають як природного (водяна пара, метан, озон) так і антропогенного (гідрофторвуглеці, гексафторид сірки), походження. Кіотським протоколом регулюються антропогенні викиди тільки шести парникових газів: діоксиду вуглецю (CO₂), метану (CH₄), оксиду азоту (N₂O), гідрофторвуглецю (HCF_s), перфторвуглецю (PCF_s) та гексафториду сірки (SF₆).

Тепло та електрогенеруючі енергетичні установки на основі відновлюваних джерел енергії за наявності антропогенних викидів парникових газів поділяють на:

1. Енергетичні установки, в процесі експлуатації яких зовсім не утворюються парникові гази. Це установки на основі вітряної, сонячної, геотермальної, хвильової, припливної енергії.

2. Енергетичні установки, в процесі експлуатації яких відбувається утворення антропогенних парникових газів. Це установки, в яких використовуються біомаса, сміття, стічні води, інші відновлювані органічні енергоносії.

До антропогенних парникових газів, які регулюються Кіотським протоколом і утворюються під час експлуатації електро- та теплогенерую-

чих установок, належать тільки парникові гази, що є продуктами утилізації викопного органічного палива (вугілля, торфу, природного газу, нафти).

Антропогенні парникові гази, що викидаються електро- та теплогенеруючими установками в яких утилізуються відходи біомаси, сміття, стічних вод та інших відновлюваних органічних енергоносіїв, не регулюються Кіотським протоколом. Тому вважається, що заміна енергогенеруючих установок, працюючих на традиційних енергоносіях енергетичними установками, в яких утилізуються відходи біомаси інші відновлювані органічні енергоносії, скорочує викиди антропогенних парникових газів, що регулюються Кіотським протоколом і це скорочення можна визначати аналогічно до скорочення викидів антропогенних парникових газів регульованих Кіотським протоколом.

Зауважимо, що для різних парникових газів з погляду кількісної оцінювання об'ємів їх викидів, або об'ємів квот на викиди, використовується метрична тонна скорочення викидів парникових газів у CO₂-еквіваленті [1]. Тобто CO₂-еквівалент є одиницею вимірювання скорочень викидів парникових газів. CO₂-еквівалент обчислюється шляхом множення кількості (у кубічних метрах або тонах) будь-якого парникового газу на відповідний потенціал глобального потепління:

$$\text{CO}_2 - \text{екв.} = V_{\text{парн.газ}} \gamma, \quad (1)$$

де $V_{\text{парн.газ}}$ — кількість парникового газу; γ — потенціал глобального потепління, наведений у табл. 1.

Для прикладу наведемо алгоритм обчислення CO₂-еквівалента викидів 10 т метану. Тоді [1], підставляючи в формулу (1) числові значення величин дістанемо:

$$\text{CO}_2^{\text{CH}_4} - \text{екв.} = 10 \text{ т} \cdot 21 = 210 \text{ т CO}_2 - \text{екв.}$$

Величини потенціалів глобального потепління

Парниковий газ	Хімічна формула	Потенціал глобального потепління
Вуглекислий газ	CO ₂	1
Метан	CH ₄	21
Закис азоту	N ₂ O	310
Гідрофторвуглеці (HFC _s)		
HFC-23	CHF ₃	11700
HFC-32	CH ₂ F ₂	650
HFC-41	CH ₃ F	150
HFC-43-10mee	C ₅ H ₂ F ₁₀	1300
HFC-125	C ₂ HF ₅	2800
HFC-134	C ₂ H ₂ F ₄ (CHF ₂ CHF ₂)	1000
HFC-134a	C ₂ H ₂ F ₄ (CH ₂ FCF ₃)	1300
HFC-152a	C ₂ H ₄ F ₂ (CH ₃ CHF ₂)	140
HFC-143	C ₂ H ₃ F ₃ (CHF ₂ CH ₂ F)	300
HFC-143a	C ₂ H ₃ F ₃ (CF ₃ CH ₃)	3800
HFC-227ea	C ₃ HF ₇	2900
HFC-236fa	C ₃ H ₂ F ₆	6300
HFC-245ca	C ₃ H ₃ F ₅	560
Перфторвуглеці (PFC _s)		
Перфторметан	CF ₄	6500
Перфторетан	C ₂ F ₆	9200
Перфторпропан	C ₃ F ₈	7000
Перфторбутан	C ₄ F ₁₀	7000
Перфторциклобутан	c-C ₄ F ₈	8700
Перфторпентан	C ₅ F ₁₂	7500
Перфторгексан	C ₆ F ₁₄	7400
Гексафторид сірки	SF ₆	23900

Мета

Нині існують декілька методик визначення обсягів скорочення викидів парникових газів, але майже всі вони ґрунтуються на безпосередніх вимірюваннях скорочення кількості викидів парникових газів конкретних енергетичних або промислових установок.

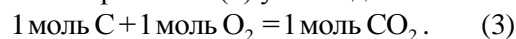
На жаль, такий підхід не зовсім придатний для енергетичних установок на основі відновлюваних джерел енергії, в яких викиди парникових газів відсутні. Тому метою статті є розробка та наукове обґрунтування інженерного методу оцінювання зменшення викидів парникових газів під час впровадження енергетичних установок на основі відновлюваних джерел енергії.

Як показано вище, основним парниковим газом, що утворюється при експлуатації електрогенеруючих установок, є вуглекислий газ (CO₂). Він утворюється в результаті реакції окиснення

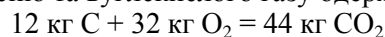
вуглецю, що міститься в традиційному органічному паливі. За умови повного окиснення вуглецю палива маємо [3] — тверде паливо



Перепишемо рівняння (2) у вигляді:



Підставивши в рівняння (3) вагу 1 моля вуглецю, кисню та вуглекислого газу одержуємо:



або



Таким чином, при повному спалюванні 1 кг вуглецю, що міститься в органічному паливі теоретично необхідно 2,67 кг кисню, за утворення 3,67 кг вуглекислого газу.

З урахуванням вищевикладеного для обчислення кількості викидів в енергетичних установках такого парникового газу, як вуглекислий ви- користовуємо формулу:

$$M_{\text{CO}_2} = 3,67n M_{\text{орг.пал.}}, \quad (4)$$

де M_{CO_2} — маса викидів вуглекислого газу, що утворюється в разі повного спалювання в тепло та електрогенеруючих установках традиційного органічного палива за рік; 3,67 — коефіцієнт перерахунку вуглецю у вуглекислий газ; n — кількість вуглецю у робочій масі конкретного, використаного при генерації теплоти або електроенергії традиційного органічного палива у частках одиниці.

Для деяких палив ця кількість наведена в табл. 2 [5]; $M_{\text{орг.пал.}}$ — маса традиційного органічного палива, що спалено за рік.

Як приклади розрахунків кількості викидів CO_2 за формулою (4) наведемо алгоритм обчислення цієї кількості для кам'яного вугілля марки «Д» Донецького басейну, $C^p = 50,6\%$.

Таблиця 2

Вміст вуглецю в деяких органічних паливах

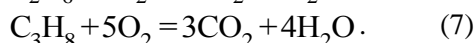
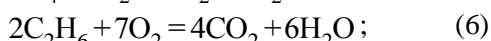
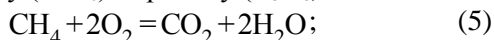
Найменування палива	Вміст вуглецю, %	Найменування палива	Вміст вуглецю, %
Буре вугілля Звенигородського родовища	34	Антрацит Горлівського родовища	94
Буре вугілля Криворізьського родовища	23	Дрова (дуб)	50,7
Кам'яне вугілля Криворізьського родовища	69,8	Дрова (осика)	48,8
Кам'яне вугілля марки «Д» Донецького родовища	50,6	Торф (верховий)	55,97

Тоді маємо:

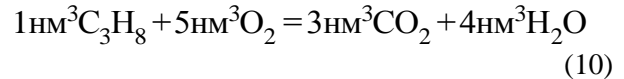
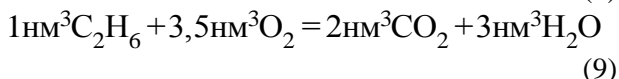
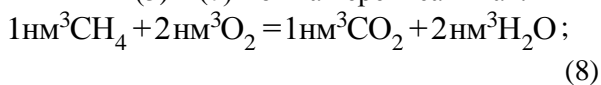
$$M_{\text{CO}_2} = 0,506 \cdot 3,67 \text{ кг} = 1,86 \text{ кг.}$$

Таким чином, на підставі рівняння (4) одержуємо, що за повного згоряння 1 кг вугілля обраної марки утворюється 1,86 кг вуглекислого газу.

За повного згоряння газоподібного палива основна маса вуглекислого газу утворюється в результаті хімічних реакцій окиснення метану (CH_4), етану (C_2H_6) і пропану (C_3H_8):



Рівняння (5)—(7) можна переписати так:



де нм^3 — нормальний метр кубічний газу за тиску 1 атм і температурі 0°C .

Підставляючи в рівняння (8)—(10) питому вагу газів, які входять до складу газоподібного палива [5], маємо:

$$0,716\text{кг CH}_4 + 2 \cdot 1,428\text{кг O}_2 = 1,964\text{кг CO}_2 + 2 \cdot 0,804\text{кг H}_2\text{O}; \quad (11)$$

$$1,342\text{кг C}_2\text{H}_6 + 3,5 \cdot 1,428\text{кг O}_2 = 2 \cdot 1,964\text{кг CO}_2 + 3 \cdot 0,804\text{кг H}_2\text{O}; \quad (12)$$

$$1,967\text{кг C}_3\text{H}_8 + 5 \cdot 1,428\text{кг O}_2 = 3 \cdot 1,964\text{кг CO}_2 + 4 \cdot 0,804\text{кг H}_2\text{O}. \quad (13)$$

Таким чином, на підставі рівняння (11)—(13) одержуємо, що при повному згорянні 1 нм^3 метану утворюється 1,964 кг вуглекислого газу. В разі повного згоряння 1 нм^3 етану утворюється 3,928 кг вуглекислого газу; при повному згорянні 1 нм^3 пропану утворюється 5,892 кг вуглекислого газу.

З урахуванням вищевикладеного, для обчислення кількості вуглекислого газу, який утворюється при повному згорянні газоподібного палива, дістанемо формулу:

$$\dot{V}_{\text{CO}_2} = K^M \cdot 1,964 \text{ кг} + K^E \cdot 3,928 \text{ кг} + K^P \cdot 5,892 \text{ кг} + K^{\text{CO}_2} \cdot 1,964 \text{ кг}, \quad (14)$$

де K^M , K^E , K^P , K^{CO_2} — кількість метану, етану, пропану і природного вуглекислого газу в 1 нм^3 газоподібного палива в частках одиниці, визначається на підставі таблиць розрахункових характеристик газоподібного палива, наведених, зокрема, в праці [5].

Як приклад розрахунків кількості викидів вуглекислого газу за формулою (14), який утворюється за повного згоряння 1 нм^3 газоподібного палива, наведемо алгоритм обчислення цієї кількості для природного газу Ухтинського газового родовища (Росія) [5]:

$$K^{\text{CO}_2} = 0,3\%, K^M = 88\%, K^E = 1,9\%, K^P = 0,2\%.$$

Тоді маємо:

$$M_{\text{CO}_2}^{1\text{нм}^3} = 0,88 \cdot 1,964 \text{ кг} + 0,019 \cdot 3,928 \text{ кг} +$$

$$+ 0,002 \cdot 5,892 \text{ кг} + 0,003 \cdot 1,964 \text{ кг} = 1,821 \text{ кг.}$$

Таким чином, за повного згоряння 1 нм^3 або 0,789 кг природного газу обраного родовища утворюється 1,821 кг вуглекислого газу. При спалюванні ж 1 кг або $1,267 \text{ нм}^3$ природного газу цього родовища утворюється така кількість вуглекислого газу:

$$M_{\text{CO}_2}^{1\text{кг}} = 1,821 \text{ кг/нм}^3 \cdot 1,267 \text{ нм}^3 = 2,31 \text{ кг.}$$

Зауважимо, що масу традиційного органічного палива, що спалено за рік, можна розрахувати за такими залежностями [3; 4]:

електрогенеруючі установки

$$M_{\text{орг.пал}}^{\text{ел}} = \frac{860 \cdot G^{\text{ел}}}{\xi \cdot \eta_{\text{кд}} \cdot \eta_{\text{ц}} \cdot \eta_{\text{в}}}, \quad (15)$$

де $M_{\text{орг.пал}}^{\text{ел}}$ — маса традиційного органічного палива в кг; $G^{\text{ел}}$ — річний виробіток електроенергії електрогенеруючою установкою, кВт·год; ξ — теплота згоряння традиційного органічного палива, що спалюється в електрогенеруючій установці, ккал/кг або ккал/нм³; $\eta_{\text{кд}}$ — коефіцієнт корисної дії паливного котла електрогенеруючої установи; $\eta_{\text{ц}}$ — термічний коефіцієнт циклу електрогенеруючої установи; $\eta_{\text{в}}$ — загальний коефіцієнт втрат при перетворенні механічної енергії в електричну, для ряду електрогенеруючих установок становить 0,95; 860 — коефіцієнт переведення теплових одиниць, ккал/кВт·год.

теплогенеруючі установи

$$M_{\text{орг.пал}}^{\text{теп}} = \frac{860 \cdot G^{\text{теп}}}{\xi \cdot \eta}, \quad (16)$$

де $M_{\text{орг.пал}}^{\text{ел}}$ — маса традиційного органічного палива в кг; $G^{\text{теп}}$ — річний виробіток теплоти теплогенеруючою установкою в кВт·год; ξ — теплота згоряння традиційного органічного палива, що спалюється в електрогенеруючій установці, ккал/кг або ккал/нм³; $\eta_{\text{кд}}$ — коефіцієнт корисної дії паливного котла; 860 — коефіцієнт переведення теплових одиниць, ккал/кВт·год.

Таким чином, ґрунтуючись на вищевикладеному, можна запропонувати такий інженерний метод визначення об'ємів зменшення викидів головного з парникових газів, що утворюється в тепло та електрогенеруючих установках — вуглекислого газу, за рахунок упровадження енергетичних потужностей на основі відновлюваних джерел енергії:

1. На основі відомостей про експлуатацію енергогенеруючої установи та відновлюваних джерел енергії визначається річна кількість теплоти або електроенергії (кВт·год на рік), яка вироблена цією енергогенеруючою установкою.

2. Використовуючи визначену річну кількість теплоти або електроенергії, за формулами (15) або (16) розраховуємо масу традиційного органічного палива, яке могло б використовуватися для генерації визначеної кількості теплоти або електроенергії.

3. Ґрунтуючись на розрахованій масі традиційного органічного палива, за залежності (4) та (14) обчислюємо об'єми скорочення викидів вуглекислого газу за рахунок впровадження тепло- та електрогенеруючих установок, що використовують відновлювані джерела енергії.

Зауважимо, що запропонований інженерний метод визначення об'ємів скорочення викидів вуглекислого газу може застосовуватись як для енергоустановок на основі відновлюваних джерел енергії, при експлуатації яких зовсім не утворюються парникові гази, так і для енергоустановок під час експлуатації яких утворюються парникові гази.

Як приклад оцінювання об'ємів скорочення викидів вуглекислого газу за рахунок впровадження енергогенеруючих установок на основі відновлюваних джерел енергії розглянемо теплогенеруючу геотермальну установку, яка щорічно виробляє 13200 МВт·год теплоти та електрогенеруючу сонячну фотоелектричну установку, яка щорічно виробляє 2500 МВт·год електроенергії: теплогенеруюча геотермальна установка продуктивністю 13200 МВт·год/рік, що заміщує паливну котельню з коефіцієнтом корисної дії котла 0,8 на вугіллі, яке має теплоту згоряння 5600 ккал/кг і вміст вуглецю 56 %.

Відповідно до формули (16) обчислюємо масу вугілля, яке могло бути використано:

$$M_{\text{орг.пал}}^{\text{теп}} = \frac{860 \text{ ккал/кВт} \cdot \text{год} \cdot 13,2 \cdot 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}}{5600 \text{ ккал/кг} \cdot 0,8} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ кг/рік} = 2500 \text{ т/рік}.$$

За формулою (4) розраховується зменшення викидів вуглекислого газу за рахунок упровадження теплогенеруючої геотермальної установи продуктивністю 13200 МВт · год/рік:

$$M_{\text{CO}_2}^{\text{геот}} = 3,67 \cdot 0,56 \cdot 2500 \text{ т/рік} = 5138 \text{ т CO}_2/\text{рік}.$$

Таким чином, за рахунок упровадження вищезазначеної геотермальної установи можна скоротити викиди вуглекислого газу в атмосферу на 5138 т/рік; електрогенеруюча сонячна фотоелектрична установка продуктивністю 2500 МВт·год/рік, що заміщує електроенергію від паливної електростанції, яка працює на вугіллі з теплотою згорання 5600 ккал/кг і вмістом вуглецю 56 %. Параметри електростанції:

$$\eta_{\text{кд}} = 0,9; \eta_{\text{ц}} = 0,32; \eta_{\text{в}} = 0,95.$$

Згідно з формулою (15) розраховуємо масу вугілля, яке могло б бути використане:

$$M_{\text{орг.пал}}^{\text{ел}} = \frac{860 \text{ ккал/кВт} \cdot \text{год} \cdot 2,5 \cdot 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}}{5600 \text{ ккал/кг} \cdot 0,9 \cdot 0,32 \cdot 0,95} = 1,4 \cdot 10^6 \text{ кг/рік} = 1400 \text{ т/рік}$$

За залежністю (4) дістаємо скорочення викидів вуглекислого газу за рахунок упровадження електрогенеруючої фотоелектричної установи продуктивністю 2500 МВт·год/рік:

$$M_{\text{CO}_2}^{\text{фот}} = 3,67 \cdot 0,56 \cdot 1400 \text{ т/рік} = 2877 \text{ т CO}_2/\text{рік}.$$

Таким чином за рахунок упровадження вищезазначеної сонячної фотоелектричної установи

можна скоротити викиди вуглекислого газу в атмосферу на 2877 т/рік.

Висновки

1. Запропоновано метод оцінювання зменшення викидів CO₂ за рахунок використання відновлюваних джерел енергії.

2. Описано методику перерахунку викидів парникових газів, що регулюються Кіотським протоколом у CO₂-еквівалент.

3. Показано, що кількість викидів CO₂ за умови повного спалювання традиційного органічного палива залежить від кількості вуглецю в цьому паливі та від співвідношення вуглецю і кисню, які беруть участь у процесі спалювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Национальный отчет* Министерства охраны окружающей среды Украины: «Кадастр выбросов парниковых газов и их поглощение в Украине за 1990—2005 гг.» // Киев, 2005. — 416 с.

2. *Краткая химическая энциклопедия*. — Т. 1; 2; 3; 4; 5 // Москва, Советская энциклопедия, 1967.

3. *Забарний Г. М.* Використання енергії біомаси для енергозабезпечення об'єктів на територіях з спеціальним режимом природокористування // Інститут відновлюваної енергетики НАН України / Г. М. Забарний, С. О. Кудря, Є. Г. Новицька. — К., 2007. — 236 с.

4. *Забарний Г. М.* Енергетичний потенціал нетрадиційних джерел енергії України // Інституту технічної теплофізики НАН України / Г. М. Забарний, А. В. Шурчков. — К, 2002. — 211 с.

5. *Теплотехника* : справочник. — М. : Трансжелдориздат, 1938. — 349 с.

Стаття надійшла до редакції 20.05.10.