

## **МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ НЕПРЯМИХ ВИКИДІВ CO<sub>2</sub> БУДІВЛЯМИ ЖИТЛОВОГО СЕКТОРУ З УРАХУВАННЯМ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ БУДІВЕЛЬ**

Сплавська В.О.

Національний Технічний Університет України «Київський Політехнічний Інститут»  
м. Київ, Україна

**АНОТАЦІЯ:** Стаття розкриває актуальність та необхідність розробки методики розрахунку непрямих викидів CO<sub>2</sub>, на основі даних енергоспоживання будівлями житлового сектору та супутніх викидів CO<sub>2</sub>. На основі проведеного аналізу існуючих методик та з урахуванням їх переваг та недоліків скомпільовано базовий алгоритм такої методики. Обґрунтовано доцільність створення подібної методики, адаптованої до житлового фонду України.

**АННОТАЦИЯ:** Статья раскрывает актуальность и необходимость разработки методики расчета непрямых выбросов CO<sub>2</sub>, основываясь на данных энергопотребления зданиями жилого сектора и сопутствующих этому выбросов CO<sub>2</sub>. На основе проведенного анализа существующих методик и с учетом их преимуществ и недостатков скомпилирован базовый алгоритм такой методики. Обоснована целесообразность создания подобной методики, адаптированной для жилого сектора Украины.

**ABSTRACT:** The article shows topicality and necessity of development the methodic of calculation indirect CO<sub>2</sub> emissions, based on the data of energy use of residential buildings and accompanying CO<sub>2</sub> emissions. Based on the analysis of current methods and taking into account its benefits and weaknesses, it was compiled basic algorithm of this methodic. There was justified practicability of development such methodic, tailored concerning residential buildings sector of Ukraine.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** Непрямі викиди CO<sub>2</sub>, життєвий цикл будівлі, енергетична ефективність, екологічна ефективність.

На сьогодні однією з нагальних проблем є не лише інтенсивне скорочення запасів паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР), але й проблема викидів двоокису вуглецю (CO<sub>2</sub>), які зумовлюють необоротні кліматичні та екологічні зміни в планетарному масштабі. Проблема викидів CO<sub>2</sub> полягає не тільки в їх алокації та пролонгованій дії, але й в тому, що кількість емітерів CO<sub>2</sub> стрімко зростає, незважаючи на популяризацію та поширення енергозбереження, енергоефективності та еко-направленої політики в більшості країн світу. Тому наразі дуже важливо на національному рівні вжити дієвих заходів щодо розробки плану дій, спрямованих на скорочення негативного впливу на екологію та підвищення рівня енергоефективності тих галузей, які мають найбільший вплив на екологію та загальне енергоспоживання.

Відповідно до даних [1] відомо, що житловий сектор споживає понад 40% світових енергоресурсів та виділяє 36% світових викидів CO<sub>2</sub>. Так, за даними [2] в країнах ЄС близько половини загального енергоспоживання та викидів CO<sub>2</sub> відносять саме до будівель житлового сектору протягом їх життєвого циклу. Частка житлових будівель є домінуючою

складовою в світовому фонді будівель, а, відповідно, споживання ПЕР та вплив на оточуюче середовище житловим сектором є досить значним. Так, частка спожитих енергоресурсів житловими будівлями складає 63% загального енергоспоживання європейського фонду будівель та, відповідно, 77% від загального обсягу викидів CO<sub>2</sub> [3].

Щороку кількість споживачів даного сектору стрімко зростає. Це зумовлено демографічними та соціальними проблемами, оскільки за останніми офіційними даними статистики [4] на сьогодні в світі більш ніж для 100 млн. осіб не вирішене питання житла, а більше ніж 1,6 млрд. осіб мають житло, яке не придатне для життя та не відповідає санітарно-гігієнічним та теплотехнічним нормам. Для прикладу, в Китаї щорічно будують понад 1200-1400 млн. м<sup>2</sup> житлової площі, що акцентує увагу на стратегічній необхідності розробки заходів щодо підвищення ефективності та екологічності енергоспоживання житловими будівлями.

Однак, для розробки такого роду заходів необхідно створити методіку для розрахунку непрямих виробів CO<sub>2</sub> будівлями житлового сектору. Розвинені країни, такі як США, Німеччина та Великобританія, розробили власні розрахункові методіки, однак, жодна із них на сьогодні не є міжнародною загальноприйнятою методикою [5]. Сьогодні Технічний Комітет CEN/TC 350 працює над розробкою Європейського стандарту по оцінці будівель, використовуючи підхід, що враховує життєвий цикл будівлі та кількісні індикатори екологічних, соціальних та економічних характеристик будівлі.

Існує чимало класифікацій життєвого циклу житлової будівлі, переважно вони відрізняються кількістю включених до аналіз етапів життєвого циклу будівлі. Було доведено [6], що етап виготовлення будівельних матеріалів є другим за кількістю викидів CO<sub>2</sub> порівняно з іншими етапами життєвого циклу, тому для отримання більш точних результатів розрахунку слід враховувати етап виготовлення будівельних матеріалів. Рештою етапів життєвого циклу прийняті наступні: зведення будівлі, експлуатація будівлі, демонтування будівлі та утилізація відходів після демонтування.

Виходячи з рівняння еко-ефективності [7]: еко-ефективність=величина, що характеризує виріб або послугу/екологічна величина, можна скласти аналогічне рівняння, для оцінки викидів CO<sub>2</sub> за кожний етап життєвого циклу будівлі:

$$CE_{ж/б} = \frac{V_{ж/б}}{C_{ж/б}}, \quad (1)$$

де  $CE_{ж/б}$  - CO<sub>2</sub>-ефективність життєвого циклу житлової будівлі;

$V_{ж/б}$  - величина, що характеризує життєвий цикл будівлі;

$C_{ж/б}$  - кількість викидів CO<sub>2</sub> протягом життєвого циклу будівлі.

З рівняння (1) очевидно, що для оцінки викидів CO<sub>2</sub> протягом життєвого циклу будівлі, необхідно розрахувати кількість викидів CO<sub>2</sub> на кожному етапі життєвого циклу. Тоді CO<sub>2</sub>-ефективність життєвого циклу житлової будівлі можна навести у вигляді:

$$C_{ж/б} = C_{ж/б,м} + C_{ж/б,з} + C_{ж/б,експл} + C_{ж/б,д} + C_{ж/б,ут}, \quad (2)$$

де складові рівняння (2) відповідає CO<sub>2</sub>-ефективність життєвого циклу житлової будівлі протягом етапу виробництва будівельних матеріалів для кожної будівлі, зведення будівлі, експлуатація, демонтування та утилізація відходів після демонтування.

Розглянемо більш детально алгоритм для кожного етапу.

Викиди CO<sub>2</sub> протягом етапу виробництва будівельних матеріалів визначаються за формулою:

$$C_{ж/б,м} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot G_i = \sum_{i=1}^n 8,94 \cdot 10^{-5} \cdot q_i \cdot e_i, \quad (3)$$

де  $i$  – тип будівельного матеріалу, що виготовляється;

$n$  – загальна кількість типів будівельних матеріалів, що виготовляється;

$q_i$  - кількість  $i$ -го типу будівельного матеріалу, що виготовляється (т, м<sup>3</sup>, шт.);

$G_i$  - величина питомих викидів  $CO_2$  і-го типу будівельного матеріалу (т/т, т/м<sup>3</sup>, т/шт.);  
 $8,94 \cdot 10^{-5}$  - множник, який показує, що 1 МДж енергії виділяє  $8,94 \cdot 10^{-5}$  т вуглецю;  
 $e_i$  - енергоємність і-го типу будівельного матеріалу (табл. 1).

Таблиця 1

Значення енергоємності для різних видів будівельних матеріалів [8, 9]

Назва буд.матеріалу	Од. вим.	$e_i$	Назва буд.матеріалу	Од. вим.	$e_i$
Пісок	МДж/кг	0,6	Бетон	МДж/кг	1,6
Гравій	МДж/кг	0,2	Бетонний блок	МДж/кг	1,2
Цемент	МДж/кг	5,5	Штукатурка	МДж/кг	3,8
Цегла	МДж/кг	2	Шпалери	МДж/кг	16,2
Перфорована цегла	МДж/кг	2	Будівельний розчин	МДж/кг	1,9
Архітектурне скло	МДж/кг	16	Санітарна кераміка	МДж/кг	15,4
Прокатна сталь	МДж/кг	29	Вапно	МДж/кг	5,27
Алюміній	МДж/кг	180	ПВХ	МДж/кг	70
Дерев'яний брус	МДж/м <sup>3</sup>	1592,3	Фанера	МДж/кг	8,3

Викиди  $CO_2$  протягом етапу будівництва визначаються за формулою:

$$C_{ж/б,з} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot d_i \cdot G_{ii} + \sum_{j=1}^m 8,94 \cdot 10^{-5} \cdot p_j \cdot f_j, \quad (4)$$

де  $d_i$  – відстань між місцем виробництва і-го типу будівельного матеріалу до місця будівництва будівлі (км);

$G_{ii}$  – кількість викидів  $CO_2$ , що виділяється одиницею транспорту при перевезенні і-го типу будівельного матеріалу (т/т км);

$p_j$  – кількість j-го типу будівельної діяльності (т, м<sup>3</sup> або м<sup>2</sup>);

$f_j$  – енергоємність j-го типу будівельної діяльності (табл. 2);

$m$  – загальна кількість типів будівельної діяльності.

Таблиця 2

Основні типи будівельної діяльності та значення їх енергоємностей [9]

Назва типу будівельної діяльності	Значення величини $f_j$	Од.вим. $f_j$
Роботи на екскаваторі, копання землі	115,2	МДж/м <sup>3</sup>
Освітлення робочих зон	93,6	МДж/м <sup>2</sup>
Геодезичні роботи	7,2	МДж/м <sup>2</sup>
Кранові роботи	10,8	МДж/т

Викиди  $CO_2$  на етапі експлуатації є найбільшими порівняно з викидами на решті етапах життєвого циклу. Для їх розрахунку необхідно визначити енергоспоживання будівлі. Найбільш точна методика визначення загального енергоспоживання наведена у Європейських стандартах EN 13790, 15603 та 15217. Викиди  $CO_2$  протягом етапу експлуатації визначаються за формулою:

$$C_{ж/б,експл} = 0,54 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{ел} + 8,94 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{газ} \cdot Y, \quad (5)$$

де  $0,54 \cdot 10^{-3}$  – вуглецева щільність електричної енергії (т/кВт·год);

$Q_{ел}$  – щорічне споживання електричної енергії житловою будівлею протягом етапу експлуатації (кВт·час);

$Q_{газ}$  – щорічне споживання газу житловою будівлею протягом етапу експлуатації (МДж). Також можна використовувати дані по іншим видам споживання ПЕР в залежності від енергобалансу житлової будівлі із застосуванням відповідних поправочних коефіцієнтів.

$Y$  – тривалість експлуатаційного періоду будівлі (рік).

Викиди  $CO_2$  на етапі демонтування будівлі визначаються аналогічно до алгоритму визначення викидів на етапі зведення будівлі, за даними щодо енергоспоживання різними видами діяльності при демонтажних роботах:

$$C_{ж/б,д} = \sum_{k=1}^t 8,94 \cdot 10^{-5} \cdot g_k \cdot h_k, \quad (6)$$

де  $g_k$  - кількість  $k$ -тих видів діяльності при демонтажних роботах (т,  $m^3$  або  $m^2$ );

$h_k$  - енергоємність  $k$ -тих видів будівельної діяльності (МДж/т, МДж/ $m^3$  або МДж/ $m^2$ );

$t$  - загальна кількість видів діяльності при демонтажних роботах.

Як правило, визначити значення  $g_k$  та  $h_k$  досить складно, оскільки ці величини мають досить абстрактний зміст, тому відповідно до [9] можна прийняти, що енергоспоживання на етапі демонтування складає 90% від енергоспоживання на етапі зведення будівлі, що значно спрощує процедуру розрахунку:

$$C_{ж/б,д} = 0,9 \cdot C_{ж/б,з}$$

Викиди  $CO_2$  на етапі утилізації демонтованих частин будівлі визначаються за формулою:

$$C_{ж/б,ут} = \sum_{i=1}^n W_i \cdot R_i \cdot D_{ж/б,i} \cdot G_{ti} + \sum_{i=1}^n W_i \cdot (1 - R_i) \cdot D_{н/у,i} \cdot G_{ti}, \quad (7)$$

де  $W_i$  - кількість  $i$ -го типу відходів після демонтування, які можуть бути утилізовані (т);

$R_i$  - коефіцієнт утилізації  $i$ -го типу відходів після демонтування, які можуть бути утилізовані (%);

$D_{ж/б,i}$  - відстань перевезення від місця демонтування будівлі до місця утилізації  $i$ -го типу відходів після демонтування, які можуть бути утилізовані (км);

$D_{н/у,i}$  - відстань перевезення від місця демонтування будівлі до місця утилізації  $i$ -го типу відходів після демонтування, які не можуть бути утилізовані (км).

З урахування наведених вище формул (3)-(7) та (1)-(2) комбінований вуглецевий життєвий цикл будівлі може бути записаний як:

$$CE_{ж/б} = \frac{S_{ж/б} \cdot H_{ж/б} \cdot L_{ж/б}}{C_{ж/б,м} + C_{ж/б,з} + C_{ж/б,експл} + C_{ж/б,д} + C_{ж/б,ут}}, \quad (8)$$

де  $S_{ж/б}$  - житлова площа житлової будівлі ( $m^2$ );

$H_{ж/б}$  - висота будівлі (м);

$L_{ж/б}$  - експлуатаційний життєвий строк будівлі (рік).

За наведеним алгоритмом було проведено розрахунок для представницької будівлі, отримані результати наведені на рис.1.

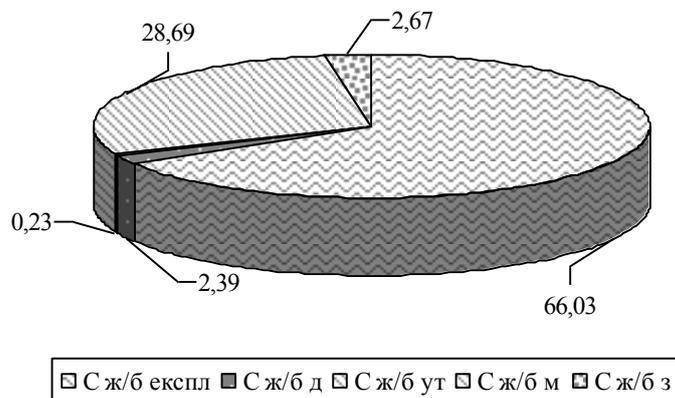


Рис. 1. Складові  $C_{ж/б}$  по етапам життєвого циклу будівлі

Відповідно до рис. 1, очевидно, що найбільша частка викидів CO<sub>2</sub> має місце на найдовшому етапі - етапі експлуатації. Отже, за даною методикою можна не лише визначити кількість викидів CO<sub>2</sub> протягом життєвого циклу будівлі, але й використовувати її в якості управлінського інструменту для обґрунтування доцільності впровадження заходів щодо підвищення рівня енергетичної та екологічної ефективності будівлі на певному етапі. Так, для даної будівлі з переліку заходів щодо підвищення рівнів енерго- та еко-ефективності пріоритетними мають бути заходи щодо етапу експлуатації, оскільки саме ці заходи матимуть найсуттєвіший економічний, енергетичний та екологічний ефекти.

Також, особливої уваги потребує розробка енергоефективних заходів для етапу виробництва будівельних матеріалів. Викиди на решті етапів життєвого циклу будівлі мають меншу частку впливу на загальний обсяг викидів CO<sub>2</sub> протягом життєвого циклу будівлі.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. CIE (Centre for International Economics). Capitalizing on the building sector's potential to lessen the costs of a broad based GHG emissions cut, research report prepared for ASBEC Climate Change Task Group. Available from: [www.TheCIE.com.au](http://www.TheCIE.com.au); 2007.
2. WBCSD. Measuring eco-efficiency: a guide to reporting company performance. - Geneva: WBCSD, 2000.
3. Constantinos A.B., Athina G.G., Elena G., Sevastianos M., Yiannis S., Dimitris P.L. European residential buildings and empirical assessment of the Hellenic building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings // *Building and Environment*, 2007. - 42(3):1298e314.
4. Dodoo A. Building energy-efficiency standards in a life cycle primary energy perspective / Dodoo A., Gustavsson L., Sathre R. // *Energy and Building* 2011; 43(7):1589e97.
5. Carbon emissions in the life cycle of urban building system in ChinadA case study of residential buildings / [You F, Hu D., Zhang H., Guo Z., Zhao Y., Wang B., et al.] // *Ecological Complexity*, 2011;8(2):201e12.
6. Gustavsson L. Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building / Gustavsson L., Joelsson A., Sathre R. // *Energy and Buildings*, 2010. - 42(2):230e42.
7. A methodology for estimating the life-cycle carbon efficiency of a residential building / [D.Z. Li, H.X. Chen, Eddie C.M. Hui, J.B. Zhang, Q.M. Li] // *Building and Environment* 2013; 59(16):448e455.
8. Zhang J.B. Research on carbon emission measurement and carbon-efficiency promotion of residential buildings (in Chinese) / Zhang J.B. // M. Ph. Thesis. – China: Southeast University, 2011.
9. Zhong P. Study of building life-cycle energy use and relevant environmental impacts (in Chinese) / Zhong P. // M.Ph. Thesis. – China: Southeast University, 2005.

Стаття надійшла до редакції 07.04.2014 р.