

## СПРОЩЕНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ІНТЕГРАЛЬНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ МЕТАЛУРГІЙНОЇ ПРОДУКЦІЇ НА ОСНОВІ НАСКРІЗНИХ ВИТРАТНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ

***Анотація.** У роботі розглянуто можливість використання наскрізних витратних коефіцієнтів для спрощеного розрахунку енергетичних показників металургійної продукції в умовах багатостадійного виробництва. Показано, що традиційний прямий підхід не забезпечує належного врахування внутрішніх взаємозв'язків між технологічними переділами, матеріальними потоками та вторинними енергоресурсами, що обмежує його застосовність у прогнозних і порівняльних розрахунках. Запропоновано спрощений метод, у якому наскрізні витратні коефіцієнти використовуються як узагальнена розрахункова база для визначення інтегральних енергетичних показників продукції без побудови повної деталізованої моделі для кожного переділу. Показано, що такий підхід зберігає високу точність порівняно з повною розрахунковою схемою та водночас суттєво спрощує оцінку впливу змін у структурі виробництва, сортаменті продукції та технологічних параметрах. Додатково продемонстровано, що отримані енергетичні показники можуть бути використані для швидкого розрахунку супутніх показників, пов'язаних з енергоспоживанням, зокрема умовно-паливного еквівалента продукції, еквівалентних витрат первинної енергії та вуглецевої інтенсивності, на основі уніфікованих коефіцієнтів перерахунку. Запропонований метод може бути застосований при виробничому плануванні, технічному переозброєнні підприємств та оцінці ефективності енерго- і ресурсозберігаючих заходів.*

***Ключові слова:** наскрізна енергоємність, наскрізні витратні коефіцієнти, інтегральні енергетичні показники, спрощений метод розрахунку, виробництво металопродукції, вуглецева інтенсивність*

**Постановка проблеми.** Гірничо-металургійні процеси належать до багатостадійних технологічних систем, для яких характерні широка

номенклатура, марочний і розмірний склад товарної продукції, наявність циклів вироблення та споживання енергоносіїв власного виробництва, а також утворення вторинних енергоресурсів у вигляді доменного, коксового та конвертерного газів, пари котлів-утилізаторів і систем випарного охолодження, які споживаються в межах підприємства або частково передаються іншим підприємствам. Це ускладнює використання прямого методу розрахунку енергоемності виробництва металопродукції шляхом ділення обсягу спожитого палива на обсяг виробництва товарної продукції [1]. Не маючи надійного інструменту для точного визначення питомих і загальних витрат паливно-енергетичних ресурсів на виробництво металопродукції, неможливо коректно оцінити пов'язані з цим енергоспоживанням інтегральні енергетичні показники продукції, зокрема умовно-паливний еквівалент продукції, еквівалентні витрати первинної енергії, паливну складову сумарного енергоспоживання, а також вуглецеву інтенсивність. Додатковою складовою цієї проблеми є необхідність швидкої оцінки змін у технології виробництва та впровадження енерго- і ресурсозберігаючих заходів.

Таким чином, існує проблема точного і оперативного розрахунку показників енергоемності металопродукції та пов'язаних з ними інтегральних енергетичних показників у багатостадійному виробництві.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для коректних розрахунків енергоемності металопродукції та похідних від неї інтегральних енергетичних показників використовують відомий алгоритм визначення наскрізної енергоемності [1], що ґрунтується на балансуванні надходження і споживання всіх видів енергії, незалежно від форми чи способу її використання, а також на балансуванні матеріальних потоків, з яких формується товарна продукція.

Останні роботи з розвитку методології наскрізної енергоемності були пов'язані з визначенням загального споживання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) на підприємствах гірничо-металургійного комплексу [2-4], визначенням питомих витрат ПЕР при виробництві конкретних видів металопродукції [5, 6], урахуванням технічного переозброєння підприємств гірничо-металургійного комплексу України [7, 8], комплексною оцінкою впливу різних енергозберігаючих технологій на загальну енергоемність виробництва [9, 10], нормуванням споживання ПЕР [11], а також розширенням

використання наскрізної енергоємності для оцінки викидів шкідливих речовин, парникових газів і твердих суспендованих частинок пилу [12-14].

Разом із перевагами існують і певні проблеми у застосуванні цього підходу. По-перше, його реалізація вимагає високої якості вихідних даних та злагодженої роботи бухгалтерії, енергетичних служб і технологів [8]. По-друге, складність процесів металургійного виробництва, а також велика кількість енергетичних потоків ускладнюють їх точний облік, особливо в умовах частих змін у структурі виробництва. По-третє, метод наскрізної енергоємності поки що не завжди інтегрується з міжнародними системами аналізу життєвого циклу, зокрема з LCA, що ускладнює його використання в задачах розрахунку похідних показників, у тому числі вуглецевого сліду продукції, а також у проєктах, орієнтованих на експорт або залучення міжнародних інвестицій.

**Мета дослідження.** Метою даної роботи є розвиток методу розрахунку інтегральних енергетичних показників металургійної продукції на основі методики наскрізної енергоємності шляхом узагальнення даних про енергоспоживання металургійних підприємств України, якій забезпечує достатню точність оперативного аналізу впливу змін технологічних і виробничих параметрів у багатостадійному виробництві.

**Викладення основного матеріалу дослідження.**

Наскрізна заводська енергоємність  $i$ -го виду продукції визначається за формулою [1]:

$$d_{zi} = t_{zi} + K_{\text{еe}} \cdot e_{zi} + K_{\text{eh}} \cdot h_{zi} \quad (1)$$

де:

$d_{zi}$  – наскрізна заводська енергоємність  $i$ -го виду продукції, кг у.п./н.о.;

$t_{zi}$  – наскрізна питома витрата умовного палива, кг у.п./н.о.;

$e_{zi}$  – наскрізна питома витрата покупної електроенергії, кг у.п./н.о.;

$h_{zi}$  – наскрізна питома витрата теплоенергії, кг у.п./н.о.;

$K_{\text{еe}}$  – калорійний еквівалент для перерахунку витрат електроенергії у витрати умовного палива, кг у.п./кВт·год;

$K_{\text{eh}}$  – калорійний еквівалент для перерахунку витрат теплоенергії у витрати умовного палива, кг у.п./Мкал.

Для забезпечення порівнянності результатів між різними підприємствами та періодами часу прийнята стандартна величина калорійного еквівалента для електроенергії  $K_{\text{еe}} = 0,34$  кг у.п./кВт·год, що усуває вплив змінних факторів на

оцінку енергоємності продукції. Це особливо важливо, оскільки з роками витрати палива на виробництво 1 кВт·год електроенергії змінювалися в межах 0,32–0,39 кг у.п./кВт·год.

Оцінку прямих викидів парникових газів, що пов’язані з використанням паливно-енергетичних ресурсів у промисловості, зазвичай виконують за такою моделлю:

$$E_c = \sum E_i + E_r \quad (2)$$

де:

$E_c$ –емісія парникових газів на підприємстві в результаті власної виробничої діяльності, т CO<sub>2</sub>;

$E_i$ –емісії парникових газів при виробництві і-го виду продукції, т CO<sub>2</sub>;

$E_r$ –емісія парникових газів в результаті допоміжної діяльності підприємства, т CO<sub>2</sub>.

Під допоміжною діяльністю розуміється виконання робіт або надання послуг (транспортних, ремонтних, управлінських тощо), обсяг яких не завжди відповідає обсягу основної продукції. Кількість утворюваних при цьому парникових газів є незначною (зазвичай не більше 1 %), тому її можна вважати умовно-постійною величиною.

Методологія розрахунку коефіцієнтів емісії для металургійних підприємств передбачає визначення кількості викидів CO<sub>2</sub> на одиницю продукції або спожитої енергії. Для цього використовується загальний принцип оцінки обсягу палива, що спалюється, та кількості вуглецю, який у ньому міститься. Базове рівняння для розрахунку емісії  $E_i$  для окремого процесу або виду палива виглядає так:

$$E_i = A \cdot C \cdot F \cdot (44/12) \quad (3)$$

де

$E_i$ –емісія від і-го процесу або спалювання певного виду палива, т CO<sub>2</sub>;

$A$ –кількість використаного палива, т або м<sup>3</sup>;

$C$ –масова частка вуглецю в паливі, частка від одиниці (безрозмірна величина);

$F$ –коефіцієнт повного згоряння вуглецю, частка від одиниці (зазвичай близький до 1);

44/12– коефіцієнт, що враховує співвідношення молекулярних мас  $\text{CO}_2$  (44) та атомарного вуглецю (12).

Коефіцієнт емісії парникових газів  $e_i$  визначається відношенням кількості утвореного  $\text{CO}_2$   $E_i$  до обсягу виробленої продукції  $Q_i$ :

$$e_i = E_i / Q_i \quad (4)$$

Остаточна модель для оцінки загальної емісії парникових газів на підприємстві  $E_c$  включає розрахунки для кожного окремого процесу або виду палива, зведені у вигляді суми:

$$E_c = \sum (Q_i \cdot e_i) + E_r \quad (5)$$

Алгоритм розрахунку величини  $e_i$  для кожного виду продукції детально викладено в [13].

Згідно з моделлю (5), було здійснено розрахунок емісії парникових газів для різних видів продукції, що виробляються на заводі «А». Результати розрахунків наведені у вигляді графіків на Рис. 1 і Рис. 2.

Основними продуктами металургійного виробництва є агломерат, чавун, сталь, прокат (листовий та сортовий), заготовки, вапно, виливниці та пара ТЕЦ. Як видно з Рис. 2, основними джерелами емісії діоксиду вуглецю є виробництво чавуну та пари на ТЕЦ. Незважаючи на те, що пара ТЕЦ не є основним кінцевим продуктом металургійного виробництва, її виробництво вимагає значної кількості палива, що пояснює високий коефіцієнт емісії. Загалом, сумарні емісії від цих процесів складають значну частину загального обсягу викидів.

Недоліки моделі (5) полягають у відсутності взаємозв'язку між обсягом виробництва кожного виду продукції. Це не дозволяє прогнозувати емісію парникових газів при зміні сортаменту або обсягу виробництва кінцевої продукції навіть за умови незмінної технології на кожному переділі. Відповідно до моделі (5), можна прогнозувати зміну розмірів емісії тільки за рахунок зміни величини  $e_i$ , яка визначається головним чином питомими витратами палива на виробництво  $i$ -ї продукції (товарної або напівфабрикатів).

Обсяг виготовлення напівфабрикатів жорстко детермінований кількістю товарної продукції (в основному прокату) та витратними коефіцієнтами

напівфабрикатів на виготовлення наступної продукції. В умовах складної технологічної схеми взаємозалежність між виробництвом продукції та емісією парникових газів не враховується.

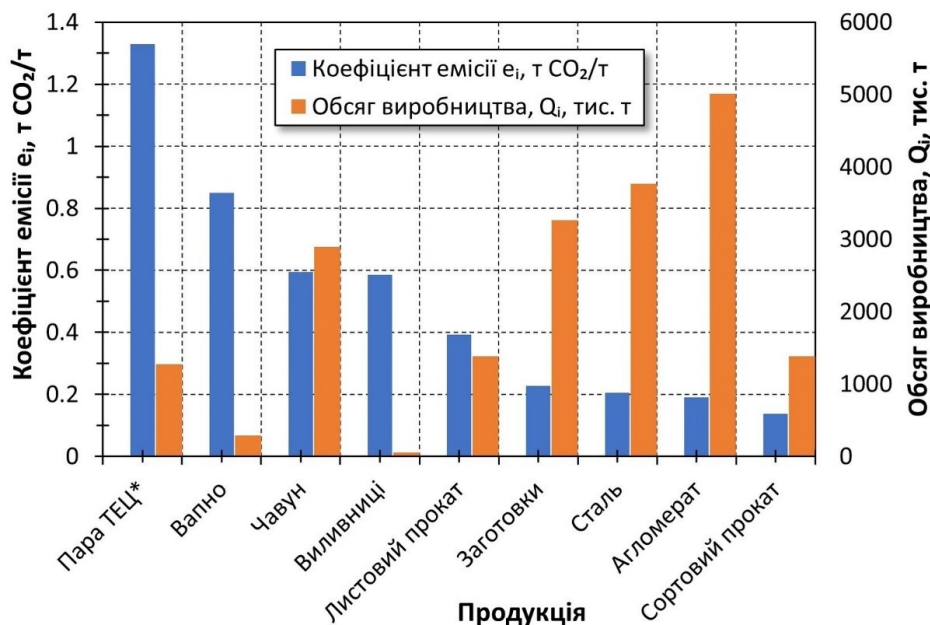


Рисунок 1 – Коефіцієнти емісії та обсяги виробництва для продукції заводу «А»

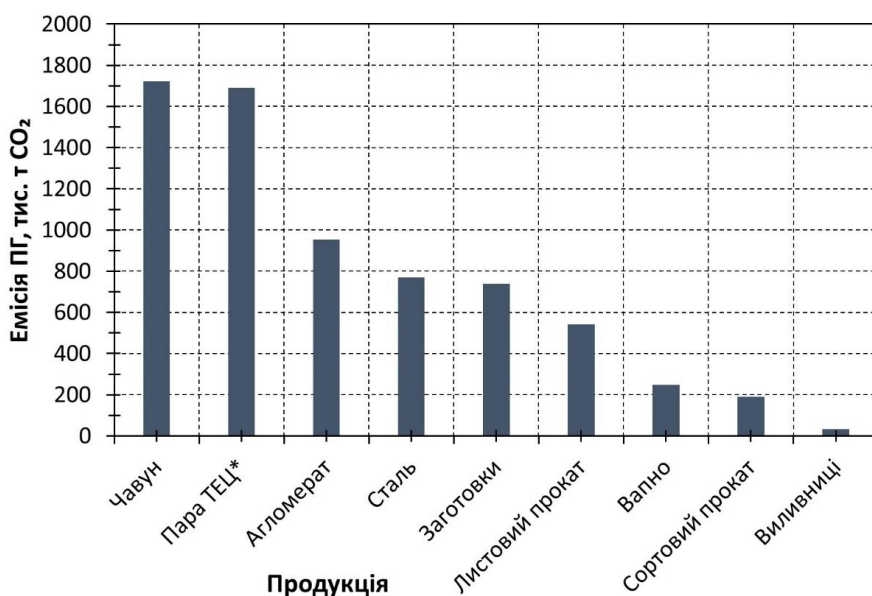


Рисунок 2 – Обсяги емісії парникових газів для продукції заводу «А»

Таким чином, отримані результати демонструють обмеженість використання моделі (5) для комплексного аналізу виробничих процесів з точки зору емісії парникових газів. Для підвищення точності прогнозування

необхідно враховувати взаємозв'язок між технологічними переділами та їх енергетичними витратами.

З урахуванням цього розроблено модель розрахунку емісії парникових газів, яка базується на принципах планування виробництва. У першу чергу прогнозується обсяг виробництва товарної продукції та її сортамент, після чого розраховується потреба в кожному виді напівфабрикату, змінному обладнанні та енергоресурсах на основі їх витратних коефіцієнтів на виготовлення продукції кожного переділу. Запропонована модель має вигляд:

$$E = \sum Q_{jt} \cdot \Sigma(q_{ci} \cdot e_i + q_{pi} \cdot e_p + v_p) \quad (6)$$

де:

$E$  – загальна емісія парникових газів на підприємстві, т  $\text{CO}_2$ ;

$Q_{jt}$  – обсяг виробництва  $j$ -ї товарної продукції, т/рік;

$q_{ci}$ ,  $q_{pi}$  – наскрізний витратний коефіцієнт відповідно для кожного напівфабрикату та пари ТЕЦ на виробництво  $i$ -ї товарної продукції, т  $\text{CO}_2$ /т або т  $\text{CO}_2$ /Гкал;

$e_p$  – коефіцієнт емісії парникових газів при виробництві пари ТЕЦ, т  $\text{CO}_2$ /Гкал;

$v_p$  – умовно-постійна величина емісії парникових газів при здійсненні іншої діяльності, т  $\text{CO}_2$ /т.

Величина коефіцієнта емісії  $e_p$  визначається розрахунковим шляхом, виходячи з витрат умовного палива на виробництво пари на ТЕЦ та з урахуванням співвідношення різних видів палива, що використовуються на ТЕЦ. З врахуванням рекомендацій [15, 16], середні значення викидів діоксиду вуглецю на тонну умовного палива для кожного газу:

- Для доменного газу – 6,747 т  $\text{CO}_2$ .
- Для коксового газу – 1,243 т  $\text{CO}_2$ .
- Для природного газу – 1,675 т  $\text{CO}_2$ .

Таким чином, модель (6) може бути повністю ототожнена з моделлю (1) розрахунку наскрізної енергоемності товарної продукції на основі наскрізних витратних коефіцієнтів напівфабрикатів, де коефіцієнти емісії кожного виду продукції виконують роль цехової енергоемності. Це означає, що всі залежності заводської енергоемності продукції від технологічних параметрів

виробництва є аналогічними залежностям емісії парникових газів від тих самих параметрів.

На Рис. 3 та Рис. 4 представлені результати розрахунку емісії діоксиду вуглецю для заводу «А» у відповідності з моделлю (6). Розрахунки здійснено для періоду, в якому проводилася інвентаризація парникових газів.

Рис. 3 демонструє результати розрахунку емісії діоксиду вуглецю від різних напівфабрикатів для заводу «А» у виробництві чотирьох видів продукції: Листовий прокат, Сортовий прокат, Сляби та Чавун. Найбільший внесок у загальну емісію діоксиду вуглецю забезпечують чавун, пара ТЕЦ та агломерат. Ці напівфабрикати мають високі питомі показники викидів, що значно впливають на загальну емісію для всіх видів продукції. Найменший вплив мають виливниці та інші малозначні напівфабрикати.

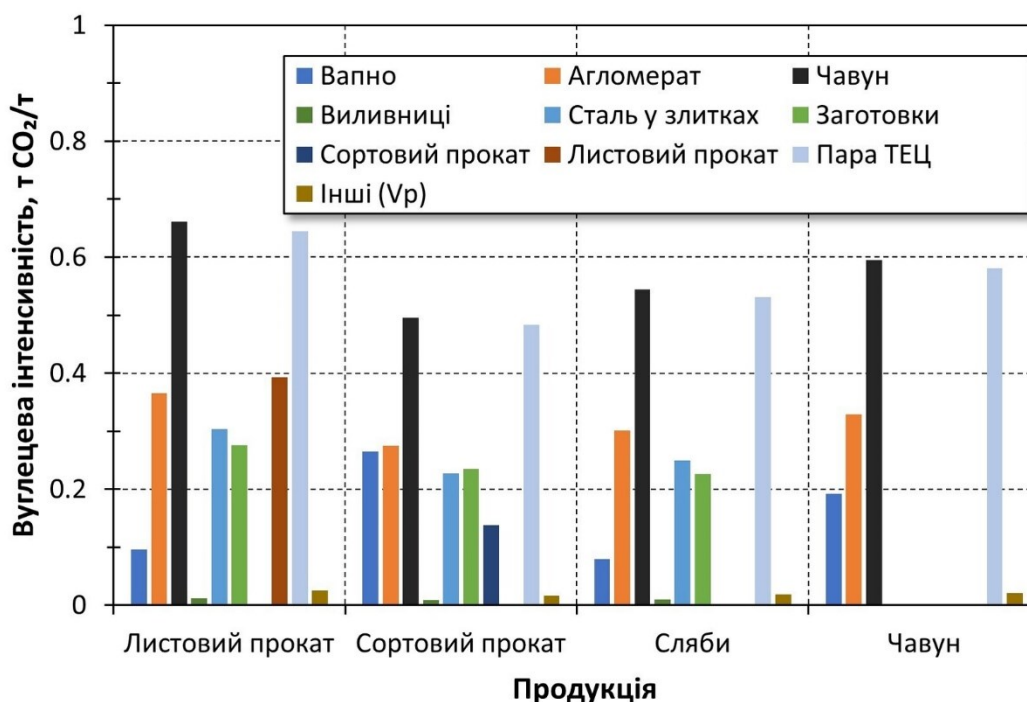


Рисунок 3 – Внесок напівфабрикатів в питомий вуглецевий слід продукції заводу «А» за моделлю (6)

На Рис. 4 показаний загальний ефект накопичення вуглецевої інтенсивності через всі стадії виробництва. Отримані значення можуть використовуватися для оцінки повного вуглецевого сліду кожного продукту або для порівняння ефективності різних технологічних процесів з точки зору

викидів парникових газів. Аналіз рисунка показує, що прокатна продукція є найбільш енергоємної з точки зору емісій парникових газів, оскільки вона включає в себе емісії усіх попередніх ділянок.

Проведений розрахунок показав, що виробництво однієї тони листового прокату на цьому заводі супроводжується викидом діоксиду вуглецю в атмосферу в обсязі 2,7766 т за методологією наскрізної енергоємності (модель 6) у порівнянні з 0,3928 т за методикою, що не враховує наскрізні переходи (модель 5, Рис. 1). Аналогічна ситуація спостерігається для сортового прокату: 2,1436 т CO<sub>2</sub>/т за моделлю (6) проти 0,1379 т CO<sub>2</sub>/т за моделлю (5).

Відповідно, різниця у значеннях для прокатної продукції значною мірою обумовлена тим, що модель (5) враховує лише поточні емісії для кожного переділу без накопичення емісій від попередніх етапів виробництва. Натомість модель (6) враховує усі наскрізні переходи, зокрема емісії, що виникають на стадіях виробництва чавуну, сталі, заготовок (слябів та блюмів) і їх подальшої обробки.

Порівняння для слябів також показує значну різницю між моделями. За моделлю (6) викиди складають 1,9595 т CO<sub>2</sub>/т, тоді як за моделлю (5) вони відповідають заготовкам із значенням 0,2266 т CO<sub>2</sub>/т. Для чавуну модель (5) дає значення 0,5952 т CO<sub>2</sub>/т, тоді як модель (6) показує значно вищий коефіцієнт емісії 1,7177 т CO<sub>2</sub>/т.

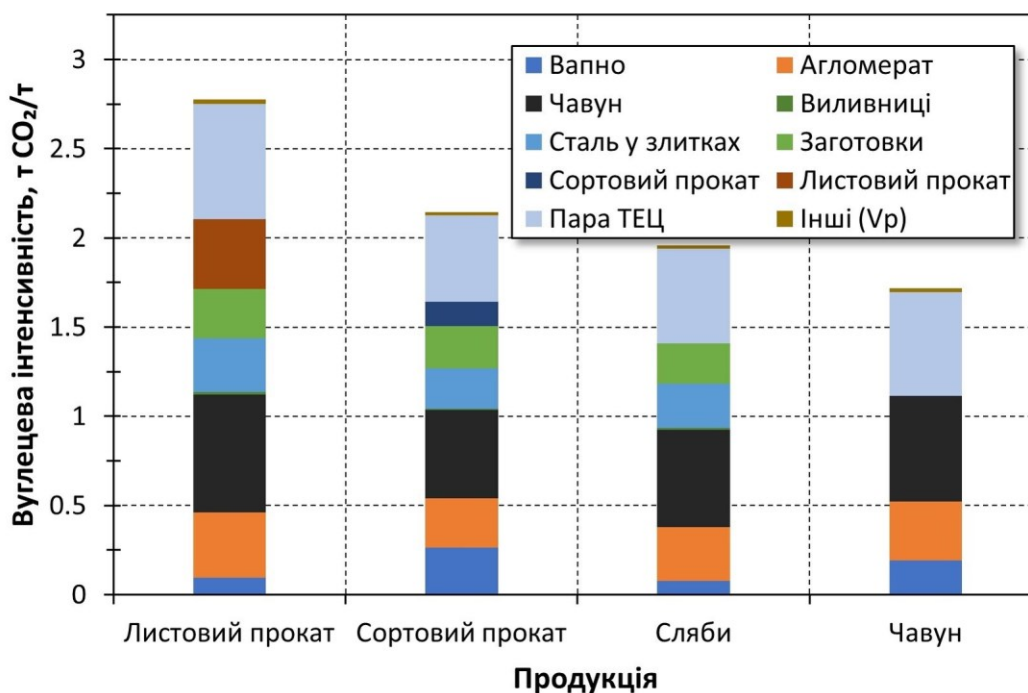


Рисунок 4 – Сумарна вуглецева інтенсивність для заводу «А» по продукції Листового прокату, Сортового прокату, Слябів та Чавуну

Використовуючи модель (6), значно простіше прогнозувати зміну емісії в цілому по підприємству при суттєвих змінах технологічних параметрів виробництва, особливо в тих випадках, коли вони спричиняють значне змінення наскрізного витратного коефіцієнта чавуну на виробництво товарної продукції.

Найпоширенішою методикою оцінювання вуглецевого сліду продукції є LCA (Life Cycle Assessment), яка аналізує весь життєвий цикл – від видобутку ресурсів до утилізації – через підсумовування прямих викидів парникових газів від енергоносіїв. Обмежений LCA застосовується в межах підприємства для порівняння процесів чи оптимізації енергоспоживання, базуючись на прямих витратах без взаємозв'язків між ділянками. Стандарт ISO 14044 рекомендує розширення системи для співпродуктів (напр., пар), але через складність припущень і даних на практиці переважає простий обмежений LCA з фіксованими коефіцієнтами.

Метод LCA передбачає прямий розрахунок питомого вуглецевого сліду за такими формулами:

Цехова продукція:

$$C_{iLCA} = (e_{ci} \times q_r) \times 0,5 + t_{ci} \times 2,5 \quad (7)$$

де

$e_{ci}$  – цехова витрата електроенергії (кВт·год/т),

$t_{ci}$  – цехова витрата умовного палива (кг/т),

$q_r$  – прямий витратний коефіцієнт, що визначає, скільки одиниць енергоносія або продукції витрачається на виробництво одиниці напівфабрикату.

Коефіцієнти 0,5 та 2,5 є прийнятими середньостатистичними значеннями, що характеризують викиди CO<sub>2</sub> від споживання електроенергії та умовного палива відповідно.

Для визначення величини питомого вуглецевого сліду на рівні підприємства всі цехові значення повинні складатися:

$$C_{zLCA} = \Sigma ((e_{ci} \times q_r) \times 0,5 + (t_{ci} \times q_r) \times 2,5) \quad (8)$$

Метод наскрізної енергоемності відрізняється від обмеженого LCA тим, що він враховує внутрішні взаємозв'язки між виробничими процесами через застосування наскрізних коефіцієнтів ( $q_c$ ). Ці коефіцієнти визначаються як відношення витрат енергоносіїв, що проходять через усі етапи виробництва, до первинних витрат для кожного напівфабрикату. Це дозволяє враховувати перерозподіл енергоносіїв між різними процесами та оцінювати їхній внесок у загальний вуглецевий слід.

Крім того, на відміну від обмеженого LCA, метод наскрізної енергоемності також передбачає перетворення покупної електроенергії в умовне паливо через калорійний коефіцієнт 0,34 кг у.п. / кВт·год. Після перетворення електроенергія оцінюється через загальний коефіцієнт викидів 2,5 кг CO<sub>2</sub> / кг у.п.

Таким чином, загальний розрахунок питомого вуглецевого сліду продукції на рівні підприємства за методом наскрізної енергоемності здійснюється за формулою:

$$C_{zCE} = \Sigma ((e_{ci} \times q_c) \times 0,34 \times 2,5 + (t_{ci} \times q_c) \times 2,5) \quad (9)$$

Однією з переваг методики наскрізної енергоємності є можливість окремого обліку витрат покупної електроенергії та умовного палива на виробництво продукції. Відповідно до цього, було виконано розрахунок питомої вуглецевої інтенсивності (сумарної вуглецевої інтенсивності для заводу «А» за продукцією листового прокату, сортового прокату, слябів та чавуну) з використанням моделі (9) та проведено порівняння розрахунків з результатами, представленими на Рис. 4. Результати порівняння наведені на Рис. 5.

Результати порівняння показують, що значення емісій при виробництві розглянутої продукції – листового прокату, сортового прокату, слябів та чавуну, розраховані за формулою (9) та з використанням повної комплексної моделі (6), практично однакові. Відмінності становлять менше 1%, що може не братися до уваги, враховуючи похибки вихідних даних.

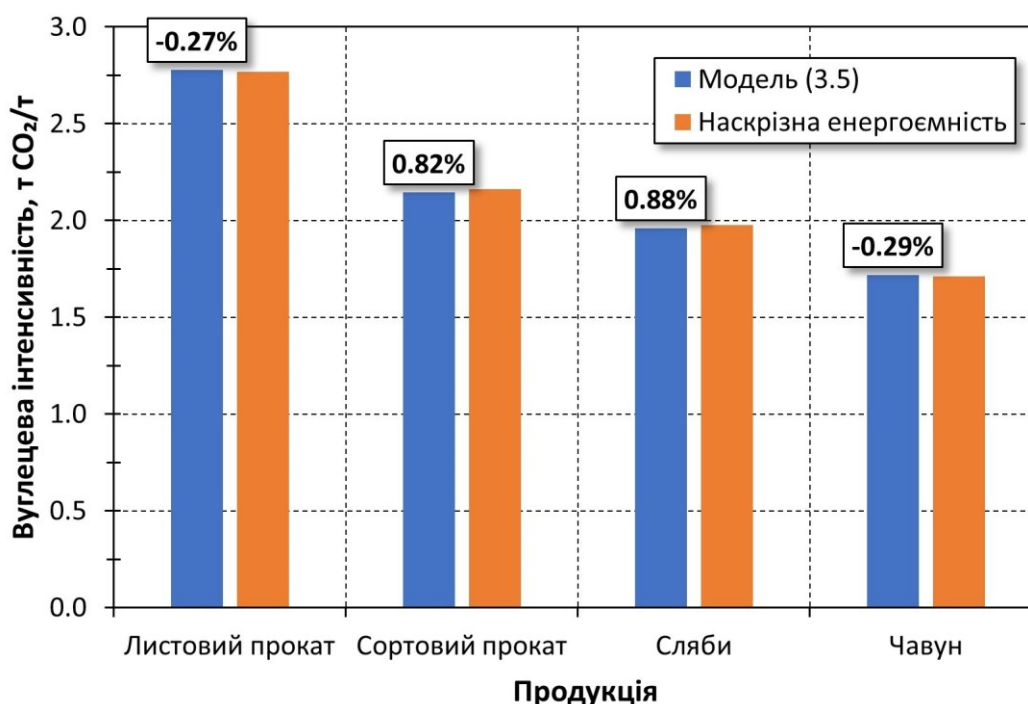


Рисунок 5 – Порівняння сумарної вуглецевої інтенсивності для заводу «А» за продукцією листового прокату, сортового прокату, слябів та чавуну, розрахованої за формулами (9) та моделлю (6)

Практично повний збіг результатів, отриманих за формулою (9) та за моделями (6), можна пояснити наступним чином. Використання формули (9) дозволяє визначити сумарну вуглецеву інтенсивність продукції без

необхідності безпосереднього розрахунку коефіцієнтів емісії для кожного переділу або напівфабрикату. Формула використовує наскрізні витратні коефіцієнти, які визначаються для всього виробничого ланцюга від початкової сировини до кінцевої продукції. Це означає, що всі енергетичні витрати, пов'язані з виробництвом продукції, вже враховані у витратних коефіцієнтах, але не безпосередньо у вигляді емісій діоксиду вуглецю. Замість цього, вони виражені у вигляді спожитої енергії та палива, яка надалі перетворюється у емісії CO<sub>2</sub> шляхом застосування уніфікованих коефіцієнтів перерахунку.

В методології LCA (Life Cycle Assessment) стандартний підхід до розрахунку викидів CO<sub>2</sub> передбачає перетворення прямих енергетичних витрат (палива, електроенергії, пари тощо) на емісії через множення на відповідні коефіцієнти емісії. Ці коефіцієнти визначають, скільки діоксиду вуглецю викидається при споживанні одиниці енергії або палива.

Однак у випадку використання формули (6) відбувається інший підхід. Замість розрахунку емісій для кожного окремого переділу або процесу, проводиться перетворення всіх енерговитрат на емісію діоксиду вуглецю через застосування принципу LCA не до прямих витрат енергоносіїв, а до наскрізних витратних коефіцієнтів. Це означає, що ми використовуємо узагальнену інформацію про енергоємність продукції, яка включає всі витрати енергії, палива та пари ТЕЦ на всіх переділах виробництва. Перетворення енерговитрат на емісію CO<sub>2</sub> відбувається за допомогою уніфікованих коефіцієнтів перерахунку, що дозволяє застосувати принцип LCA до всього виробничого ланцюга відразу.

Слід підкреслити, що емісії CO<sub>2</sub> не є частиною розрахунків наскрізної енергоємності, а визначаються лише на етапі перетворення енерговитрат у вуглецеву інтенсивність. Це важливий момент, оскільки самі по собі енерговитрати не передбачають визначення кількості викидів діоксиду вуглецю. Всі розрахунки енергоємності здійснюються незалежно від розрахунків викидів CO<sub>2</sub>. Проте, використовуючи відомі коефіцієнти перерахунку, можна безпосередньо перетворити ці енерговитрати у еквівалентні емісії CO<sub>2</sub>.

Використання наскрізних витратних коефіцієнтів дозволяє отримати точні значення емісій CO<sub>2</sub> без додаткових розрахунків, оскільки вся інформація

про енергетичні витрати вже включена у ці коефіцієнти. Це означає, що розрахунок за формулою (9) може бути настільки ж точним, як і розрахунок за допомогою повної комплексної моделі (6), оскільки він враховує всі енерговитрати на всіх етапах виробництва. Фактично, методика, яка застосовується у формулі (9), реалізує принцип LCA на рівні всього виробничого ланцюга, використовуючи наскрізні витратні коефіцієнти замість прямих витрат палива та електроенергії.

Такий підхід значно спрощує процес розрахунку емісій діоксиду вуглецю, оскільки не вимагає додаткових досліджень щодо визначення коефіцієнтів емісії для кожного переділу або напівфабрикату. Всі необхідні дані вже доступні у вигляді витрат енергоносіїв, які враховані у розрахунку енергоемності продукції. Перетворення енерговитрат у емісії CO<sub>2</sub> за допомогою стандартних коефіцієнтів перерахунку є прямим застосуванням принципу LCA, але з використанням наскрізних витратних коефіцієнтів замість прямих даних про споживання енергоносіїв.

Таким чином, методика, яка ґрунтується на використанні наскрізних витратних коефіцієнтів та перетворенні енерговитрат у емісії CO<sub>2</sub> за допомогою коефіцієнтів перерахунку, забезпечує високий рівень точності розрахунків. Це дозволяє застосовувати її для оцінки вуглецевої інтенсивності продукції на рівні всього підприємства без додаткових досліджень або складних розрахунків.

Для порівняння методик LCA та наскрізної енергоемності було використано дані, що містять обсяги споживання електроенергії та умовного палива, а також прямі та наскрізні витратні коефіцієнти для різних напівфабрикатів на металургійних підприємствах України. Проведені розрахунки дозволяють оцінити вуглецевий слід за кожною методикою окремо та порівняти загальні результати.

На рисунках Рис. 6 та Рис. 7 представлено значення питомого вуглецевого сліду для кожного напівфабрикату, розраховані за методами обмеженого LCA та наскрізної енергоемності відповідно. Розрахунок вуглецевого сліду для різних напівфабрикатів демонструє суттєві відмінності між методами, які пояснюються особливостями перерозподілу ресурсів у загальному виробничому процесі.

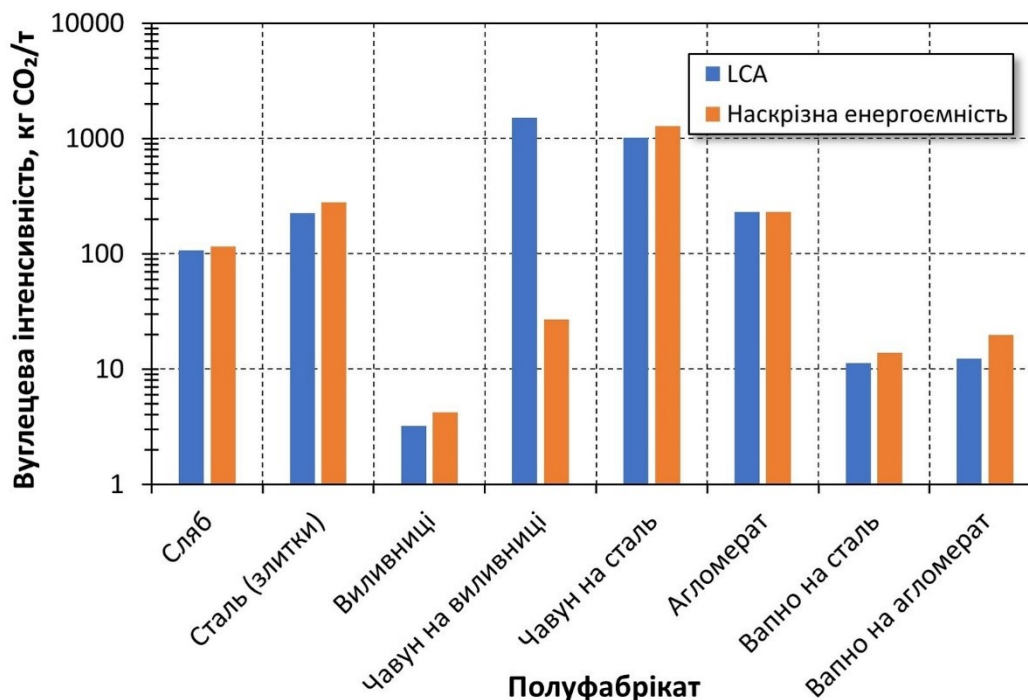


Рисунок 6 – Порівняння питомого вуглецевого сліду напівфабрикатів за методами обмеженого LCA та наскрізної енергоємності.

Для напівфабрикату «Сляб» метод обмеженого LCA дає значення 106,75 кг CO<sub>2</sub>/т, тоді як метод наскрізної енергоємності – 114,98 кг CO<sub>2</sub>/т.

Розрахунки для сталі (злитків) показують значення 225,20 кг CO<sub>2</sub>/т за методом обмеженого LCA та 277,49 кг CO<sub>2</sub>/т за методом наскрізної енергоємності.

Найбільші відхилення спостерігаються для чавуну на виливниці, де значення за методом обмеженого LCA дорівнює 1505,43 кг CO<sub>2</sub>/т, тоді як за методом наскрізної енергоємності – лише 26,88 кг CO<sub>2</sub>/т. Величезна різниця пояснюється тим, що при використанні методу наскрізної енергоємності враховується що, значна частина енергоносіїв перерозподіляється на інші процеси, знижуючи підсумковий результат. Подібна ситуація спостерігається для вапна на агломерат, де перерозподіл ресурсів також суттєво впливає на кінцеве значення.

Відмінності в розрахунках також спостерігаються для чавуну на сталь, де обмежений LCA дає значення 1018,92 кг CO<sub>2</sub>/т, тоді як метод наскрізної енергоємності – 1271,02 кг CO<sub>2</sub>/т. У цьому випадку більш високе значення за

методом наскрізної енергоемності пояснюється врахуванням перерозподілу енергоносіїв між виробничими ділянками.

Для агломерату різниця між методами є мінімальною – 231,77 кг CO<sub>2</sub>/т за обмеженим LCA та 229,87 кг CO<sub>2</sub>/т за наскрізною енергоемністю. Це може пояснюватися тим, що перерозподіл ресурсів у даному випадку незначний.

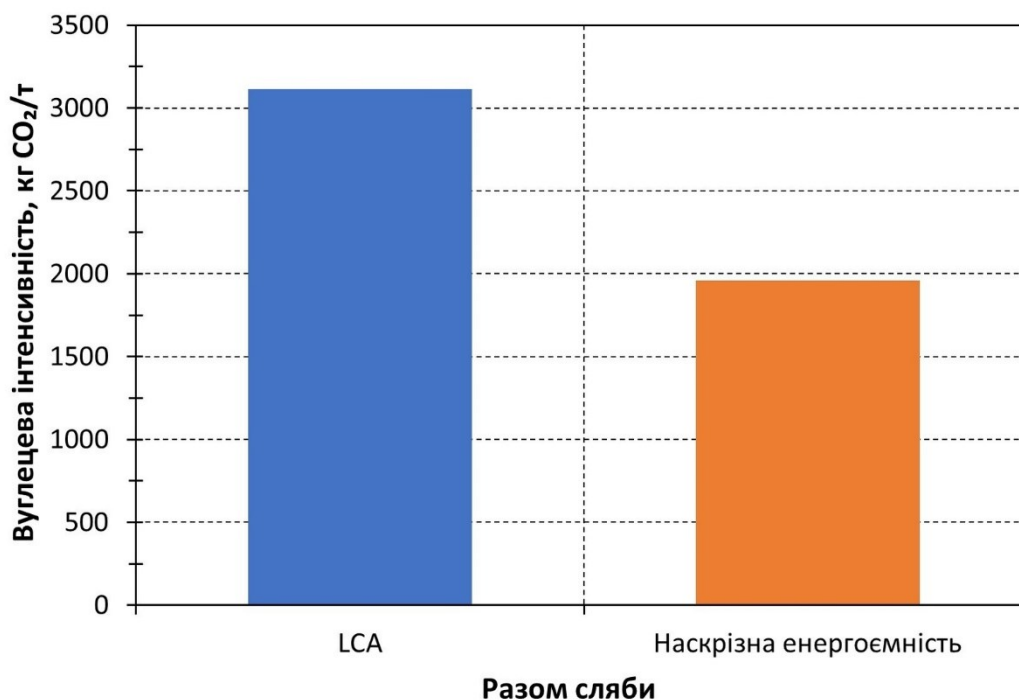


Рисунок 7 – Питомий вуглецевий слід катаних слябів за методами обмеженого LCA та наскрізної енергоемності.

На Рис. 7 представлено порівняння загального питомого вуглецевого сліду продукції "катані сляби", розрахованого за обома методами. Загальне значення за методом обмеженого LCA становить 3114,81 кг CO<sub>2</sub>/т, тоді як за методом наскрізної енергоемності – 1957,99 кг CO<sub>2</sub>/т. Це відхилення на 37,17% чітко демонструє, що врахування перерозподілу ресурсів між виробничими ділянками, відображає реальні енерговитрати на кожному етапі виробництва.

**Висновки.** Розроблено спрощений метод розрахунку інтегральних енергетичних показників металургійної продукції на основі методики наскрізної енергоемності, у якому наскрізні витратні коефіцієнти використовуються як узагальнена розрахункова база без побудови повної деталізованої моделі для кожного переділу.

Показано, що врахування внутрішніх взаємозв'язків між технологічними переділами, матеріальними потоками та вторинними енергоресурсами є необхідною умовою коректного розрахунку інтегральних енергетичних показників у багатостадійному виробництві. Використання спрощеного підходу на основі наскрізної енергоємності забезпечує високу точність порівняно з повною розрахунковою схемою, а розбіжність результатів для розглянутих видів продукції не перевищує 1–1,5 %.

Встановлено, що отримані енергетичні показники можуть бути використані як універсальна база для розрахунку похідних показників, пов'язаних з енергоспоживанням, зокрема умовно-паливного еквівалента продукції, еквівалентних витрат первинної енергії, паливної складової сумарного енергоспоживання, а також вуглецевої інтенсивності на основі уніфікованих коефіцієнтів перерахунку.

Порівняння з обмеженим LCA показало, що використання стандартних коефіцієнтів без урахування внутрішніх виробничих взаємозв'язків може призводити до суттєвого викривлення результатів. Для окремих видів прокатної продукції відхилення за показником вуглецевої інтенсивності може досягати 38 %, що підтверджує доцільність застосування підходу на основі наскрізної енергоємності не лише в задачах виробничого планування, технічного переозброєння та оцінки ефективності енерго- і ресурсозберігаючих заходів, а й для забезпечення зіставності розрахунків у міжнародних проектах та в умовах адаптації до європейських вимог щодо оцінки продукції.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Д.В. Сталинский, В.Г. Литвиненко, Т.А. Андреева, Г.Н. Грецкая, А.Л. Скоромный, Энергоемкость металлургической продукции, ГП «УкрНТЦ «Энергосталь», Харьков, Украина, 2015, 347 С.
2. E. Worrell, L. Price, N. Martin, J. Farla, R. Schaeffer, Energy intensity in the iron and steel industry: a comparison of physical and economic indicators, *Energy Policy*. 25 (1997), pp. 727–744. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(97\)00064-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(97)00064-5).
3. Каневский А.Л., Лесовой В.В., Андреева Т.А., А.Л. Скоромный, Слисаренко А.А., Использование топливно-энергетических ресурсов на предприятиях объединения «Металлургпром», в: Казантип-ЭКО-2009 Экология Энерго- И Ресурсосбережение Охрана Окружающей Среды И Здоровье Человека Утилизация Отходов Сборник Научных Статей XVII Международной Научно-Практической Конференции, Издательство САГА, Харьков, 2009: сс. 323–329.

4. В.Н. Майорченко, А.А. Романенко, В.Л. Сиротенко, Л.С. Давыденко, Н.В. Дорошенко, Л.В. Морщавко, Анализ состояния технического переоснащения, модернизации и внедрения новейших технологий энергосбережения на предприятиях ГМК Украины, *Металлургическая И Горнорудная Промышленность*. 4 (2010), сс. 131–134.
5. Перетятко Р.А., Каневский А.Л., А.Л. Скоромный, Слисаренко А.А., К вопросу о расчете удельных затрат ТЭР при производстве чугуна, в: *Казантип-ЭКО-2010 Экология Энерго- И Ресурсосбережение Охрана Окружающей Среды И Здоровье Человека Утилизация Отходов Сборник Научных Статей XVIII Международной Научно-Практической Конференции*, НТМТ, Харьков, 2010: сс. 69–73.
6. Д.В. Сталинский, Р.А. Перетятко, Т.А. Андреева, Энергоемкость проката, *Вісник Національного Технічного Університету ХПІ*. 46 (2011), сс. 131–138.
7. В.Г. Литвиненко, В.Д. Мантула, А.Л. Каневский, Т.А. Андреева, В.Ю. Юхнов, Оценка энергоэффективности производства на основе анализа сквозной энергоемкости продукции, *Екологія Та Промисловість*. 2 (2009), сс. 47–53.
8. В.Г. Литвиненко, А.Л. Скоромный, А.А. Слисаренко, Т.А. Андреева, Р.А. Перетятко, Снижение энергозатрат при производстве металлопродукции при реконструкции мартеновского цеха ПРАО «Донецксталь» - металлургический завод», *Екологія Та Промисловість*. 3 (2012), сс. 99–105.
9. Д.В. Сталинский, В.Г. Литвиненко, В.А. Ботштейн, Т.А. Андреева, А.Л. Скоромный, Влияние технического перевооружения сталеплавильного производства на энергопотребление в черной металлургии, *Екологія Та Промисловість*. 1 (2011), сс. 58–63.
10. Т.А. Андреева, В.Г. Литвиненко, А.Л. Скоромный, А.А. Слисаренко, Влияние внедрения непрерывной разливки стали на изменение энергоемкости металлопродукции, *Екологія Та Промисловість*. 4 (2013), сс. 80–84.
11. Т.А. Андреева, В.Г. Литвиненко, А.А. Слисаренко, Г.Н. Грецкая, А.Л. Скоромный, К вопросу совершенствования системы нормирования топливно-энергетических ресурсов, *Екологія Та Промисловість*. 2 (2010), сс. 55–60.
12. Каневский А.Л., А.Л. Скоромный, Литвиненко В.Г., Андреева Т.А., Слисаренко А.А., Оценка снижения выбросов парниковых газов за счет внедрения основных энергосберегающих мероприятий на предприятиях горно-металлургического комплекса Украины, в: *Казантип-ЭКО-2009 Экология Энерго- И Ресурсосбережение Охрана Окружающей Среды И Здоровье Человека Утилизация Отходов Сборник Научных Статей XVII Международной Научно-Практической Конференции*, Издательство САГА, Харьков, 2009: сс. 365–372.
13. Литвиненко В.Г., Грецкая Г.Н., Дамрин В.Я., Закономерность образования и прогнозирования эмиссии двуокси углерода при производстве металлургической продукции, *Екологія Та Промисловість*. 4 (2008), сс. 14–18.
14. Литвиненко В.Г., Мантула В.Д., Грецкая Г.Н., Основные закономерности образования парниковых газов на металлургических предприятиях, *Екологія Та Промисловість*. 1 (2007), сс. 28–31.
15. United States Environmental Protection Agency (EPA), Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories, United States Environmental Protection Agency, 2025. <https://www.epa.gov/climateleadership/ghg-emission-factors-hub>.
16. O. US EPA, GHG Emission Factors Hub, (2025). <https://www.epa.gov/climateleadership/ghg-emission-factors-hub> (accessed April 6, 2025).

Received 11.03.2026.

Accepted 17.04.2026.

Published 30.04.2026

UDC 628.511:620.9

**A SIMPLIFIED METHOD FOR CALCULATING INTEGRAL ENERGY INDICATORS  
OF METALLURGICAL PRODUCTS USING THROUGH  
CONSUMPTION COEFFICIENTS**

**Abstract.** *The study considers the use of through consumption coefficients for the simplified calculation of energy performance indicators of metallurgical products in multi-stage production systems. It is shown that the conventional direct approach does not adequately account for internal relationships between technological stages, material flows, and secondary energy resources, which limits its applicability in predictive and comparative calculations. A simplified method is proposed in which through consumption coefficients are used as a generalized calculation basis for determining integral energy indicators of products without constructing a fully detailed model for each stage. The approach preserves high accuracy compared to the full calculation scheme while significantly simplifying the assessment of the effects of changes in production structure, product mix, and technological parameters. It is further demonstrated that the obtained energy indicators can be used for rapid calculation of related indicators associated with energy consumption, including fuel-equivalent values, primary energy equivalents, and carbon intensity, based on unified conversion factors. The proposed method can be applied in production planning, technical modernization of enterprises, and evaluation of the effectiveness of energy- and resource-saving measures.*

**Keywords:** *through-plant energy intensity, through consumption coefficients, integral energy indicators, calculation method, metal products production, carbon intensity*

**REFERENCES**

1. D.V. Stalinskii, V.G. Litvinenko, T.A. Andreeva, G.N. Gretskeya, A.L. Skoromnii, *Energoemkost metallurgicheskoi produktsii*, GP «UkrNTTs «Energostal», Kharkov, Ukraina, 2015, 347 S.
2. E. Worrell, L. Price, N. Martin, J. Farla, R. Schaeffer, *Energy intensity in the iron and steel industry: a comparison of physical and economic indicators*, *Energy Policy*. 25 (1997), pp. 727–744. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(97\)00064-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(97)00064-5).
3. Kanevskii A.L., Lesovoi V.V., Andreeva T.A., A.L. Skoromnii, Slisarenko A.A., *Ispolzovanie toplivno-energeticheskikh resursov na predpriyatiyakh obedineniya «Metallurgprom»*, v: Kazantip-EKO-2009 *Ekologiya Energo- I Resursosberezhenie Okhrana Okruzhayushchei Sredi I Zdorove Cheloveka Utilizatsiya Otkhodov Sbornik Nauchnikh Statei XVII Mezhdunarodnoi Nauchno-Prakticheskoi Konferentsii*, Izdatelstvo SAGA, Kharkov, 2009: ss. 323–329.
4. V.N. Maiorchenko, A.A. Romanenko, V.L. Sirotenko, L.S. Davidenko, N.V. Doroshenko, L.V. Morshchavko, *Analiz sostoyaniya tekhnicheskogo pereosnashcheniya, modernizatsii i vnedreniya noveishikh tekhnologii energosberezheniya na predpriyatiyakh GMK Ukraini*, *Metallurgicheskaya I Gornorudnaya Promishlennost*. 4 (2010), ss. 131–134.
5. Peretyatko R.A., Kanevskii A.L., A.L. Skoromnii, Slisarenko A.A., *K voprosu o raschete udelnikh zatrat TER pri proizvodstve chuguna*, v: Kazantip-EKO-2010 *Ekologiya Energo- I*

- Resursosberezhenie Okhrana Okruzhayushchei Sredi I Zdorove Cheloveka Utilizatsiya Otkhodov Sbornik Nauchnikh Statei XVIII Mezhdunarodnoi Nauchno-Prakticheskoi Konferentsii, NTMT, Kharkov, 2010: ss. 69–73.
6. D.V. Stalinskii, R.A. Peretyatko, T.A. Andreeva, Energoemkost prokata, Visnik Natsionalnogo Tekhnichnogo Universitetu KhPI. 46 (2011), ss. 131–138.
  7. V.G. Litvinenko, V.D. Mantula, A.L. Kanevskii, T.A. Andreeva, V.Yu. Yukhnov, Otsenka energoeffektivnosti proizvodstva na osnove analiza skvoznoi energoemkosti produktsii, Yekologiya Ta Promislovist. 2 (2009), ss. 47–53.
  8. V.G. Litvinenko, A.L. Skoromnii, A.A. Slisarenko, T.A. Andreeva, R.A. Peretyatko, Snizhenie energozatrat pri proizvodstve metalloproduksii pri rekonstruktsii martenovskogo tsekha PRAO «Donetskstal» - metallurgicheskii zavod», Yekologiya Ta Promislovist. 3 (2012), ss. 99–105.
  9. D.V. Stalinskii, V.G. Litvinenko, V.A. Botshtein, T.A. Andreeva, A.L. Skoromnii, Vliyanie tekhnicheskogo perevooruzheniya staleplavilnogo proizvodstva na energopotreblenie v chernoi metallurgii, Yekologiya Ta Promislovist. 1 (2011), ss. 58–63.
  10. T.A. Andreeva, V.G. Litvinenko, A.L. Skoromnii, A.A. Slisarenko, Vliyanie vnedreniya neprerivnoi razlivki stali na izmenenie energoemkosti metalloproduksii, Yekologiya Ta Promislovist. 4 (2013), ss. 80–84.
  11. T.A. Andreeva, V.G. Litvinenko, A.A. Slisarenko, G.N. Gretskaya, A.L. Skoromnii, K voprosu sovershenstvovaniya sistemi normirovaniya toplivno-energeticheskikh resursov, Yekologiya Ta Promislovist. 2 (2010), ss. 55–60.
  12. Kanevskii A.L., A.L. Skoromnii, Litvinenko V.G., Andreeva T.A., Slisarenko A.A., Otsenka snizheniya vibrosov parnikovikh gazov za schet vnedreniya osnovnikh energosberegayushchikh meropriyatii na predpriyatiyakh gorno-metallurgicheskogo kompleksa Ukraini, v: Kazantip-EKO-2009 Ekologiya Energo- I Resursosberezhenie Okhrana Okruzhayushchei Sredi I Zdorove Cheloveka Utilizatsiya Otkhodov Sbornik Nauchnikh Statei XVII Mezhdunarodnoi Nauchno-Prakticheskoi Konferentsii, Izdatelstvo SAGA, Kharkov, 2009: ss. 365–372.
  13. Litvinenko V.G., Gretskaya G.N., Damrin V.Ya., Zakonomernost obrazovaniya i prognozirovaniya emissii dvoukisi ugleroda pri proizvodstve metallurgicheskoi produktsii, Yekologiya Ta Promislovist. 4 (2008), ss. 14–18.
  14. Litvinenko V.G., Mantula V.D., Gretskaya G.N., Osnovnie zakonomernosti obrazovaniya parnikovikh gazov na metallurgicheskikh predpriyatiyakh, Yekologiya Ta Promislovist. 1 (2007), ss. 28–31.
  15. United States Environmental Protection Agency (EPA), Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories, United States Environmental Protection Agency, 2025. <https://www.epa.gov/climateleadership/ghg-emission-factors-hub>.
  16. O. US EPA, GHG Emission Factors Hub, (2025). <https://www.epa.gov/climateleadership/ghg-emission-factors-hub> (accessed April 6, 2025).

**Скоромний Андрій Леонідович**, кандидат техн. наук, старший науковий співробітник кафедри теплового інжинірингу та енергетичних технологій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», e-mail: andrey.scoromnyi@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7093-9070>

**Skoromnyi Andrii Leonidovich**, PhD, senior researcher of Department of Thermal Engineering and Energy Technology of the Dnipro University of Technology, e-mail: andrey.scoromnyi@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7093-9070>