

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА ТА ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ

ISSN 2522-4344 (Online), ISSN 1562-8965 (Print). The problems of general energy, 2020, 4(63): 58–62
doi: <https://doi.org/10.15407/pge2020.04.058>

УДК 669.162

Г.О. КУЦ, канд. техн. наук, ст. наук. співр., ORCID: 0000-0002-1311-8361,
О.І. ТЕСЛЕНКО, канд. техн. наук, ORCID: 0000-0002-3772-5991,
Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

МЕТОДИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ЩОДО РОЗПОДІЛУ ПОВНОЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЕНЕРГОЄМНОСТІ МІЖ ОКРЕМИМИ ВИДАМИ ПРОДУКЦІЇ БАГАТОПРОДУКТОВИХ ВИРОБНИЦТВ

Розглянуто питання методичного підходу до розподілу повної технологічної енергоємності між окремими видами продукції багатопродуктових виробництв на прикладі коксохімічного та доменного виробництв чорної металургії. Наведені результати розрахунків енергоємності окремо коксу, коксового газу і хімічних продуктів коксохімічного виробництва та чавуну і доменного шлаку доменного виробництва.

Ключові слова: енергоємність, багатопродуктове виробництво, кокс, коксовий газ, чавун, шлак, теплота згорання.

Дослідження з визначення повної технологічної енергоємності продукції чорної металургії показали, що ряд виробництв, які складають окремі ланки технологічного ланцюгу, відносяться до багатопродуктових виробництв. До них відносяться коксохімічне, доменне, кисневе, енергетичне виробництво, в яких кінцева продукція розподіляється за ознаками призначення щонайменше на два і більше видів. У діючих методиках та розробках [1–4] не надано роз'яснення щодо розподілу повної технологічної енергоємності багатопродуктових виробництв за їх окремими видами продукції.

У даній статті розглянуто питання методичного підходу до розв'язання зазначеної проблеми. Запропоновано стосовно багатопродуктових виробництв, продукція яких належить до енергоресурсів та має теплотворну здатність, розподіл повної технологічної енергоємності між окремими видами продукції здійснювати за їх ваговими показниками та їх теплотворною здатністю (теплотою згорання). Для тих багатопродуктових виробництв, які мають негорючі види продукції, повну технологічну енергоємність виробництва між продуктами пропонується розподіляти за ваговими обсягами виходу окремих видів продукції та їх теплоємністю (ентальпією).

Теоретичними передумовами запропонованого методичного підходу розподілу повної технологіч-

ної енергоємності багатопродуктових виробництв за їх окремими видами продукції є закон Гесса (основний закон термохімії, що є прямим наслідком першого закону термодинаміки стосовно до хімічних реакцій), який формулюється наступним чином: тепловий ефект хімічної реакції, що проводиться в ізобарно-ізотермічних або ізохорно-ізотермічних умовах, залежить тільки від виду та стану вихідних речовин і продуктів реакції і не залежить від шляху її протікання. Закон Гесса ґрунтується на базовому положенні термодинаміки: ентальпія є функцією стану системи та не залежить від того, яким чином ця система утворилася.

За цим законом тепловий ефект термохімічної реакції (Q) не залежить від шляху реакції, від відношення вихідних речовин до продуктів реакції, а визначається різницею ентальпій продуктів та вихідних речовин:

$$Q = \Delta H = \sum H_{j \text{ прод}} - \sum H_{i \text{ вих. реч.}} \quad (1)$$

де $\sum H_{j \text{ прод}}$ – сума ентальпій всіх j продуктів хімічної реакції; $\sum H_{i \text{ вих. реч.}}$ – сума ентальпій всіх i вихідних речовин.

При розробці запропонованого методичного підходу був також використаний один з наслідків із закону Гесса, а саме: тепловий ефект хімічної реакції (Q) дорівнює різниці сум теплоти згорання (Q_3) вихідних речовин (i) і продуктів реакції (j), помножених на відповідні стехіометричні коефіцієнти (ν_i, ν_j):

© Г.О. КУЦ, О.І. ТЕСЛЕНКО, 2020

$$Q = \sum (v_j \cdot Q_{3j})_{\text{прод}} - \sum (v_i \cdot Q_{3i})_{\text{вих.реч.}} \quad (2)$$

Ця обставина дозволяє, користуючись табличними значеннями теплоти згоряння речовин, розрахувати теплоту реакції, не вдаючись до експерименту.

Якщо початковий і кінцевий стани хімічної реакції (реакцій) збігаються, то їх тепловий ефект дорівнює нулю. Піролізний процес виробництва коксу та супутніх хімічних продуктів відповідає таким умовам закону Гесса.

Використовуючи закон Гесса, можна скласти тепловий баланс процесу коксування вугілля в коксових печах по теплоті згоряння (теплотворній здатності) вихідного вугілля у шихті та кінцевих продуктів коксового виробництва. Тепловий баланс процесу коксування вугілля в коксових печах засновано на законі збереження енергії та його наслідку – рівнянні вихідної (витратної) та кінцевої (продуктової) частин цього балансу. Особливістю теплового балансу коксового виробництва за законом Гесса є невизначеність теплового ефекту процесу коксування, який визначається при складанні теплового балансу, але не є основою для його складання.

Тепловий ефект для зазвичай використовуваного вугілля у шихті відносно незначний (до 4 ккал/кг шихти), що складає приблизно 1% теплоти, витраченої на коксування, і несуттєво впливає на витрату теплоти на коксування. Несуттєвість теплового ефекту коксування для малометаморфозних вугілля та шихти, які використовуються на коксохімічних заводах України, дозволяють у практичних розрахунках приймати його рівним нулю [5].

В якості багатопродуктових виробництв у даній статті розглянуто коксохімічне та доменне виробництва, продукція яких в послідовних ланках технологічної схеми мають визначальні складові у формуванні енергоемності загального металургійного виробництва.

Для коксохімічного виробництва, як найбільш багатопродуктового порівняно з іншими виробництвами металургійної технологічної схеми, розрахункова формула визначення повної технологічної енергоемності кожного продукту в вагових

частках до вагового обсягу вугільної шихти матиме наступний вигляд:

$$e_{\text{к.в.}} = e_{\text{к}} \frac{a_{\text{к}}}{a_{\text{в.ш.}}} \cdot \frac{Q_{\text{н.к}}^p}{Q_{\text{н.в.ш}}^p} + e_{\text{к.г.}} \frac{a_{\text{к.г.}}}{a_{\text{в.ш.}}} \cdot \frac{Q_{\text{н.к.г}}^p}{Q_{\text{н.в.ш}}^p} + \sum_i e_{\text{х.о.}}^i \frac{a_{\text{х.л.}}^i}{a_{\text{в.ш.}}} \cdot \frac{Q_{\text{н.х.л}}^{pi}}{Q_{\text{н.в.ш}}^p}, \text{ кг у.п./одиночку виміру}; \quad (3)$$

де $e_{\text{к.в.}}, e_{\text{к}}, e_{\text{к.г.}}, e_{\text{х.л.}}^i$ – повна технологічна енергоемність продукції коксового виробництва, коксу, коксового газу і хімічних продуктів, кг у.п./т; $a_{\text{в.ш.}}$ – ваговий обсяг сухої вугільної шихти, кг; $a_{\text{к}}, a_{\text{к.г.}}, a_{\text{х.л.}}^i$ – вагові обсяги виходу коксу, коксового газу, i видів хімічної продукції до сухої вугільної шихти, кг; $Q_{\text{н.в.ш}}^p, Q_{\text{н.к}}^p, Q_{\text{н.к.г}}^p, Q_{\text{н.х.л}}^{pi}$ – нижча теплота згоряння вугільної шихти, коксу, коксового газу, i видів хімічних продуктів, ккал/кг (ккал/м³); i – кількість видів хімічних продуктів, одиниць.

Вихідні дані розрахунку повної технологічної енергоемності продуктів коксохімічного виробництва були прийняті наступними [5, 6]: обсяг вугільної шихти – 1480 кг, вихід коксу – 1222,9 кг, коксового газу – 330 м³/т шихти при нижчій теплоті згоряння коксового газу 4200 ккал/м³. Вихід хімічних продуктів у сирому (неочищеному) коксовому газі, г/м³: смола – від 100 до 120; бензолні вуглеводні – від 30 до 40; аміак – від 7 до 10; сірководень – від 5 до 20, інші хімічні продукти в несуттєвій кількості. Вагові обсяги виходу коксу, сирого (неочищеного) коксового газу, хімічних продуктів до сухої вугільної шихти та їх теплота згоряння наведені в табл. 1.

За результатами розрахунку повної технологічної енергоемності коксохімічного виробництва з урахуванням використання вторинних енергетичних ресурсів визначена енергоемність кожного продукту: кокс – 200,70 кг у.п./т; коксовий газ – 32,84 кг у.п./м³; хімічна продукція – 43,107 кг у.п./т у складі: смола – 12,864 кг у.п./т, бензолні вуглеводи – 4,775 у.п./т, аміак – 0,605 у.п./т, сірководень – 0,946 у.п./т. Вихідні дані та результати розрахунку повної технологічної енергоемності коксохімічного виробництва наведені в табл. 2, до яких включено прямі витрати енергії (складова енергоресурсів) та енергія матеріалізована у складових енергоносіїв та сировини.

Таблиця 1. Вагові обсяги виходу продукції коксохімічного виробництва від обсягу вугільної шихти та їх теплота згоряння [5, 6]

Показники	Одиниці виміру	Види продукції							
		вугільна шихта	кокс	коксовий газ	смола	бензолні вуглеводи	аміак	сірководень	ціан
Вагові обсяги продукції	кг	1480,0	1229,9	330,0 (м ³)	60,3	20,16	5,02	10,0	0,3
Теплота згоряння (нижча)	ккал/кг	8000,0	7000,0	4200,0 (ккал/м ³)	9300,0	10168,0	5177,0	4045,0	4958,3

Для підприємств, які мають багатопродуктове виробництво негорючих видів продукції, як приклад, доменне виробництво чавуну, повна технологічна енергоємність може бути розподілена між продуктами за їх ваговими обсягами та теплоємністю. Розрахункова формула повної технологічної енергоємності окремого виду продукції для доменного виробництва має наступний вигляд:

$$e_{д.в.} = e_{ч} \cdot \frac{a_{ч} \cdot c_{ч}}{a_{з.р.ш} \cdot c_{з.р.ш}} + e_{ш} \cdot \frac{a_{ш} \cdot c_{ш}}{a_{з.р.ш} \cdot c_{з.р.ш}}, \quad (4)$$

де $e_{д.в.}$, $e_{ч}$, $e_{ш}$ – повна технологічна енергоємність доменного виробництва, чавуну і шлаку, відповідно, кг у.п./т; $a_{ч}$, $a_{ш}$ – вагові обсяги виробництва чавуну і шлаку, кг; $a_{з.р.ш}$ – ваговий обсяг витрат залізорудної шихти в доменному процесі виробництва, кг; $c_{з.р.ш}$, $c_{ч}$, $c_{ш}$ – теплоємність залізорудної шихти, чавуну і шлаку, ккал/кг·°С.

Вихідні дані для розрахунку повної технологічної енергоємності чавуну та шлаку наступні [7, 8]: ваговий обсяг залізорудної шихти дорівнює 1537 кг (до складу залізорудної шихти входять, кг: агломерат – 1000,0; окатиші – 461,0; вапняк – 42,0; метало-добавки – 22,0; залізна руда – 9,0; марганцева руда – 3,0); теплоємність залізорудної шихти (усереднена за складовими) складає 0,17 ккал/кг·°С.

Ваговий обсяг виходу окремих видів продукції доменного виробництва за усередненими даними роботи металургійних підприємств галузі України в 2015 р. склав [10]: чавун – 1076,0 кг, доменний шлак – 461,0 кг при ваговому обсязі залізорудної шихти 1537,0 кг.

В результаті розрахунків, наведених в табл. 3, визначено, що повна технологічна енергоємність чавуну складає 680,591 кг у.п./т та доменного шлаку – 316,7 кг у.п./т.

Одержані з використанням запропонованих методичних положень дані розподілу повної технологічної енергоємності багатопродуктових виробництв чорної металургії за окремими видами продукції з урахуванням розподілу енерговитрат на супутні продукти показують на значні розрахункові зниження енергоємності основних видів продукції - коксу і чавуну, які є вихідними складовими в наступних ланках технологічного процесу металургійного виробництва, в тому числі кінцевої продукції – сталевого прокату.

Повна технологічна енергоємність коксу з урахуванням розподілу енерговитрат на інші супутні продукти коксохімічного виробництва зменшується на 27,2%. Без врахування розподілу енерговитрат за видами продукції багатопродуктового коксохімічного виробництва повна технологічна енергоємність коксу дорівнювала

Таблиця 2. Вихідні дані [5, 6] та результати розрахунку повної технологічної енергоємності коксохімічного виробництва з врахуванням розподілу між видами продукції

Види енергоресурсів енергоносіїв, сировини і матеріалів	Одиниці виміру	Витрати енергоресурсів, енергоносіїв, сировини та матеріалів на 1 т вугільної шихти	Повна енергоємність коксохімічного виробництва та її складові, кг у.п.	Частка енергоємності складових до повної енергоємності продукції, %
1. Енергоресурси:			210,488	69,0
- теплоенергія	Мкал	279,0	47,151	
- електроенергія	кВт·год	59,2	22,437	
- паливо	кг у.п.	140,9	140,9	
2. Енергоносії:			6,982	2,7
- електроенергія	кВт·год	59,2	2,546	
- теплоенергія	Мкал	279,0	4,436	
3. Сировина:			86,728	28,3
- вугілля коксове	кг	1480	86,728	
Повна технологічна енергоємність продукції			304,197	100
Використання теплових ВЕР			27,550	
Повна технологічна енергоємність коксохімічного виробництва з урахуванням використання теплових ВЕР, у т.ч.			276,647	
- кокс			201,156	
- коксовий газ			32,384	
- хімічні продукти			43,107	

276,647 кг у.п./т, а з врахуванням розподілу зменшилась до 201,156 кг у.п./т (табл. 2).

Аналогічна ситуація спостерігається для багатопродуктового доменного виробництва: повна технологічна енергоемність чавуну з врахуванням розподілу енерговитрат на інші супутні продукти доменного виробництва зменшується на 31,8%. Без урахування розподілу енерговитрат за видами продукції виробництва повна технологічна енергоемність чавуну дорівнювала 997,291 кг у.п./т, а з врахуванням розподілу зменшилась до 680,591 кг у.п./т (табл. 3).

Застосування запропонованого методичного підходу розподілу повної технологічної енергоемності багатопродуктових виробництв за видами

продукції також дозволяє визначати вплив впровадження енергозберігаючих заходів на енергоемність кожного з видів продукції окремо.

Наприклад, за розподілом повної технологічної енергоемності поміж продуктами коксування вугілля можна обраховувати вплив використання теплових вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР) на енергоемність коксохімічного виробництва загалом та кожного виду продукції окремо [5, 11]:

- загальні теплові ВЕР для всіх продуктів коксування: при утилізації теплоти відхідних газів, які утворилися при спалюванні палива для обігріву коксових печей. Теплота відхідних димових газів, які утворилися при спалюванні палива для

Таблиця 3. Вихідні дані [7–9] та результати розрахунку повної технологічної енергоемності доменного виробництва з врахуванням розподілу між видами продукції

Види енергоресурсів, енергоносіїв, сировини та матеріалів	Одиниці виміру	Витрати енергоресурсів, енергоносіїв, сировини та матеріалів на 1 т залізорудної шихти	Повна енергоемність доменного виробництва та її складові, кг у. п.	Частка енергоемності складових до повної енергоемності продукції, %
1. Енергоресурси:			742,439	60,6
- природний газ	м ³	110,0	127,600	
- електроенергія	кВт·год	17,9	6,633	
- кокс	кг	598,1	598,100	
- теплоенергія	Мкал	59,8	10,106	
2. Енергоносії:			245,555	19,2
- природний газ	м ³	110,0	0,824	
- стиснуте повітря	– « –	27,0	2,727	
- доменне дуття	– « –	1400,0	87,091	
- кисень	– « –	115,0	28,957	
- вода технічна	– « –	19,0	3,941	
- кокс	кг	598,1	120,311	
- електроенергія	кВт·год	17,5	0,753	
- теплоенергія	Мкал	59,8	0,951	
3. Сировина:			246,939	20,2
- руда залізна	кг	9,0	0,307	
- руда марганцева	– « –	3,0	0,130	
- агломерат	– « –	1000,0	161,147	
- окатиші	– « –	461,0	84,884	
- металодобавки	– « –	22,0	0,001	
- вапняк	– « –	42,0	0,470	
Повна енергоемність доменного виробництва			1234,933	100,0
Використання доменного газу і інших вторинних енергетичних ресурсів			237,642	
Повна технологічна енергоемність доменного виробництва з врахуванням використання ВЕР, у т.ч.			997,291	
- чавуну			680,591	
- шлаку			316,700	

обігріву коксових печей та, зазвичай, скидаються у атмосферне повітря через димову трубу, досягає 14% теплоти згоряння газу, витраченого для обігріву коксових печей. Впровадження цієї енергозберігаючої технології забезпечить загальне зменшення повної технологічної енергоемності всіх продуктів коксохімічного виробництва;

- окремі теплові ВЕР для деяких продуктів коксування: застосування окремих енергозберігаючих технологій забезпечить зменшення повної технологічної енергоемності безпосередньо коксу і коксового газу та хімічних продуктів окремо, а у підсумку і загалом всього коксохімічного виробництва:

а) для коксу: при утилізації фізичної теплоти розжареного коксу із застосуванням технології сухого гасіння коксу для виробництва теплової та/або електричної енергії. Фізична теплота розжареного коксу досягає 44% теплоти згоряння газоподібного палива для обігріву коксових печей;

б) для коксового газу та хімічних продуктів: при утилізації фізичної теплоти коксового газу та хімічних продуктів із застосуванням первинних та вторинних охолоджувачів коксового газу для отримання теплової енергії. Фізична теплота гарячого коксового газу на виході з коксових печей досягає 13% теплоти згоряння газу для обігріву коксових печей, а фізична теплота інших хімічних продуктів на виході з коксових печей досягає 4% відповідно.

Запропоновані методичні положення розподілу повної технологічної енергоемності між окремими видами продукції багатопродуктових виробництв можуть бути використані в багатопродуктових виробництвах нафтопереробної та хімічної промисловості, в переробній промисловості, зокрема, при виробництві молочної продукції, тощо.

ВИСНОВКИ

Запропоновані методичні положення розподілу повної технологічної енергоемності між окремими видами продукції багатопродуктових виробництв.

Для багатопродуктових виробництв, в яких продукція відповідає видам енергоресурсів та має теплотворну здатність, розподіл енерговитрат проводиться за ваговими обсягами та тепловою згоряння.

Для виробництв, які мають багатопродуктове виробництво негорючих видів продукції, розподіл енерговитрат між продуктами проводиться за ваговими обсягами та теплоемністю (ентальпією).

Результати визначення згідно запропонованих методичних положень повної технологічної енергоемності між окремими видами продукції з урахуванням розподілу енергетичних витрат для коксохімічного та доменного виробництв показали на значне розрахункове зниження (до 30%) повної технологічної енергоемності основної продукції

цих виробництв (коксу та чавуну), які є основними та найбільш енергоемними проміжними видами продукції в послідовних ланках загального технологічного процесу металургійного виробництва. Зниження енергоемності кожного з цих основних видів продукції обумовлено урахуванням розподілу енергоемності виробництва між всіма видами продукції багатопродуктового виробництва.

Застосування запропонованих методичних підходів розподілу повної технологічної енергоемності багатопродуктових виробництв за видами продукції також дозволяє визначати вплив впровадження енергозберігаючих заходів на енергоемність кожного з видів продукції окремо.

1. ДСТУ 3682-98 (ГОСТ 30583-98) Енергозбереження. Методика визначення повної енергоемності продукції, робіт, послуг. [Чинний від 1999-01-01]. К.: Держспоживстандарт України. 2011. 11 с. (Державний стандарт України).

2. ГОСТ Р 51750-2001 Энергосбережение. Методика определения энергоёмкости при производстве продукции и оказания услуг в технологических энергетических системах. [Введен в действие 2002-01-01]. М.: ИПК Изд-во стандартов. 27 с. (Государственный стандарт Российской Федерации).

3. Лисиенко Н.Г., Щелоков Я.М., Розин С.Е., Дружинина О.Г., Пареньков А.Е. Энергетический анализ, методика и базовое информационное обеспечение. Екатеринбург: Изд. УГТУ-УПИ. 2001. 97 с.

4. Грищенко С.Г., Сталинский Д.В., Литвиненко В.Г. Применение метода сквозной энергоёмкости для анализа затрат энергоресурсов ГМК. *Горнорудная и металлургическая промышленность*. 2009. № 1. С. 110—114.

5. Ханин И.М., Обуховский Я.М., Юшин В.В., Ярмчук В.А. Методы расчета материального и теплового балансов коксовых печей. М.: Металлургия. 1972. 160 с.

6. Рудька В.И., Зингерман Ю.Е. Справочник коксохимика. Т. 2. Производство кокса. Харьков: ИНЖЭК, 2014. 728 с.

7. Рамм А. Н. Определение технических показателей доменной плавки. Метод расчета и справочные данные. Л.: ЛПИ, 1971. 110 с.

8. Назюта Л.Ю., Харахулах В.С. Структура энергопотребления доменного производства. *Металл и литье Украины*. 2009. № 3. С. 33—39.

9. Шумаков Н. С., Дмитриев А. Н., Гараева О. Г. Сырые материалы и топливо доменной плавки. Екатеринбург: Институт металлургии УрО РАН. 2007. 392 с.

10. Паливно-енергетичні ресурси України: статистичний збірник. К.: Держстат України. 2016. 158 с.

11. ДСТУ 4370:2011 Енергозбереження. Коксохімічне виробництво. Ресурси енергетичні вторинні. Методика визначення показників виходу та використання. [На заміну ДСТУ 4370:2005; Чинний від 2011-07-01]. К.: Держспоживстандарт України, 2012. 93 с. (Національний стандарт України).

Надійшла до редколегії: 01.10.2020