

Є. В. ГОНЧАРОВ, Н. В. КРЮКОВА, В. С. МАРКОВ, І. В. ПОЛЯКОВ

ЧИ МОЖЕ EROEI (EROI) СЛУЖИТИ КРИТЕРІЄМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ?

Досі немає єдиної оцінки енергетичної діяльності людства. Коефіцієнт корисної дії широко, що використовується в техніці, таким не є, тому що не в змозі оцінити перспективність розробки нових родовищ вугільного палива або запровадження нових видів видобутку енергії, особливо джерел, що відновлюються. EROEI (англ. energy returned on energy invested), або EROI (energy return on investment - співвідношення отриманої енергії до витраченої, енергетична рентабельність) у фізиці, економічній та екологічній енергетиці - відношення кількості придатної до використання (корисної) енергії, отриманої енергії (ресурсу), до кількості енергії, витраченої отримання цього енергетичного ресурсу. Якщо для деякого ресурсу показник EROI менше або дорівнює одиниці, такий ресурс перетворюється на «поглинач» енергії і більше не може бути використаний як первинне джерело енергії». Строго кажучи, EROEI і EROI це не зовсім одне і теж. Якщо перше це співвідношення отриманої та інвестованої енергії, то друге це співвідношення отриманої енергії та інвестицій! Але для деякого спрощення будемо надалі вважати ці поняття тотожними. Причому, що дуже суттєво, при визначенні цих коефіцієнтів не враховуються природні або природні джерела енергії, такі як інсоляція або енергія нуклідів, що діляться. Враховуються лише витрати енергії, пов'язані з діяльністю людини. На перший погляд все правильно і показник EROI дійсно можна використовувати як універсальний критерій. На підставі наведеного аналізу можна досить точно сказати, що EROEI не є універсальним критерієм енергоефективності, але може використовуватися поряд з іншими відомими критеріями і коефіцієнтами. EROEI слід застосовувати лише за кількісних оцінок ефективності видобутої енергії як безпосередньо з пального, так і на електростанціях. Розрахунок EROEI стикається з певними труднощами, які пов'язані зі складністю розрахунку допоміжних витрат та втрат виробленої енергії, а також витрат, пов'язаних із людською працею. EROEI не враховує і екологічну складову процесу видобутку енергії, що може бути дуже важливо.

Ключові слова: EROEI, EROI, енергоефективність, критерій.

Ye. V. HONCHAROV, N. V. KRUYKOVA, V. S. MARKOV, I. V. POLYAKOV

CAN EROEI (EROI) SERVE AS A MEASURE OF ENERGY EFFICIENCY?

Until now, there is no single assessment of the energy activity of mankind. The efficiency factor widely used in technology is not such, as it is not able to assess the prospects for the development of new fossil fuel deposits or the introduction of new types of energy production, especially renewable sources. EROEI (English energy returned on energy invested), or EROI (energy return on investment - the ratio of energy received to spent, energy profitability) in physics, economic and environmental energy - the ratio of the amount of usable (useful) energy received from a particular source energy (resource), to the amount of energy spent to obtain this energy resource. If for some resource the EROI is less than or equal to one, then such a resource turns into an "absorber" of energy and can no longer be used as a primary source of energy." It should be noted that, strictly speaking, EROEI and EROI are not quite the same thing. If the first is the ratio of received and invested energy, then the second is the ratio of received energy and investments! But for some simplification, we will further consider these concepts identical. Moreover, which is very significant, when determining these coefficients, natural or natural sources of energy, such as insolation or the energy of fissile nuclides, are not taken into account. Only the energy costs associated with human activities are taken into account. At first glance, everything is correct and the EROI indicator can really be used as a kind of universal criterion. Based on the above analysis, it can be quite definitely said that EROEI is not a universal energy efficiency criterion, but can be used along with other well-known criteria and coefficients. EROEI should only be used in quantitative assessments of the efficiency of energy produced both directly from combustible fuels and in power plants. The calculation of EROEI faces certain difficulties, which are associated with the complexity of calculating the ancillary costs and losses of energy produced, as well as the costs associated with human labor. EROEI does not take into account the environmental component of the energy production process, which can be critical.

Keywords: EROEI, EROI, energy activity, criterion.

Актуальність. У багатьох сучасних публікаціях, присвячених енергетиці, наприклад, [1], раз у раз стикається з аббревіатурою EROI або EROEI, яка трактується авторами даних публікацій чи не як універсальний критерій енергоефективності. Що ж це таке? Чи можливі взагалі універсальні критерії енергоефективності?

Досі немає єдиної оцінки енергетичної діяльності людства. Коефіцієнт корисної дії, який широко використовується в техніці, таким не є, тому що не в змозі оцінити, наприклад, перспективність розробки нових родовищ вугільного палива або впровадження нових способів видобутку енергії, особливо поновлюваних джерел. З іншого боку, начебто інтуїтивно зрозуміле широкомасштабне словосполучення енергоефективність. Однак воно також потребує роз'яснення. На атестації аспірантів інституту Енергетики, електроніки та електромеханіки НТУ «ХПІ» у кожного другого аспіранта назва дисертації містить слово «енергоефективність». А на запитання, що ж це таке? Ніхто, а це півтора десятки людей, відповіді не зміг.

Аналіз. У [2] пояснюється, що «EROEI (англ. energy returned on energy invested), або EROI (energy return on investment - співвідношення отриманої енергії до

витраченої, енергетична рентабельність) у фізиці, економічній та екологічній енергетиці - відношення кількості придатної до використання (корисної) енергії, отриманої з певного джерела енергії (ресурсу), до кількості енергії, витраченої на отримання цього енергетичного ресурсу. Якщо для деякого ресурсу показник EROI менше або дорівнює одиниці, то такий ресурс перетворюється на «поглинач» енергії і більше не може бути використаний як первинне джерело енергії».

Слід відмітити те, що, суворо кажучи, EROEI і EROI це зовсім одне й те саме. Якщо перше це співвідношення отриманої та інвестованої енергії, то друге це співвідношення отриманої енергії та інвестицій! Але для деякого спрощення будемо надалі вважати ці поняття тотожними. Причому, що дуже суттєво, при визначенні цих коефіцієнтів не враховуються природні джерела енергії, такі як інсоляція або енергія нуклідів, що діляться. Враховуються лише витрати енергії, пов'язані з діяльністю людини. На перший погляд все правильно і показник EROI дійсно можна використовувати як універсальний критерій. Спробуємо розібратися чи це так насправді.

Тепер про те, що таке: **енергоефективність** – ефективне (раціональне) використання енергетичних ресурсів. Використання меншої кількості енергії для забезпечення того ж рівня енергетичного забезпечення будівель або технологічних процесів на виробництві [2].

На відміну від енергозбереження (заощадження, збереження енергії), головним чином спрямованого на зменшення енергоспоживання, енергоефективність (корисність енергоспоживання) – корисне (ефективне) витрачання енергії.

Проаналізуємо ці поняття. У 70-ті роки минулого століття біолог із США Чарльз Холл (Charles Hall), який займався вивченням міграції лосося, ввів у науковий обіг поняття "EROEI", ствержуючи, що хижак не може витратити більше енергії, ніж отримує її на полюванні. Потім Холл переніс цю ідею на видобуток нафти та загалом на енергетику. Будь-який живий організм, у тому числі лосось, не може витратити більше тієї енергії, яку він отримує з їжею. Все відповідає першому та другому законам термодинаміки. Значить, будь-який живий організм можна розглядати як звичайний тепловий двигун, що працює з коефіцієнтом корисної дії (ККД) менше 1, оскільки всю енергію з їжі жоден організм витягти не може. Лосось, споживаючи їжу, може переміщатися, рости і давати потомство, але не здатний виробляти енергію. Тому поняття EROI, поширюючи з лосося на видобуток палива, слід розглядати в іншому ключі. Якщо енергія, що витрачається лососем, завжди менше енергії, отриманої ним з їжею, то коли йдеться про видобуток палива, енергія, отримана з паливом, завжди більше енергії, витраченої на її видобуток.

Коли повна енергія, витрачена на видобуток палива, зрівняється з енергією, що міститься в видобутому паливі, видобуток палива на даному родовищі з енергетичної точки зору стає безглуздим. По суті EROEI у такій інтерпретації є не що інше, як коефіцієнт відтворення енергії. Так, при використанні викопного палива EROEI можна визначити за формулою

$$EROEI = E_2 / E_1,$$

де E_2 - кількість усієї енергії, видобутої на родовищі, Дж;

E_1 - кількість витраченої енергії за час проведення всіх робіт на родовищі, Дж.

Слід зазначити, що це співвідношення може бути принципово більше 1, тому що E_2 та E_1 , не пов'язані між собою другим законом термодинаміки, бо паливо, що видобувається на родовищі, є джерелом енергії, тобто енергоносієм. У зв'язку з цим зрозуміло, що EROEI недоцільно і навряд чи можливо застосовувати до оцінки ефективності того чи іншого електродвигуна або двигуна внутрішнього згоряння, тут достатньо і ККД. Ці двигуни є всього лише перетворювачами енергії, але самі по собі джерелом енергії не є.

У [3] наводяться дані щодо розрахунку EROEI для низки енергоресурсів, в основному стосовно американських умов, отримані Холлом та уточнені Річардом Хейнбергом на 2009 р. Так, чисельне значення EROEI для загальносвітового видобутку нафти становить 19, природного газу - 10, вугілля - 50, бітумінозних пісків - 5,2-5,8, сланцевої нафти - 1,5-1,4, ядерної енергії - 1,1-1,5, гідроенергії - 11-267, вітрової енергії - 18, фотовольтаїки - 3,75-10, етанолу цукрової тростини - 0,8-1,7 (у Бразилії - 8-10), кукурудзяного етанолу - 1,1-1,8,

біодизелю - 1,9-9. Бачимо наскільки великий діапазон EROEI, особливо для гідроенергетики та фотовольтаїки. В [2] наводяться дещо інші показники EROEI (EROI), які показані на рис. 1.

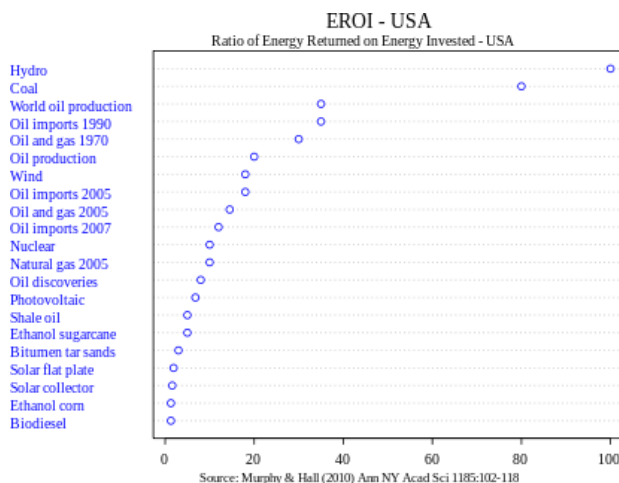


Рис. 1. EROI у США з різних видів енергії

Отже, видно, що загальносвітові показники відрізняються, іноді значно, від американських. Як це можна пояснити?

Зрозуміло, що величину E_1 у наведеній вище формулі розрахувати далеко не просто. Тут необхідно врахувати і капітальні, і експлуатаційні витрати, і витрати, наприклад, демонтаж устаткування. Більше того, витрати енергії слід ще розділити на прямі, які пов'язані безпосередньо з виробничим видобутком енергії та допоміжні, які пов'язані з виробництвом матеріалів для спорудження об'єкта, що вироблятиме енергію. І якщо перші піддаються обліку відносно просто, то облік допоміжних енергозатрат є складним завданням. Дослідники обмежилися обчисленням енерговитрат на основні конструктивні матеріали, що використовуються на промислі (метали, цемент і бітум). На підставі досліджень англійських учених, які наводяться в [3], були прийняті питомі енерговитрати, МДж/кг, виробництва деяких конструкційних матеріалів (середнє - мінімум - максимум): - рахунку на 1 кг) до кількості первинної енергії природного палива Q^o , що розглядається: сталь 31,25 - 6 - 95,70; цемент 5,08 - 0,1 - 11,73; скло 20,08 - 2,56 - 62,10; алюміній 157,1 - 8 - 382,7; мідь 69,02 - 2,4 - 152,71; титан 470,67 - 257,84 - 744,70; бітум 47 - 2,40 - 50,00.

Як бачимо, діапазон мінімум-максимум дуже широкий, що зрештою може суттєво коригувати значення EROEI. Виникає резонне питання щодо втрат уже здобутої енергії, а також як враховуються витрати енергії, пов'язані із людською працею? Ймовірно, такі методи обліку існують, але навряд чи є універсальними.

І ще один важливий чинник. У міру видобутку копалин палив величина їх EROEI зменшується з різних причин, оскільки спочатку, зазвичай, розробляються багаті і доступні поклади. Ця тенденція спостерігається і в Україні, для енергетики якої можна зробити такий висновок на підставі даних щодо прямих спільних енерговитрат при видобутку нафти та газу [4].

Треба також розуміти у зв'язку з розрахунком EROEI, що рентабельність процесу видобутку важлива виробнику та продавцю енергії, але для покупця енергоносіїв EROEI жодного значення не має, оскільки ціну на

них встановлює ринок, де тон задає дешеве паливо. А ось прибуток продавця визначатиметься величиною EROEI – чим вищі витрати, тим менший прибуток.

Згідно з наведеними вище даними найвигодніше виробництво гідроенергії та видобуток кам'яного вугілля. А ось виробництво біодизелю та біоетанолу є найменш вигідним. Виробництво сонячних панелей та використання сонячних колекторів також мають низькі показники EROEI. Хоча очевидно, що для різних країн цей показник суттєво відрізняється. Відомо, що інтенсивність світлового випромінювання Землі змінюється від 1325 Вт/м² до 1412 Вт/м². Середнє значення цієї величини називають світловою сонячною постійною 1367 Вт/м². Однак це сонячне випромінювання повністю земної поверхні не досягає, його значно послаблює атмосфера. Тому навіть за хорошої погоди вдень інтенсивність сонячного випромінювання на Землі може досягати 1000 Вт/м². По Україні середню величину річного сонячного випромінювання прийнято 1350 кВт·год/м² [4]. Цікаво, що атомна енергетика має коефіцієнт 15, тоді як вітроенергетика близько 20. Хоча вітроенергетика відрізняється так званою рваною або нерівномірною пилкою генерації електроенергії. Торішня криза в Техасі показала, наскільки вразливі вітроелектростанції у разі складних погодних умов або простої відсутності вітру. Якщо відмовитися від теплоелектростанцій і априорі поборюватися АЕС, то чи зможуть відновлювані ресурси вийти на рівень нинішнього вироблення електроенергії в розвинених країнах?

З іншого боку, при обговоренні значення EROEI не можна не торкнутися питань екології. При розрахунку EROEI екологічні проблеми не враховуються, але їх не можна ігнорувати. Відповідно до [4] всі українські ГЕС є рівнинними та мають відносно невисокі економічні показники, а також значні екологічні проблеми. А саме через затоплення величезних площ родючих земель. До того ж, екологічний стан річки Дніпро досить критичний. Тому можливості ГЕС в Україні природно обмежені. Однак ГЕС є поряд з АЕС найбільш стабільними виробниками електроенергії і в змозі вирівнювати пилку генерації вітро- та сонячних електростанцій.

За результатами 2019 року структура генеруючих потужностей в Україні виглядала наступним чином (у відсотках, у дужках зазначені встановлені потужності на електростанціях):

ТЕС та ТЕЦ – 57,5 % (31 472 МВт)

АЕС – 29,6 % (13 107 МВт)

ГЕС та ГАЕС – 12,4 % (5500 МВт)

сонячні ЕС – 0,3 % (130 МВт)

вітро ЕС – 0,2 % (86 МВт)

Теплоелектростанції (ТЕС) дають більшу частину енергії, але ж вони й головні забруднювачі атмосфери, трохи менше дають атомні електростанції (АЕС) гідроелектростанції (ГЕС) і гідроакумуляючі (ГАЕС) виробляють всього менше 10%. Таким чином, бачимо, що відносно високий EROEI української енергетики, за рахунок ТЕС, ГЕС і ГАЕС, має дуже негативну екологічну складову.

Висновки.

1. На підставі наведеного аналізу можна досить точно сказати, що EROEI не є універсальним критерієм енергоефективності, але може використовуватися поряд з іншими відомими критеріями і коефіцієнтами.

2. EROEI слід застосовувати лише за кількісних оцінок ефективності видобутої енергії як безпосередньо з палива, так і на електростанціях.

3. Розрахунок EROEI стикається з певними труднощами, які пов'язані зі складністю розрахунку допоміжних витрат та втрат виробленої енергії, а також витрат, пов'язаних із людською працею.

4. EROEI не враховує і екологічну складову процесу видобутку енергії, що може бути дуже важливо.

Список літератури:

- 1 Hall Ch. Why EROI matters // The Oil Drum. URL: <http://www.theoil Drum.com>.
- 2 <https://ru.wikipedia.org/wiki/EROIE>.
- 3 Темукєв Т.Б. О методе расчета EROEI с учетом коэффициента полезного использования энергии // Экономические науки № 3(112), 2014, с.62 -66.
- 4 https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Энергетика_Украины&oldid=101535424
- 5 Murphy, D.J.; Hall, C.A.S. Year in review EROI or energy return on (energy) invested (англ.) // Annals of the New York Academy of Sciences : journal. – 2010. – Vol. 1185. – P. 102-118. – doi: 10.1111/j.1749-6632.2009.05282.x (<https://dx.doi.org/10.1111%2Fj.1749-6632.2009.05282.x>).

References (transliterated):

- 1 Hall Ch. Why EROI matters. The Oil Drum. URL: <http://www.theoil Drum.com>.
- 2 <https://ru.wikipedia.org/wiki/EROIE>.
- 3 Temukuev T.B. O metode rascheta EROEI s uchetoм koefficienta poleznogo ispol'zovaniya e`nergii. E`konomicheskie nauki. No 3(112), 2014, Pp. 62 -66.
- 4 https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=. E`nergetika_Ukrainy`&oldid=101535424
- 5 Murphy, D.J.; Hall, C.A.S. Year in review EROI or energy return on (energy) invested (eng.). Annals of the New York Academy of Sciences: journal. 2010. Vol. 1185. P. 102-118. doi: 10.1111/j.1749-6632.2009.05282.x.

Поступила (received) 10.02.22

Відомості про авторів / About the Authors

Гончаров Євген Вікторович (Honcharov Yevgen Viktorovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри загальної електротехніки; м. Харків; <https://orcid.org/0000-0003-1924-8906>.

Крюкова Наталія Валеріївна (Kryukova Nataliya Valeriivna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри загальної електротехніки; м. Харків.

Марков Владислав Сергійович (Markov Vladislav Sergeevich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри загальної електротехніки; <https://orcid.org/0000-0003-0703-0918>; e-mail: vladyslav.markov@khi.edu.ua.

Поляков Ігор Володимирович (Polyakov Igor Vladimirovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри загальної електротехніки; <https://orcid.org/0000-0001-9329-1705>.