

УДК 620.92

Гелетуха Г.Г., Желєзна Т.А., Дроздова О.І.

Інститут технічної теплофізики НАН України

## КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГІЇ З БІОМАСИ

Запропоновано комплексний підхід до оцінки біоенергетичних технологій, який включає енергетичний, екологічний, економічний та соціальний аналізи. Розглянуто методику енергетичного аналізу, що ґрунтується на використанні таких показників як сукупні витрати енергії та коефіцієнт виходу енергії. Наведено приклади результатів екологічного та економічного аналізу.

Предложен комплексный подход к оценке биоэнергетических технологий, который включает энергетический, экологический, экономический и социальный анализы. Рассмотрена методика энергетического анализа, основанная на использовании таких показателей как совокупные затраты энергии и коэффициент выхода энергии. Приведены примеры результатов экологического и экономического анализа.

The paper presents an integrated approach to the assessment of bioenergy technologies. The method for evaluation of energy efficiency of bioenergy technologies by cumulative energy demand and energy yield coefficient is described. Some examples of environmental and economic analysis results are presented.

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

ДГ – деревні гранули;

ДП – дизельне пальне;

ЕК – енергетична культура;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

РМЕ – ріпаково-метиловий ефір;

ЦТ – централізоване теплопостачання;

р.м. – робоче місце.

В умовах постійного росту цін на викопні палива та високої залежності України від імпортованого природного газу, біомаса являє собою привабливу альтернативу традиційним енергоносіям. Біоенергетичні технології різняться між собою за енергетичною та економічною ефективністю, за ступенем впливу на оточуюче середовище та соціальним ефектом (створення нових робочих місць). Тому, для визначення доцільності впровадження певної технології в конкретних умовах, необхідно провести її комплексний аналіз, тобто оцінити з енергетичної, економічної, екологічної та соціальної сторони.

### Енергетичний аналіз

В зарубіжній практиці широко застосовується методика енергетичного аналізу, що ґрунтується на використанні таких показників як сукупні витрати енергії ( $CED$ ) та коефіцієнт виходу енергії ( $EYC$ ) [1]. Ця методика може застосовуватися як для аналізу установок, що працюють на викопних паливах, так і для обладнання, що використовує відновлювані джерела енергії і дає можливість порівнювати їх енергетичну ефективність.

Сумарні витрати енергії включають всі статті споживання енергії на одержання матеріалів та енергоносіїв з первинної сировини, які використовуються в даному енергетичному процесі та при виготовленні і кінцевій утилізації відповідного технологічного обладнання. Іншими словами, враховується споживання первинної енергії в процесі сировинного та технологічного циклів роботи енергетичної установки. Для біоенергетичних технологій, основними складовими енерговитрат, як правило, є підготовка та транспортування палива, тоді як витрати енергії на виробництво/утилізацію установки є порівняно невеликими та, відповідно, другорядними.

Показник сукупних витрат енергії визначається як сума складових витрат первинної енергії, необхідної для виробництва енергоустановки ( $E_p$ ), для роботи установки протягом часу її існування ( $E_U$ ) і для утилізації установки після завершення терміну її служби ( $E_D$ ):

$$CED = E_p + E_U + E_D. \quad (1)$$

Витрати первинної енергії на роботу установки протягом часу її експлуатації поділяються

на декілька складових:

$$E_U = E_A + F, \quad (2)$$

де  $E_A$  – витрати енергії на роботу допоміжного обладнання енергоустановки;

$F$  – споживання первинної енергії палива під час експлуатації станції.

$$F = F_H + F_P + F_T, \quad (3)$$

де  $F_H$  – енергія палива, що споживається безпосередньо установкою, наприклад, солома – для соломоспалюючого котла, природний газ – для газового котла (розраховується через нижчу теплоту згорання палива та обсяг споживання);

$F_P$  – первинна енергія, що витрачається на попередню підготовку палива (наприклад, подрібнення, сушка, гранулювання, тюкування);

$F_T$  – первинна енергія, що витрачається на транспортування палива до установки.

На практиці існує декілька підходів до визначення і розрахунку  $CEC$  в залежності від того, які складові енерговитрат враховуються в аналізі. Розглянемо два основних з них:

#### 1. Повні сукупні витрати енергії:

$$CEC = E_P + E_A + F + E_D. \quad (4)$$

Використання  $CEC$  у даному вигляді є найбільш загальним підходом до визначення сукупних витрат енергії. Цей показник може використовуватися для порівняння енергетичної ефективності будь-яких установок, не акцентуючи уваги на тому, працюють вони на біомасі чи на традиційних паливах (не розглядається різниця між відновлюваними та традиційними паливами).

#### 2. Сукупні витрати невідновлюваної енергії:

$$CEC_{NR} = E_P + E_A + F_{NR} + E_D. \quad (5)$$

Показник  $CEC_{NR}$  враховує витрати тільки викопних палив, що пов'язані із забезпеченням роботи енергоустановки ( $F_{NR}$ ). Наприклад, для котла на біомасі споживання біомаси цим котлом не враховується в  $F_{NR}$ . Показник  $CEC_{NR}$  застосовується для порівняння між собою установок, що працюють на біопаливах та викопних паливах, що дозволяє акцентувати увагу на обсягах використання і заощад-

ження традиційних енергоносіїв.

Для порівняння двох енергоустановок, що працюють на біомасі, рекомендується використання обох показників –  $CEC$  та  $CEC_{NR}$ . Якщо одна з них має кращі значення по обом показникам ( $CEC$  та  $CEC_{NR}$ ), то можна однозначно сказати, що вона є найбільш прийнятною в даних умовах. Якщо ж одна з установок є кращою за  $CEC_{NR}$  (наприклад, котел на дровах, оскільки він потребує менше первинної енергії викопного палива на підготовку біомаси), а інша – за показником  $CEC$  (наприклад, котел на гранулах із біомаси через більш високий ККД), кінцеве рішення щодо вибору тієї чи іншої системи є неоднозначним. В цьому випадку дослідник сам визначає, яка технологія більше підходить в даних умовах – та, що споживає менше енергії в цілому, чи та, яка споживає менше енергії викопних палив. При цьому виконана оцінка може розглядатися як база для прийняття рішення по вибору оптимальних параметрів системи в цілому, наприклад, потужності котельної установки по відношенню до відстані транспортування біомаси.

Безрозмірне значення показника сукупних витрат енергії визначається через ділення його на величину сукупного виробництва енергії установкою ( $CEP$ ):

$$ced = CEC/CEP, \quad (6)$$

$$ced_{NR} = CEC_{NR}/CEP. \quad (7)$$

Наприклад, для котельної установки при централізованому тепlopостачанні сумарне виробництво енергії розглядається як корисна теплова енергія, отримана споживачами (тобто враховуються втрати теплової енергії під час транспортування). Для випадку роботи обладнання без ЦТ розглядається обсяг виробленої теплової енергії установкою. По суті показник  $ced$  показує у скільки разів загальні витрати енергії для забезпечення роботи даної установки (енергія «на вході») більші, ніж енергія, отримана «на виході».

Коефіцієнт виходу енергії – це величина, обернено пропорційна безрозмірній величині сукупних витрат енергії:

$$EYC = ced^{-1}, \quad (8)$$

$$EYC_{NR} = ced_{NR}^{-1}. \quad (9)$$

Для будь-яких енергетичних систем, незалежно від виду палива, завжди виконується співвідношення:  $EYC < 1, ced > 1$ . При цьому найбільш оптимальними вважаються наступні значення:  $EYC = 0,67, ced = 1,5$  [1]. Для енергосистем на викопних паливах завжди вірно:  $ced_{NR} > 1, EYC_{NR} < 1$ , тоді як для систем, що

використовують енергію відновлюваних джерел може виконуватись протилежна нерівність:  $ced_{NR} < 1, EYC_{NR} > 1$ . За рекомендаціями роботи [1], для забезпечення високої енергетичної ефективності коефіцієнт виходу енергії  $EYC_{NR}$  для енергоустановок на ВДЕ має складати як мінімум більше 2, найкраще значення – більше 5. Значення  $EYC$  і  $EYC_{NR}$  для енергетичних установок на викопних паливах та ВДЕ за даними різних авторів наведені у табл. 1.

Табл. 1. Коефіцієнт виходу енергії енергетичних установок

Джерело	Енергетична система	$EYC$	$EYC_{NR}$
[2]	Конденсаційний котел на легкому дистилітному паливі	0,68...0,71	0,7...0,72
	Конденсаційний газовий котел	0,73	0,74
	Котел на дровах (ККД 65 %)	0,46	10,1...12,1
	Котел на деревній трісці (ККД 65 %)	0,51	11,0...12,1
[3]	Котел на легкому дистилітному паливі	н.д.	0,67...0,72
	Конденсаційний котел на легкому дистилітному паливі	н.д.	0,76
	Газовий котел	н.д.	0,70...0,74
	Конденсаційний газовий котел	н.д.	0,81
	Котел на дровах (ККД 65 %)	0,51	8,3
	Котел на деревній трісці (ККД 75 %)	0,91	10,0
[4]	Система опалення на легкому дистилітному паливі	н.д.	0,66
	Система опалення на природному газі	н.д.	0,73
	Система опалення на деревині	н.д.	7,1
	Сонячна система опалення	н.д.	4,0
[5]	Конденсаційний газовий котел	н.д.	0,81
	Котел на легкому дистилітному паливі	н.д.	0,71
	Котел на дровах	н.д.	4,2
	Котел на деревній трісці	н.д.	4,8
	Невелика система ЦТ на деревині	н.д.	4,0
	Крупна система ЦТ на деревині	н.д.	4,2
	Крупна система ЦТ на деревині з піковим котлом на мазуті	н.д.	2,2
	Крупна система ЦТ на соломі з піковим котлом на мазуті	н.д.	1,8
	Котел на гранулах з біомаси з додатковим сонячним колектором	н.д.	3,3
Система ЦТ на біомасі з додатковим сонячним колектором	н.д.	4,0	

	Газовий котел з додатковим сонячним колектором	н.д.	0,85
	Котел на мазуті з додатковим сонячним колектором	н.д.	0,75
	Тепловий насос з горизонтальним ґрунтовим колектором	н.д.	1,04
	Тепловий насос з вертикальним ґрунтовим колектором	н.д.	0,99
	Геотермальна та природній газ на великих котельнях централізованого теплопостачання	н.д.	1,18
	Біодизель* (PME) та побічні продукти	н.д.	2,4
	Біоетанол* з цукрового буряку в Європі	н.д.	2,1
[6]	Біодизель* (PME)	н.д.	1,50
	Біодизель* (PME) та побічні продукти (грубий корм з для тварин)	н.д.	2,43
[7]	Біодизель* (PME)	н.д.	≈ 2...3
[8]	Біодизель* (PME)	н.д.	≈ 2...4
[1]	Котел на деревних гранулах, ЦТ з щільністю теплопостачання 3,0 МВт·год/(рік·м) / 50 км**	0,580	2,81
	Котел на деревних гранулах, без ЦТ / 5000 км	0,419	0,88
	Котел на деревних гранулах, без ЦТ / 500 км	0,613	2,63
	Котел на деревних гранулах, без ЦТ / 50 км	0,643	3,27
	Котел на деревних гранулах, без ЦТ / 15 км	0,645	3,34
	Котел на «еко-гранулах» з деревини***, без ЦТ / 50 км	0,647	8,30
	Котел на деревній трісці, ЦТ з щільністю теплопостачання 0,6 МВт·год/(рік·м) / 15 км	0,583	7,89
	Котел на деревній трісці, ЦТ з щільністю теплопостачання 1,5 МВт·год/(рік·м) / 15 км	0,658	8,96
	Котел на деревній трісці, ЦТ з щільністю теплопостачання 3,0 МВт·год/(рік·м) / 15 км	0,687	9,37
	Котел на деревній трісці, без ЦТ / 15 км	0,732	13,0
	Котел на дровах з баком-акумулятором, без ЦТ / 5 км	0,756	13,8
	Котел на дровах без баку-акумулятору, без ЦТ / 5 км	0,757	14,0
Власні розрахунки	Котел 350 кВт на тюкованій соломі, без ЦТ / 50 км	0,72	8,88
Власні розрахунки	Котел 350 кВт на деревній трісці, без ЦТ / 50 км	0,72	6,39

\* Використання в якості моторного палива.

\*\* Відстань транспортування біопалива (тут і далі по таблиці).

\*\*\* Для операції сушіння сировини при виробництві гранул використовується біомаса.

н.д. – немає даних.

З даних таблиці видно, що значення  $EYC_{NR}$  для котелень на природному газі та легкому дистиллятному паливі коливаються в діапазоні 0,66...0,81, тобто енергія «на виході» становить лише 66...81 % всієї енергії «на вході».

Для більшості енергетичних систем з котлами на біомасі/біопаливах коефіцієнт виходу енергії  $EYC_{NR}$  складає більше 8 за умови відстані транспортування палива в межах 50 км. Це означає, що в таких установках вихід енергії у 8 і більше разів перевищує витрати викопного палива на забезпечення їх роботи.

Відстань транспортування біомаси/біопалив в межах до 50 км не має великого впливу на коефіцієнт виходу енергії. Якщо ж велика відстань перевезення, наприклад, гранул або тріски, є необхідною умовою організації процесу, то, за допомогою показника  $EYC_{NR}$  можна визначити максимальну відстань, при якій загальний енергобаланс ще буде позитивним, тобто сумарні витрати енергії на виробництво і транспортування біопалива не перевищать обсягу енергії, яка може бути вироблена з нього. Граничне значення відповідає  $EYC_{NR} = 1$ . Так, за умов даного аналізу максимально допустима відстань транспортування вантажівками становить: деревних гранул – 4186 км, деревної тріски – 2093 км за даними [1], 1450 км – за власними розрахунками, тюкової соломи – близько 2000 км за власними розрахунками.

### **Екологічний аналіз**

Аналіз впливу біоенергетичних технологій на оточуюче середовище прийнято проводити в рамках так званої оцінки життєвого циклу, яка особливо широко застосовується в зарубіжній практиці. Як правило, для виконання цієї оцінки використовують спеціальні комп'ютерні програми, наприклад, SimaPro [9]. Це дає можливість дослідити дуже широкий спектр впливів – на ґрунт, атмосферу, водойми і здоров'я людей. Як і у випадку енергетичного аналізу, оцінка життєвого циклу включає всі стадії існування певної енергоустановки – виготовлення обладнання, підготовка палива, експлуатація, вивід з експлуатації (демонтаж) та кінцева утилізація.

Для прикладу розглянемо результати дослідження [10], в якому за допомогою програми SimaPro було виконано порівняльну оцінку життєвого циклу трьох енергетичних систем – котла на деревних гранулах, котла на гранулах енергетичної культури *Brassica carinata* та котла на дизельному паливі. Набір впливів на оточуюче середовище, які досліджувались, включає всі складові згідно методики CML 2000 [11], що була розроблена Інститутом екологічних наук університету м. Лейден (Нідерланди).

Результати оцінки життєвого циклу, представлені в табл. 2, показують, що найбільші впливи на оточуюче середовище мають місце на етапі експлуатації котлів, тоді як на стадії спорудження вони на кілька порядків нижче, а на етапі виводу з експлуатації – нехтовно малі. Порівняльний аналіз впливів свідчить про те, що за період життєвого циклу котел на дизелі має 8 показників впливів з 10, що перевищують показники котла на деревині і котла на енергетичній культурі. Найбільш високими є величини глобального парникового ефекту, витончення озонового шару і фотохімічного окислення. З двох котлів на біомасі, котел на енергетичній культурі має 8 більших впливів з 10, особливо це стосується глобального парникового ефекту та токсичності шкідливих речовин для людей. Це пояснюється включенням до оцінки мінеральних добрив, що застосовуються при вирощуванні цієї енергетичної культури, та дизельного пального, на якому працює сільськогосподарська техніка та транспортні засоби.

Треба зазначити, що в кожному випадку дослідник сам встановлює межі, в яких виконується оцінка життєвого циклу технології/обладнання, і вирішує, які саме показники екологічного впливу доцільно включити до неї. За відсутності спеціального програмного забезпечення досить часто можна обмежитися розрахунком балансу парникових газів – однією з ключових складових екологічного аналізу.

Згідно Директиви з ВДЕ 2009/28/ЕС [12], зниження викидів парникових газів при

Табл. 2. Екологічний вплив енергетичних систем протягом їх життєвого циклу [10]

Вид впливу	Виготовлення		Експлуатація				Вивід з експлуатації		
	Котел ДГ	Котел на гранулах ЕК	Котел ДП	Котел на ДГ	Котел на гранулах ЕК	Котел на ДП	Котел на ДГ	Котел на гранулах ЕК	Котел на ДП
AD, кг Sb <sub>екв</sub> (Sb – сурма)	28,3	28,3	7,89	633	745	6990	0,00231	0,00231	0,00881
GWP, кг CO <sub>2екв</sub>	3080	3080	694	105107	151493	673000	0,36300	0,36300	30,8
ODP, мг CFC <sub>11екв</sub> (CFC – трихлорфторметан)	18,3	18,3	9,74	46000	22184	1590000	0,31000	0,31000	1,16000
HT, кг 1,4-DB <sub>екв</sub> (DB – діхлорбензол)	1400	1400	738	36600	71069	134303	0,04840	0,04840	0,19400
FVAE, кг 1,4-DB <sub>екв</sub>	30,9	30,9	21,0	5690	8607	20200	0,00560	0,00560	0,02300
MAE, кг 1,4-DB <sub>екв</sub>	232	232	138	111600	89443	75000	0,01710	0,01710	0,08070
TE, кг 1,4-DB <sub>екв</sub>	6,7	6,7	1,03	377	508	985	0,00015	0,00015	0,02280
PO, г C <sub>2</sub> H <sub>4екв</sub> (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> – етилен)	3300	3300	485	25728	37198	303000	0,07980	0,07980	6,48000
A, кг SO <sub>2екв</sub>	22,5	22,5	5,19	573	928	5150	0,00319	0,00319	0,01350
E, кг PO <sub>4екв</sub> <sup>i</sup> (PO <sub>4екв</sub> <sup>i</sup> – іон фосфату)	0,4	0,4	0,05	26	137	102	0,00066	0,00066	0,00326

AD – Вичерпання надр, пов'язане з добуванням мінералів та викопних палив, GWP – глобальний парниковий ефект, ODP – витончення озонного шару, HT – токсичність шкідливих речовин для людей, FVAE – токсичність шкідливих речовин для прісної води, MAE – токсичність шкідливих речовин для морської води, TE – токсичність шкідливих речовин для ґрунту, PO – фотохімічне окислення, пов'язане з утворенням озону та інших хімічно активних сполук внаслідок дії сонячного світла на первинні забруднювачі повітря, A – кислотування внаслідок емісії шкідливих речовин (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> та ін.) у повітря (A, кг SO<sub>2екв</sub>), E – евтрофікація внаслідок попадання надмірної кількості поживних макроелементів (азот, фосфор та ін.) у повітря, воду, ґрунт.

використанні біопалив має становити щонайменше 35 % у порівнянні з викопними паливами, які вони заміщують. У 2017 році ця вимога зросте до 50 %, у 2018 році – до 60 % для установок на біопаливах, уведених до експлуатації з 01.01.2018 р.

**Економічна оцінка**

Економічна оцінка полягає у виконанні техніко-економічного обґрунтування певного проекту по впровадженню біоенергетичної технології. Ключовими показниками економічної доцільності проекту є чиста приведена вартість (*NPV*), внутрішня норма рентабельності (*IRR*), простий та дисконтований терміни окупності. Внутрішня норма рентабельності характеризує рівень рентабельності інвестицій: проект є прийнятним, якщо внутрішня норма рентабельності перевищує мінімальну (фактичну або очікувану) процентну ставку капіталу в країні (в межах 10...15 %) [13].

В біоенергетиці проект зазвичай вважається економічно привабливим, якщо термін окупності становить менше 5 років. Наприклад, на сьогодні в Україні термін окупності проектів з впровадження котлів на деревині та соломі становить 2...3 роки для промислового та бюджетного секторів і 5...7 років – для житлово-комунального господарства. Різні діапазони термінів окупності пояснюються великою різницею в ціні на природний газ, що заміщується біомасою в цих секторах.

Для прикладу в табл. 3 представлено економічні показники проекту по впровадженню котла 350 кВт на тюкованій соломі для

заміщення використання природного газу. Розглянуто два варіанти. В першому котел впроваджується в установі, яка фінансується з державного/місцевого бюджетів, наприклад, школа, лікарня, або на промисловому підприємстві. Такі організації мають купувати солому для котла у виробника або постачальника. В другому варіанті котел встановлюється на сільськогосподарському підприємстві, яке має власну тюковану солому. Варіанти розрізняються між собою капітальними витратами та вартістю соломи. У першому випадку враховано ріст вартості соломи при її транспортуванні в межах 100 км. У другому випадку солома береться по її собівартості. З даних таблиці видно, що проект є економічно привабливим в обох розглянутих варіантах – простий термін окупності не перевищує трьох років.

**Оцінка соціального впливу**

В зарубіжній практиці існують різні методики оцінки впливу біоенергетичних технологій на створення нових робочих місць. Розрізняють прямий та непрямий вплив на зайнятість, і нові робочі місця розділяють, відповідно, на основні та додаткові. Деякі фахівці виділяють також третій тип – «вторинні» робочі місця, що оцінюються через так званий ефект «примноження» від створення основних та додаткових робочих місць [14–16]. Згідно зарубіжних літературних даних, кількість нових робочих місць (основних і додаткових) складає порядку 2...3 р.м./МВт<sub>г</sub> та 4...5 р.м./МВт<sub>г</sub> впровадженого обладнання на біомасі [14, 17–20].

Табл. 3. Економічні показники проекту по впровадженню котла на соломі

Показники	Варіант I				Варіант II
	Відстань транспортування соломи, км				
	0	10	50	100	
Чиста приведена вартість (NPV), тис. грн.	487	469	400	313	637
Норма внутрішньої рентабельності (IRR), %	40,1	39,5	37,0	33,9	50,8
Простий термін окупності, років	2,41	2,44	2,58	2,79	1,94
Дисконтований термін окупності, років	2,84	2,91	2,99	3,44	1,99

### Висновки

Аналіз технологій виробництва енергії з біомаси вимагає комплексного підходу, який включає енергетичну, екологічну, економічну та соціальну оцінки. Існуючі методики таких оцінок дають можливість порівняння біоенергетичних технологій як з традиційними технологіями, так і між собою для вибору найбільш ефективних в конкретних умовах впровадження. Наведені в роботі приклади показують, що біоенергетичні технології можуть рекомендуватись до впровадження згідно досягнення найкращого діапазону показників як енергетичного, екологічного так і економічного аналізів.

### ЛІТЕРАТУРА

1. *Nussbaumer Th., Oser M.* Evaluation of biomass combustion based energy systems by cumulative energy demand and energy yield coefficient. Report for International Energy Agency and Swiss Federal Office of Energy, 2004.
2. *Kessler F., Knechtle N., Frischknecht R.* Heizenergie aus Heizöl, Erdgas oder Holz, Schriftenreihe Umwelt Nr. 315, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern 2000.
3. *Kasser U., Pöll M., Graffe K.* Ökologische Bewertung mit Hilfe der grauen Energie. Schriftenreihe Umwelt Nr. 315, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern 2001.
4. *Sterkele U.* Alternativenergie im Kosten- und Ökovergleich, Spektrum der Gebäudetechnik, N5, 2001, p. 42-45.
5. *Hartmann H., Kaltschmitt M.* Biomasse als erneuerbarer Energieträger, Schriftenreihe Nachhaltige Rohstoffe Band 3, Landwirtschaftsverlag Münster, 2002.
6. *Studer R., Wolfensberger U.* Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen über den Alternativ-Treibstoff Biodiesel, Landwirtschaft Schweiz, Band 4 (12), 1991, 637-640.
7. *Wörgetter M. et al.* Ökobilanz Biodiesel, Bericht des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Wien 1999.
8. *Jungmeier G., Hausberger S.* Treibhausgas-Emissionen von Transportsystemen. Vergleich von biogenen und fossilen Treibstoffen, Joanneum

Research Graz, BMLFUW, BMVIT, Land Steiermark, Graz 2003.

9. *SimaPro 7.* Introduction into LCA. Product Ecology Consultants, 2010, <http://www.presustainability.com/content/lca-methodology>

10. *Diaz M., Rezeau A., Maraver D. et al.* Comparison of the environmental impact of biomass and fossil fuels medium-scale boilers for domestic applications employing life cycle assessment methodology. Proceedings of the 16th European Biomass Conference & Exhibition, 2-6 June 2008, Valencia, Spain, pp. 2641-2646.

11. *Cabal H., Lechón Y., Sáez R.* Environmental aspects of integration of decentralized generation into the overall electricity generation system. EUSUSTEL Task Report, 2005.

12. *Directive 2009/28/EC* of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC.

13. *Наказ Міністерства з питань житлово-комунального господарства України «Про затвердження Методичних рекомендацій оцінки економічної ефективності інвестицій в енергозберігаючі проекти на підприємствах житлово-комунального господарства»* (№ 218 від 14.12.2007).

14. *Brouwer F., Nowicki P., Woltjer G.* Background note on Biomass production and future rural development in Europe. Materials of FP6 project AGRINERGY, 2007-2008, <http://agriner-gy.ecologic.eu/>

15. *Timmons D., Damery D., Allen G.* Energy from Forest Biomass: Potential Economic Impacts in Massachusetts. University of Massachusetts, 2007.

16. *U.S. Economic Impact of Advanced Bio-fuels Production: Perspectives to 2010.* Report by Bio Economic Research Associates, 2009.

17. *Dworak Th.* EU Bioenergy Policies and their effects on rural areas and agriculture policies, 2008. Report of FP6 project AGRINERGY, 2007-2008, <http://agriner-gy.ecologic.eu/>

18. *Alliance for Green Heat*, [http://www.forgreenheat.org/issues/creating\\_jobs.html](http://www.forgreenheat.org/issues/creating_jobs.html)



19. Rutovitz J., Atherton A. Energy sector jobs to 2030: a global analysis. Institute for Sustainable Futures, <http://www.isf.uts.edu.au/publications/workingfortheclimate2009.pdf>

20. Morris G. The Value of the Benefits of U.S. Biomass Power. Subcontractor Report. NREL/SR-570-27541, 1999.

Получено 13.12.2011 р.

УДК 697.7

Дубровская В.В.<sup>1</sup>, Шкляр В.И.<sup>1</sup>, Негодуйко И.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный технический университет Украины «КПИ»

<sup>2</sup> «Энергосбыт Киевэнерго»

### АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВАКУУМНОГО СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА

Проведено енергетичний та ексергетичний аналіз сонячної водонагрівальної установки з вакуумним колектором. Визначена ексергетична ефективність елементів і установки в цілому.

Проведен енергетический и эксергетический анализ солнечной водонагревательной установки с вакуумным коллектором. Определены эксергетическая эффективность элементов и установки в целом.

The energy and exergy analysis of solar heat water systems with vacuum collectors were performed. The exergy losses in elements and all equipment were calculated.

$A$  – площа солнечного коллектора;  
 $C_1$  – коэффициент полных тепловых потерь;  
 $C_2$  – коэффициент тепловых потерь;  
 $Ex$  – эксергия;  
 $h$  – энтальпия;  
 $I$  – плотность солнечного излучения;  
 $m$  – массовый расход воды;  
 $s$  – энтропия;  
 $T$  – температура;  
 $W$  – электрическая мощность;  
 $\Delta T$  – разность температур;  
 $\Psi$  – удельная эксергия;  
 $\epsilon_k$  – эксергетическая эффективность;  
 $\eta$  – КПД солнечного коллектора;

$\eta_0$  – оптический КПД солнечного коллектора.

#### Индексы нижние:

$sr$  – солнечная радиация;  
 $vx$  – вход;  
 $vyx$  – выход;  
 $n$  – насос;  
 $oc$  – окружающая среда;  
 $пог$  – поглощенная;  
 $пол$  – полезная;  
 $пот$  – потери;  
 $ск$  – солнечный коллектор;  
 $ср$  – среднее;  
 $t$  – теплоноситель;  
 $то$  – теплообменник.

Современное развитие мировой экономики неотрывно связано с возрастанием темпов производства энергии. Сегодня в Украине одним из приоритетных направлений энергосектора является возобновляемая энергетика и энергосбережение. С каждым годом в стране появляется все больше новых предприятий, вырабатывающих оборудование для возобновляемых

источников энергии: солнечной, геотермальной, ветровой, биомассы, но не находят спроса в Украине.

Украина имеет достаточный солнечный потенциал. По результатам анализа статистических и метеорологических данных установлено, что внедрение солнечных систем целесообразно на всей территории Украины.