

УДК 620.92

## ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ТА ЕКОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ З ТВЕРДОЇ БІОМАСИ. ЧАСТИНА 2

Гелетуха Г.Г., канд. техн. наук, Желєзна Т.А., канд. техн. наук, Баштовий А.І., канд. техн. наук

*Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна*

Представлено результати енергетичного аналізу життєвого циклу виробництва електричної енергії з твердої біомаси. Проведено порівняння із відповідним варіантом комбінованого виробництва теплової та електричної енергії. Розраховано баланс парникових газів протягом життєвого циклу виробництва електричної енергії з твердої біомаси.

Представлены результаты энергетического анализа жизненного цикла производства электрической энергии из твердой биомассы. Проведено сравнение со соответствующим вариантом комбинированного производства тепловой и электрической энергии. Рассчитан баланс парниковых газов в течение жизненного цикла производства электрической энергии из твердой биомассы.

The paper presents some results of energy analysis of the life cycle of power production from solid biomass. The results are compared with the respective case of combined heat and power production. The greenhouse gases balance during the life cycle of power production from solid biomass is calculated.

Бібл. 6, табл. 4, рис. 1

**Ключові слова:** біомаса, біопаливо, тверде біопаливо, теплоелектроцентрально, теплоелектростанція, життєвий цикл, парникові гази.

БМ – біомаса;  
ККД – коефіцієнт корисної дії;  
КТ – конденсаційна турбіна;  
КТЕ – комбіноване виробництво теплової та електричної енергії;  
ПГ – парникові гази;  
ТЕО – техніко-економічне обґрунтування;  
ТЕС – теплова електростанція;  
ТЕЦ – теплоелектроцентрально;

e/e – електроенергія;  
CED – показник сукупних витрат енергії;  
ced – безрозмірний показник сукупних витрат енергії;  
EUC – коефіцієнт перетворення енергії;

**Нижній індекс:**

e – електричний;  
t – тепловий;  
NR – невідновлюваний.

У першій частині статті було розглянуто результати енергетичного аналізу життєвого циклу комбінованого виробництва теплової та електричної енергії з твердої біомаси. У другій частині статті розглядається робота ТЕС, а також виконується екологічний аналіз життєвого циклу виробництва електроенергії з твердої біомаси.

### *Оцінка енергетичної ефективності роботи ТЕС на твердій біомасі*

Відомо, що при комбінованому виробництві теплової та електричної енергії ефективність використання палива на 10...30 % вище, ніж при роздільному

виробництві тієї ж кількості теплової та електричної енергії [1]. Виконаємо енергетичну оцінку роботи ТЕС на твердій біомасі (соломі та деревній трісці) за показником сукупних витрат енергії та його оберненої величини – коефіцієнту перетворення енергії [2] і порівняємо їх з аналогічними показниками роботи ТЕЦ. Сукупні витрати енергії визначаються протягом життєвого циклу виробництва електроенергії з біомаси, тобто від виробництва/збору біомаси до енергетичної конверсії на відповідній установці [3]. Технічні характеристики ТЕС на біомасі представлено в табл. 1.

Табл. 1. Технічні характеристики ТЕС на соломі та на деревній біомасі

Параметри	Значення
Потужність електрична, МВт <sub>е</sub>	6
Період роботи, год/рік	8000
Номинальне навантаження	90 %
ККД електричний	30 %
Витрата біопалива, т/рік	
- солома	37037
- деревна тріска	51852
Виробництво електроенергії, МВт·год/рік	43200
Споживання електроенергії на власні потреби, МВт·год/рік	6480

Результати оцінки показують, що при застосуванні покупної (невідновлюваної) електроенергії на власні потреби, енергетичні показники роботи ТЕС на біомасі не задовольняють навіть допустимим діапазоном значень сукупних витрат невідновлюваної енергії ( $ced_{NR} < 0,5$ ) та коефіцієнту перетворення енергії ( $EYC_{NR} > 2$ ). У разі ж використання частини виробленої («зеленої») електроенергії на власні потреби енергетичні показники роботи ТЕС на біомасі задовольняють вказаним

допустимим діапазоном значень при відстані транспортування біомаси та вивозу золи до 100...150 км. При цьому показники ТЕС на деревній трісці є дещо кращими, ніж ТЕС на соломі (табл. 2). Як вже зазначалося, у другому варіанті обсяг електроенергії на власні потреби не включається до показника сукупних витрат невідновлюваної енергії ( $ced_{NR}$ ), а обсяг енергії «на виході» зменшується на величину споживання електроенергії на власні потреби установки.

Табл. 2. Витрати первинної енергії протягом життєвого циклу виробництва електричної енергії з твердої біомаси

Етап життєвого циклу	Витрати первинної енергії, ГДж/рік									
	ТЕЦ на соломі (I)					ТЕЦ на деревній трісці (II)				
1. Споживання біомаси	518518					518518				
2. Попередня обробка БМ: - тюкування соломи	2350					-				
- подрібнення відходів лісозаготівлі	-					7618				
3. Всі операції збору, складування, завантаження/розвантаження, зберігання біомаси	35000					21843				
4. Робота ТЕЦ: (4,а) е/е на власні потреби (4,б) обслуговування; ремонти	75984 352					69984 352				
5. Спорудження ТЕЦ	946					946				
6. Демонтаж, утилізація обладнання ТЕЦ	118					118				
7. Транспортування БМ, вивіз золи на місце утилізації <sup>1)</sup>	Відстань транспортування біопалива/золи, км									
	0		10		50		100		150	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
	0	0	1913	2095	9563	10474	19126	20949	28689	31423
Сed: Енергія «на вході» (сума позицій 1-7)	633269	619379	635181	621474	642832	629853	652395	640327	661958	650802
ced <sup>2)</sup> : Енергія «на вході» / Енергія «на виході»	5,02	4,68	5,03	4,70	5,09	4,76	5,17	4,84	5,24	4,92
EYC <sup>2)</sup> =1/ced: Енергія «на виході» / Енергія «на вході»	0,20	0,21	0,20	0,21	0,20	0,21	0,19	0,21	0,19	0,20
ced <sub>NR</sub> <sup>2)</sup> : Енергія «на вході» <sup>3)</sup> (сума позицій 2-7 мінус поз. 4,а)	38767	30877	40679	32972	48330	41351	57893	51825	67456	62300
ced <sub>NR</sub> <sup>2)</sup> : Енергія «на вході» <sup>3)</sup> / Енергія «на виході»	0,31	0,23	0,32	0,25	0,38	0,31	0,46	0,39	0,53	0,47
<b>EYC<sub>NR</sub><sup>2)</sup>=1/ced<sub>NR</sub><sup>2)</sup>: Енергія «на виході»/Енергія «на вході»<sup>3)</sup></b>	<b>3,26</b>	<b>4,28</b>	<b>3,10</b>	<b>4,01</b>	<b>2,61</b>	<b>3,20</b>	<b>2,18</b>	<b>2,55</b>	<b>1,87</b>	<b>2,12</b>

1) Вантажопідйомність транспортного засобу по тюкуваній соломі – 12,6 т, по деревній трісці – 22,4 т, по золі – 6,6 т. Вважається, що зола вивозиться на те поле, де було зібрано солому/відходи лісозаготівлі.

2) Безрозмірний показник.

3) Враховуються витрати тільки невідновлюваної енергії (тобто без споживання біопалива та «зеленої» електроенергії на власні потреби ТЕС).

На рис. 1 представлено порівняння коефіцієнту перетворення енергії, який враховує витрати тільки невідновлюваної енергії протягом життєвого циклу виробництва електроенергії/КТЕ, для ТЕС та ТЕЦ (КТ) на соломі та на деревній трісці. З даних рисунку видно, що в діапазоні відстані транспортування біомаси та вивозу золи до близько 150 км,  $EYC_{NR}$  для ТЕЦ більш,

ніж у двічі вищий, ніж для ТЕС, і знаходиться при цьому в діапазоні рекомендованих значень ( $EYC_{NR} > 5$ ). Таким чином, результати енергетичного аналізу за показником сукупних витрат енергії протягом життєвого циклу технології дають додаткове обґрунтування переваг комбінованого виробництва теплової та електричної енергії з біомаси над роздільним.

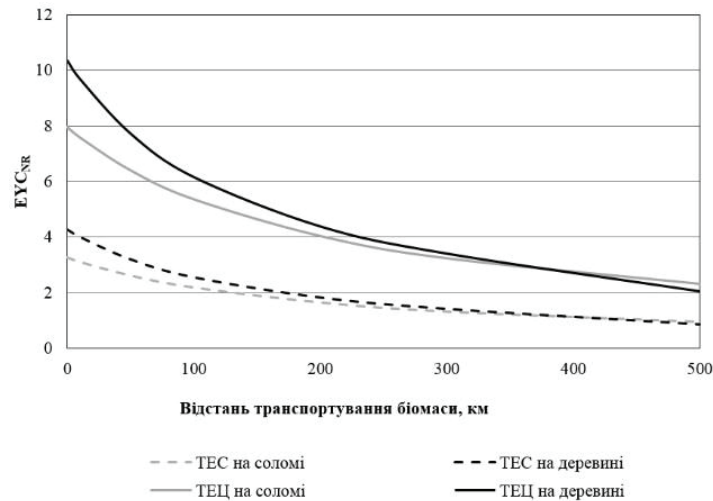


Рис. 1. Коефіцієнт перетворення енергії для ТЕЦ (КТ) та ТЕС на твердій біомасі.

Табл. 3. Баланс діоксиду вуглецю протягом життєвого циклу виробництва електричної енергії з соломі

Складові балансу	Викиди CO <sub>2</sub> , т/рік									
	ТЕЦ (КТ) 6 МВт <sub>т</sub> +20 МВт <sub>т</sub> (I)					ТЕС 6 МВт <sub>т</sub> (II)				
1. Використання референтного викопного палива (E <sub>C<sub>F</sub></sub> ) <sup>1)</sup>	23334					28927				
2. Тюкування соломі <sup>2)</sup>	188					157				
3. Збір, складування, вантаження/ розвантаження, зберігання соломі	1550					1295				
4. Транспортування соломі / вивіз золи	0 км		10 км		50 км		100 км		150 км	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
	0	0	178	133	892	663	1785	1325	2677	1988
Кінцеве зниження викидів CO <sub>2</sub> при виробництві е/е з соломі у порівнянні з референтним викопним паливом: (E <sub>C<sub>F</sub></sub> -E <sub>C<sub>e</sub></sub> )/ E <sub>C<sub>F</sub></sub> <sup>3)</sup>	85 %	83 %	83 %	82 %	77 %	76 %	70 %	68 %	62 %	53 %

1) E<sub>C<sub>F</sub></sub> розраховується із питомих показників для референтного викопного палива (для е/е 186 г CO<sub>2скв</sub>/МДж, для теплової енергії 80 г CO<sub>2скв</sub>/МДж [4]) за методикою [5].

2) Питомі викиди CO<sub>2</sub> для дизельного пального – 83,8 г CO<sub>2скв</sub>/МДж [6].

3) E<sub>C<sub>e</sub></sub> розраховується із E за методикою [5]; E – сума позицій 2-4 таблиці.

**Екологічна оцінка життєвого циклу виробництва електроенергії з твердій біомаси**

У даному дослідженні екологічний аналіз полягає у розрахунку балансу парникових газів протягом життєвого циклу виробництва електроенергії з твердій біомаси на ТЕЦ/ТЕС та визначенні обсягу скорочення викидів ПГ у порівнянні зі спалюванням референтного викопного палива. Розглянемо роботу ТЕЦ (КТ)/ТЕС – варіант, коли частина виробленої «зеленої» електроенергії використовується на власні потреби установки. Основні операції протягом життєвого циклу, що супроводжуються викидами парникових газів (зокрема, діоксиду вуглецю), включають тюкування соломі, виробництво деревної тріски, операції збору, складування, вантаження/розвантаження та перевезення біомаси, а

також вивіз золи.

Результати екологічної оцінки для обладнання на соломі представлено у табл. 3. Аналіз результатів показує, що у діапазоні відстані транспортування біопалива/золи до 100 км скорочення викидів парникових газів при виробництві електроенергії з соломі на ТЕЦ/ТЕС становить близько 70...85 %. Це відповідає рекомендаціям Європейської Комісії щодо показників роботи біоенергетичних установок на твердій біомасі, згідно яких скорочення викидів парникових газів має становити не менше 70 % у порівнянні з використанням референтного викопного палива [4]. Із даних таблиці також видно, що зі збільшенням відстані перевезення біопалива/золи суттєво росте внесок відповідної складової до балансу парникових газів. При відстані транспортування понад 100 км роботу ТЕЦ/ТЕС на

солоні можна вважати неефективною з точки зору існуючого балансу парникових газів протягом життєвого циклу технології.

Результати екологічного аналізу для ТЕЦ/ТЕС на деревній трісці, представлені у табл. 4, є принципово схожими з попереднім випадком. З наведених даних

видно, що в діапазоні відстані транспортування деревної біомаси та золи до 100 км, скорочення викидів парникових газів при виробництві електроенергії з біомаси на ТЕЦ/ТЕС становить близько 70...85 % у порівнянні з референтним викопним паливом.

Табл. 4. Баланс діоксиду вуглецю протягом життєвого циклу виробництва електричної енергії з деревної тріски

Складові балансу	Викиди CO <sub>2</sub> , т/рік									
	ТЕЦ (КТ) 6 МВт <sub>т</sub> +20 МВт <sub>т</sub> (I)					ТЕС 6 МВт <sub>т</sub> (II)				
1. Використання референтного викопного палива (ЕС <sub>F</sub> ) <sup>1)</sup>	23334					28927				
2. Подрібнення відходів лісозаготівлі (виробництво тріски) <sup>2)</sup>	410					342				
3. Збір, складування, вантаження/ розвантаження, зберігання деревного палива	1119					935				
4. Транспортування деревної тріски / вивіз золи	0 км		10 км		50 км		100 км		150 км	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
	0	0	195		973		1945		2918	
<b>Кінцеве зниження викидів CO<sub>2</sub> при виробництві e/e з деревної БМ у порівнянні з референтним викопним паливом: (ЕС<sub>F</sub>-ЕС<sub>д</sub>) / ЕС<sub>F</sub><sup>3)</sup></b>	<b>87 %</b>	<b>85 %</b>	<b>85 %</b>	<b>83 %</b>	<b>79 %</b>	<b>76 %</b>	<b>70 %</b>	<b>67 %</b>	<b>62 %</b>	<b>57 %</b>

1) ЕС<sub>F</sub> розраховується із питомих показників для референтного викопного палива (для e/e 186 г CO<sub>2екв</sub>/МДж, для теплової енергії 80 г CO<sub>2екв</sub>/МДж [4]) за методикою [5].

2) Питомі викиди CO<sub>2</sub> для дизельного пального – 83,8 г CO<sub>2екв</sub>/МДж [6].

3) ЕС<sub>д</sub> розраховується із E за методикою [5]; E – сума позицій 2-4 таблиці.

### Висновки

Енергетичний аналіз життєвого циклу виробництва електричної енергії з твердої біомаси підтверджує переваги комбінованого виробництва теплової та електричної енергії над роздільним виробництвом. В діапазоні відстані транспортування біомаси до 150 км коефіцієнт перетворення енергії ЕУС<sub>NR</sub> для ТЕЦ більш, ніж у двічі вищий, ніж для ТЕС, і знаходиться в діапазоні рекомендованих значень.

Результати екологічного аналізу життєвого циклу виробництва електричної енергії з твердої біомаси показують, що в діапазоні відстані транспортування біопалива до 100 км скорочення викидів парникових газів при виробництві електроенергії з біомаси на ТЕЦ/ТЕС становить близько 70...85 % у порівнянні з використанням референтного викопного палива. Це відповідає рекомендаціям Європейської Комісії щодо показників роботи біоенергетичних установок на твердій біомасі, згідно яких скорочення викидів парникових газів має становити не менше 70 %. Із збільшенням відстані перевезення біопалива суттєво росте внесок відповідної складової до балансу викидів парникових газів. При відстані транспортування понад 100 км роботу ТЕЦ/ТЕС на біомасі можна вважати неефективною з точки зору існуючого балансу парникових газів протягом життєвого циклу технології.

Результати енергетичного та екологічного аналізу

життєвого циклу виробництва теплової та/або електричної енергії з біомаси необхідно враховувати при виконанні ТЕО відповідних біоенергетичних проєктів. Це допоможе у виборі найбільш ефективної технології енергетичної конверсії та визначенні оптимальної відстані транспортування біопалива.

### ЛІТЕРАТУРА

1. В.Н. Клименко, А.И. Мазур, П.П. Сабашук. Когенерационные системы с тепловыми двигателями. Справочное пособие. Часть 1. Киев: ИПЦ Алкон НАН Украины, 2008, 560 стр.
2. T. Nussbaumer, M. Oser. 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.
3. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Дроздова О.І. Комплексний аналіз технологій виробництва енергії з біомаси // Промислова теплотехніка. – 2012, т. 34, № 1, С.87–95.
4. Commission staff working document. State of play on the sustainability of solid and gaseous biomass used for electricity, heating and cooling in the EU. Brussels, 28.7.2014, SWD(2014) 259 final [http://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/2014\\_biomass\\_state\\_of\\_play.pdf](http://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/2014_biomass_state_of_play.pdf)
5. Report from the Commission to the Council and



the European Parliament on sustainability requirements for the use of solid and gaseous biomass sources in electricity, heating and cooling. Brussels, 25.2.2010, COM(2010)11 final

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52010DC0011&from=en>

## ENERGY AND ECOLOGY ANALYSIS OF TECHNOLOGIES FOR POWER PRODUCTION FROM BIOMASS. PART 2

**Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Bashtovyi A.I.**

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

The paper presents some results of energy and ecology analysis of the life cycle of power production from solid biomass. The results confirm advantages of combine heat and power production over a separate production. Within the biomass transportation distance of up to 150 km, the energy yield coefficient for CHP plant is more than twice as higher as that for the thermal power plant. Besides, the energy yield coefficient for CHP plant is within the recommended range of its values. The results of ecology analysis of the life cycle of power production from solid biomass show that within the biomass transportation distance of up to 100 km, the reduction of greenhouse gases emission is about 70...85 % for CHP plant and thermal power plant. That is in line with the recommendations of the European Commission, namely that the reduction for solid biomass plants should be at least 70 % as compared with the fossil fuel comparator. When the distance of biofuel transportation increases, contribution of the related component to the greenhouse gases balance considerably rises. If the transportation distance is over 100 km, the operation of biomass CHP plant or thermal power plant can be considered inefficient from the point of view of the greenhouse gases balance during the power production life cycle. Results of energy and ecology analysis should be taken into consideration when developing technoeconomic assessment of the respective bioenergy projects.

References 6, tables 4, figure 1.

**Key words:** biomass, biofuel, solid biofuel, combined heat

6. *Directive 2009/28/EC* on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02009L0028-20151005&from=EN>

and power plant, thermal power plant, life cycle, greenhouse gases

1. *V.M. Klymenko, A.I. Mazur, P.P. Sabashuk.* Koheneratsiini systemy z teplovymy dvyhunamy. Dovidnyk. Chastyna 1 [Cogeneration systems with thermal engines. Reference manual. Part 1]. Kyiv: VPTS Alkon, NAN Ukrainy [Alkon, NAS of Ukraine], 2008, 560 p. (Rus.)

2. *T. Nussbaumer, M. Oser.* 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.

3. *Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drozdova O.I.* Kompleksnyi analiz tekhnolohii vyrobnytstva enerhii z biomasy [Complex analysis of bioenergy technologies], *Promyshliennaia tieplotiekhnika* [Industrial Heat Engineering], 2012, V. 34, № 1, P. 87–95. (Ukr.)

4. *Commission staff working document.* State of play on the sustainability of solid and gaseous biomass used for electricity, heating and cooling in the EU. Brussels, 28.7.2014, SWD(2014) 259 final

[http://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/2014\\_biomass\\_state\\_of\\_play.pdf](http://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/2014_biomass_state_of_play.pdf)

5. *Report from the Commission* to the Council and the European Parliament on sustainability requirements for the use of solid and gaseous biomass sources in electricity, heating and cooling. Brussels, 25.2.2010, COM(2010)11 final <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52010DC0011&from=en>

6. *Directive 2009/28/EC* on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02009L0028-20151005&from=EN>

*Получено 12.01.2017*

*Received 12.01.2017*