

УДК 620.92

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГІЇ З ТВЕРДОЇ БІОМАСИ В УКРАЇНІ. ЧАСТИНА 2. ДЕРЕВИНА

Гелетуха Г.Г., канд. тех. наук, Желєзна Т.А., канд. тех. наук, Дроздова О.І.

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

Виконано енергетичний, економічний та екологічний аналіз технологій виробництва енергії з деревної біомаси. Розглянуто випадки впровадження промислового котла на деревній трісці та котла на деревних гранулах потужністю 100 кВт. Виконано оцінку максимально доцільної відстані транспортування різних видів твердої біомаси.

Выполнен энергетический, экономический и экологический анализ технологий производства энергии из древесной биомассы. Рассмотрены случаи внедрения промышленного котла на древесной щепе, а также котла на древесных гранулах мощностью 100 кВт. Выполнена оценка максимально целесообразного расстояния транспортировки различных видов твердой биомассы.

The paper presents results of energy, economic and ecological analysis of technologies for energy production from wood biomass. Case studies for an industrial boiler on wood chips and a 100 kW boiler operating on wood pellets are presented. The maximum expedient transportation distance for different types of solid biomass has been assessed.

Бібл. 4, табл. 4, рис. 1

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, біомаса, деревина, біоенергетичні технології, енергетична оцінка, екологічна оцінка, економічна оцінка.

В першій частині статті було розглянуто методику комплексного аналізу біоенергетичних технологій і виконано такий аналіз для випадку виробництва енергії з соломи [1]. Дана стаття присвячена енергетичному, економічному та екологічному аналізу технологій енергетичного застосування деревної біомаси на прикладі відходів рубок лісу з подальшим отриманням тріски або гранул.

Економічний потенціал деревини, доступної для виробництва енергії в Україні, оцінюється величиною близько 2 млн. т у.п./рік. Він складається в основному з відходів рубок (залишки деревини на лісосіках), деревних відходів різного походження (відходи деревообробної промисловості, меблевого виробництва та ін.) та дров для опалення. На сьогодні з метою виробництва енергії використовується до 1 млн. т у.п./рік деревної біомаси, в тому числі близько 0,4 млн. т у.п./рік – дрова для населення.

При виконанні комплексного аналізу технологій виробництва енергії з деревної біомаси розглянуто наступні варіанти: впровадження промислового котла потужністю 350 кВт на деревній трісці, що була отримана з залишків де-

ревини на лісосіках, та котла 100 кВт на деревних гранулах.

Енергетичний аналіз

Енергетичний аналіз полягає у визначенні сумарних витрат енергії, пов'язаних з роботою котла, працюючого на деревній трісці (витрати енергії в процесі сировинного, технологічного та циклу перетворення), та їх порівнянні з енергією «на виході», тобто з тепловою енергією, відпущеною споживачу.

Розглядається варіант, коли деревна тріска виробляється на проміжному складі. В даному випадку енергія «на вході» розраховується за такими основними складовими:

- Сировинний цикл: збір відходів рубок форвардером; транспортування відходів лісовозом до місця подрібнення; виробництво тріски з відходів мобільним подрібнювачем; транспортування тріски до місця використання спеціальним вантажним транспортом; складування та зберігання деревної тріски під металевим навісом у споживача;
- Цикл перетворення: електроенергія, спожита котлом на біомасі;
- Технологічний цикл: витрати енергії при виго-

товленні котла та його утилізації після закінчення терміну експлуатації; затрати праці на обслуговування котла персоналом; енергозатрати на ремонтування.

В таблиці 1 наведені результати розрахунку вищезазначених складових енерговитрат та представлені показники, що характеризують енергетичну ефективність роботи установки з використанням деревної тріски в якості палива. З отриманих результатів можна зробити висновок, що значення енергетичних показників відповідають найбільш рекомендованим діапазнам: $ced_{NR} < 0,2$, $EYC_{NR} > 5$ [2]. Таким чином,

можна говорити про високу енергетичну ефективність проекту по впровадженню деревноспалюючого котла потужністю 350 кВт при транспортуванні деревної тріски в радіусі 150 км.

Використання даного виду біомаси можна вважати доцільним з енергетичної точки зору при збільшенні радіусу поставок до 750 км, оскільки при цьому значення безрозмірного показника сукупних енерговитрат ced_{NR} та коефіцієнту енергетичного виходу установки EYC_{NR} знаходяться в допустимих межах: $ced_{NR} < 0,5$, $EYC_{NR} > 2$ [2].

Розрахунки, виконані для побутового котла

Табл. 1. Витрати енергії, пов'язані з «життєвим» циклом котла потужністю 350 кВт, що працює на деревній трісці

Складові витрат	ГДж/рік				
1. Споживання палива (деревна тріска)	4433				
2. Збір відходів рубок форвардером	38,8				
3. Перевезення відходів деревини на проміжний склад лісовозом ¹⁾	31,7				
4. Подрібнення відходів деревини на проміжному складі мобільним подрібнювачем	44				
5. Споживання електроенергії котлом	231				
6. Виготовлення котельної установки	9,0				
7. Утилізація котельної установки	1,1				
8. Складування та зберігання деревної тріски	88,7				
9. Обслуговування котельної установки персоналом	8,9				
10. Ремонтування котельної установки	0,3				
11. Транспортування деревної тріски ²⁾	0 км	10 км	50 км	100 км	150 км
	0	17,3	86,5	173,0	259,5
СЕД: енергія «на вході» (сума позицій 1-11)	4889	4903	4921	5059	5146
$ced^{3)}$: енергія «на вході» / енергія «на виході»	1,36	1,37	1,39	1,41	1,44
$EYC^{3)} = 1/ced$: енергія «на виході» / енергія «на вході»	0,73	0,73	0,72	0,71	0,70
ced_{NR} : енергія «на вході» (сума позицій 2-11)	453	470	540	626	713
$ced_{NR}^{3)}$: енергія «на вході» / енергія «на виході»	0,13	0,13	0,15	0,17	0,20
$EYC_{NR}^{3)} = 1/ced_{NR}$: енергія «на виході» / енергія «на вході»	7,9	7,61	6,63	5,72	5,02

1) Вантажопідйомність лісовозу 15,7 тонн. Енергоємність транспортної операції становить 14,30 МДж/т·км (розраховано за методикою [3]).

2) Вантажопідйомність транспортного засобу по деревній трісці 22,4 тонн. Енергоємність транспортування складає 1,93 МДж/т·км (розраховано за методикою [3]).

3) Безрозмірний показник.

100 кВт на деревних гранулах, показують, що його енергетичні показники дещо нижчі, ніж для промислового котла 350 кВт ($EUC_{NR} = 4,44 \dots 5,53$ при транспортуванні гранул до 150 км), але цілком відповідають рекомендованому діапазону ($EUC_{NR} > 5$). Зниження показників пояснюється порівняно великими витратами енергії на гранулювання біомаси. Проте, як видно з даних, наведених на рис. 1, при необхідності транспортування біомаси на відстань понад 300 км, гранули є вигіднішими з енергетичної точки зору, ніж тріска. Це можна пояснити тим, що підвищене споживання енергії, пов'язане з гранулюванням, поступово нівелюється меншими енерговитратами на транспортування та більшою ефективністю технологічного процесу спалювання гранул.

Економічний аналіз

В даному аналізі розглядаються три варіанти, які відрізняються між собою по типу установи, організації або підприємства, на якому встановлюється котел на деревній трісці та умовами закупки сировини. В залежності від цього маємо різний набір основного та допоміжного обладнання, яке необхідно придбати організації для реалізації проекту. Це впливає на обсяг необхідних капітальних витрат. Крім того, організації різного типу платять різну ціну за природний газ. Бюджетні установи і промислові споживачі

купають газ по найвищій ціні (4687,4 грн./1000 м³ на жовтень 2012 р.), підприємства комунальної теплоенергетики – по набагато нижчій (1309,2 грн./1000 м³ на жовтень 2012 р.). Оскільки в даному розрахунку дохід проекту визначається через кошти, заощаджені на придбанні газу, вартість останнього має вирішальний вплив на основні економічні показники.

Перший варіант: котел впроваджується в установі, яка фінансується з державного/місцевого бюджетів (школа, лікарня), або на промисловому підприємстві. Такі організації мають купувати паливо (деревну тріску) у виробника (підприємства лісового господарства) або постачальника (організації, яка виконує постачання палива до місця використання) і забезпечити операції по складуванню та зберіганню біомаси на території котельні. Тобто даний варіант передбачає необхідність будівництва сховища і придбання трактора з ковшовим навантажувачем.

Другий варіант: котел встановлюється на підприємстві лісового господарства, яке заготовляє деревну тріску самостійно як побічний продукт від ведення основної діяльності. Проте, для організації збору залишків деревини на лісосіці, подрібнення та перевезення вже готової тріски необхідне придбання додаткового обладнання (подрібнювача, вантажівки для пере-

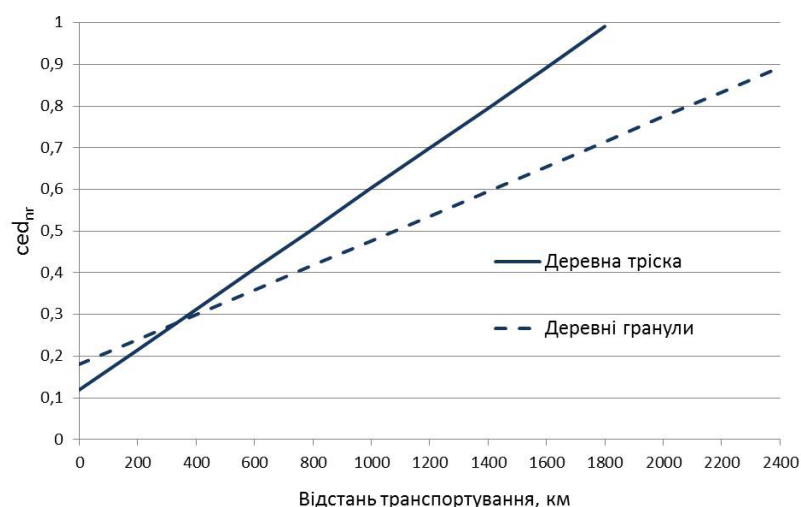


Рис. 1. Залежність безрозмірного показника сукупних витрат невідновлюваної енергії від відстані транспортування біопалива.

везення тріски та трактора з ковшовим навантажувачем). Як варіант, підприємство може взяти вантажний транспорт в оренду, що призведе до зменшення інвестиційних затрат, але у цьому випадку зросте вартість деревної тріски при транспортуванні. В даному аналізі приймаємо, що підприємство лісового господарства має в своєму розпорядженні форвардер та лісовоз для виконання робіт головного призначення. Залишається необхідність будівництва сховища для біомаси, закупки подрібнювача та ковшового навантажувача.

В третьому варіанті вважається, що котел впроваджується на підприємстві ЖКГ, яке надає населенню послуги з опалення. Цей варіант схожий на перший, різниця полягає у вартості природного газу, який заміщується біомасою.

Результати розрахунку показують, що варіанти I і II проекту по впровадженню котла на деревній трісці потужністю 350 кВт мають добрі економічні показники (табл. 2). Термін окупності знаходиться в межах 4 років, за умови використання орендованого вантажного транспорту (купівля власного транспорту не є виправданою для забезпечення роботи одиничної установки малої потужності). Відстань транспортування деревної тріски в межах 100 км в даному випадку не має суттєвого впливу на рентабельність проекту.

У випадку впровадження котла на підприємствах комунальної теплоенергетики (варіант

III) проект є нерентабельним, що пов'язано з субсидійованою ціною на природний газ для підприємств ЖКГ, яка є значно нижчою економічно обгрунтованого рівня. Для досягнення терміну окупності в межах 5...6 років ціна на газ в цьому секторі має піднятися, принаймні, у 2...2,5 рази.

Гранули з біомаси є достатньо дорогим паливом (середня ринкова ціна знаходиться в межах 900 грн./т), тому проект по впровадженню котла 100 кВт на гранулах з деревини є економічно доцільним тільки за умови заміщення дорогого газу та транспортування гранул на відстань не більше 150 км. В цьому випадку термін окупності знаходиться в межах 5 років. Впровадження котла в побутовому секторі є нерентабельним (термін окупності більше 10 років) через низьку ціну на природний газ для населення.

Екологічний аналіз

Суть екологічного аналізу полягає у розрахунку балансу діоксиду вуглецю при застосуванні деревної тріски як палива та визначенні обсягу скорочення викидів CO₂ у порівнянні зі спалюванням природного газу. Біомаса є CO₂-нейтральним паливом, оскільки при її спалюванні виділяється така ж кількість діоксиду вуглецю, яка була поглинута відповідною рослиною в процесі її росту. Таким чином, застосування біомаси для виробництва енергії не робить додаткового внеску до глобального парникового ефекту.

Табл. 2. Економічні показники проекту по впровадженню котла на деревній трісці потужністю 350 кВт

Показники	Варіант I				Варіант II				Варіант III
					Орендований транспорт		Власний транспорт		
Капітальні витрати, тис. грн.	912				1240		1940		912
	Відстань транспортування, км								
	0	10	50	100	50	100	50	100	
Експлуатаційні витрати, тис. грн./рік	177	182	197	217	136	156	128	140	197
Чиста приведена вартість (NPV), тис. грн.	484,1	471,4	420,5	356,8	348,8	285,3	<0	<0	<0
Норма внутрішньої рентабельності (IRR), %	40,6	40,1	38,3	35,9	32,1	30,3	18,1	17,3	-
Термін окупності, років	2,4	2,4	2,5	2,7	2,9	3,1	4,5	4,6	>10

При спалюванні деревної тріски в котлі потужністю 350 кВт (обсяг споживання палива 443 т/рік) зниження викидів діоксиду вуглецю у порівнянні зі спалюванням природного газу становить 235 т/рік. Проте, дана величина не є остаточною через необхідність врахування викидів CO₂, що пов'язані з такими операціями як збір, подрібнення, перевезення деревини та іншими процесами, що забезпечують роботу котельної установки. Емісія діоксиду вуглецю, що має місце при заготівлі ліквідної деревини, не враховується, оскільки залишки деревини на лісосіці є побічним продуктом (або відходом) лісового господарства. З урахуванням всіх необхідних складових кінцеве зниження викидів діоксиду вуглецю складає 210...212 т/рік в залежності від відстані транспортування деревної біомаси (табл. 3).

Аналіз отриманих результатів показує, що виражене у відсотках зниження емісії є достатньо великим (86...81 %) в розглянутому діапазоні відстані транспортування деревної тріски (для гранул 86...89 %). Для порівняння: Директива Європарламенту 2009/28/ЕС щодо сприяння використання ВДЕ вимагає, щоб зниження викидів парникових газів при використанні біопалив становило не менше 35 % [4]. Таким чином, по цьому параметру дані проекти

є доцільним і можуть рекомендуватися до впровадження.

Максимально допустима відстань транспортування біомаси

Максимально допустима, або доцільна, відстань транспортування біомаси є одним з важливих питань проектів по впровадженню біоенергетичного обладнання. Цю відстань можна визначити, розглядаючи кілька аспектів – енергетичний, екологічний і економічний.

Розрахунок з точки зору енергетичного аналізу можна розділити на два варіанти. Перший базується на визначенні відстані (S1_{ENmax}), для якої витрати енергії «на вході» енергетичної системи, включаючи транспортування біомаси, еквівалентні обсягу енергії, який може бути отриманий з цієї біомаси за певною технологією, наприклад, при спалюванні в котлі (енергія «на виході»), тобто EYС_{NR} = 1. У другому варіанті розраховується відстань (S2_{ENmax}), при якій енергетичні показники проекту sed_{NR} та EYС_{NR} починають виходити за рекомендовані або допустимі межі їх значень. Згідно даних роботи [2], рекомендованими значеннями є sed_{NR} < 0,2, EYС_{NR} > 5, а допустимими – sed_{NR} < 0,5, EYС_{NR} > 2.

Розрахунок з точки зору екологічного аналізу також включає два пункти. Перший – виз-

Табл. 3. Баланс діоксиду вуглецю при спалюванні деревної тріски в котлі 350 кВт.

Викиди CO ₂ при спалюванні природного газу ¹⁾ , т/рік	245			
Викиди CO ₂ при роботі котельної установки ²⁾ , т/рік	26,17			
Викиди CO ₂ при використанні дизельного пального у наступних операціях ³⁾ :				
- збір залишків деревини, т/рік	2,37			
- транспортування залишків до подрібнювача, т/рік	2,35			
- подрібнення мобільним подрібнювачем, т/рік	2,59			
Викиди CO ₂ при транспортуванні деревної тріски до споживача ⁴⁾ , т/рік	0 км	10 км	50 км	100 км
	0	1,2	5,9	11,9
Кінцеве зниження викидів CO ₂ при спалюванні деревної тріски, т/рік	211,96	210,78	206,03	200,10
%	86,36	85,88	83,94	81,53

1) Обсяг 125 тис. м³/рік; показник викидів CO₂ для природного газу – 56,1 т/ТДж.

2) Показник викидів CO₂ для споживання електроенергії – 1,225 кг/кВт·год.

3) Показник викидів CO₂ для дизелю – 74,1 т/ТДж.

4) Енергоємність транспортної операції – 1,93 МДж/т·км; обсяг сировини – 443 т/рік.

начення відстані ($S1_{ECLmax}$), при транспортуванні на яку загальні обсяги викидів парникових газів еквівалентні зниженню викидів CO_2 , яке досягається при заміщенні біомасою викопних палив, наприклад, природного газу. Другий – визначення відстані ($S2_{ECLmax}$), при транспортуванні на яку загальні обсяги викидів парникових газів складають не більше 75 % обсягу зниження викидів CO_2 , яке досягається при заміщенні біомасою викопних палив. Ця вимога зафіксована в Директиві Європарламенту 2009/28/ЕС щодо сприяння використання ВДЕ [4].

Розрахунок з точки зору економічного аналізу – це визначення максимальної відстані транспортування (SE_{CNmax}), при якій проект по впровадженню біоенергетичного обладнання має привабливі економічні показники, наприклад, термін окупності не більше 5 років.

Треба відмітити, що показники $S1_{ENmax}$ та $S1_{ECLmax}$ є суто теоретичними, або ілюстративними, оскільки відповідають випадку мінімально позитивних енергетичного балансу та балансу викидів CO_2 . Показники $S2_{ENmax}$, $S2_{ECLmax}$ та SE_{CNmax} носять практичний характер, оскільки прив'язані до конкретного проекту, забезпечують його високу енергетичну й економічну ефективність та відповідність вимозі Дирек-

тиви Європарламенту 2009/28/ЕС щодо зниження викидів парникових газів при використанні біопалив. Рішення відносно оптимальної максимальної відстані транспортування біомаси (S_{OPTmax}) приймається за найменшим зі значень, що відповідають показникам $S2_{ENmax}$, $S2_{ECLmax}$ та SE_{CNmax} .

У таблиці 4 наведено результати розрахунку максимально допустимої відстані перевезення твердої біомаси для розглянутих прикладів, включаючи першу частину статті. З даних таблиці видно, що відстань транспортування обмежується, в основному, терміном окупності біоенергетичного проекту.

Висновки

Результати комплексного аналізу технологій виробництва енергії з відходів деревини показують високу енергетичну та екологічну доцільність реалізації таких проектів. З економічної точки зору впровадження котлів на деревній трісці є рентабельним лише при заміщенні природного газу у бюджетних та промислових споживачів. Ефективне використання гранул у котлах малої потужності вимагає додаткової умови їхнього транспортування на відстань не більше ніж 150 км.

Табл. 4. Максимально допустима відстань транспортування твердої біомаси до енергетичної установки

Види біоенергетичних об'єктів	Допустима відстань транспортування біомаси, км, згідно обраному критерію					
	$S1_{ENmax}$	$S2_{ENmax}^{3)}$	$S1_{ECLmax}$	$S2_{ECLmax}$	SE_{CNmax}	S_{OPTmax}
Котел 350 кВт на деревній трісці (варіант I)	1800	750	1787	1270	320	320
Котел 100 кВт на деревних «екогранулах» ¹⁾²⁾	2800	1000	2925	2100	150	150
Котел 350 кВт на тюках соломи (варіант I [1])	1800	800	2000	1300	200	200
Котел 100 кВт на солом'яних гранулах ²⁾	1600	500	1800	900	300	300
ТЕЦ 2 МВт _e на тюках соломи (варіант I [1])	1500	600	1500	800	400	400

1) При виробництві «екогранул» теплова енергія отримується за рахунок біомаси.

2) Розглядається варіант заміщення природного газу у промислових/бюджетних споживачів.

3) Згідно допустимих значень sed_{NR} та EYC_{NR} .

Максимально допустима відстань транспортування твердої біомаси до енергетичної установки обмежується, в основному, економічними показниками. В залежності від виду біопалива, потужності установки та інших факторів вона може становити 150...400 км.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Дроздова О.І.* Комплексний аналіз технологій виробництва енергії з твердої біомаси в Україні. Частина 1. Солома // Пром. теплотехніка. – 2013, т. 35, № 3.
2. *Nussbaumer Th., Oser M.* Evaluation of biomass combustion based energy systems by cumula-

tive energy demand and energy yield coefficient. Report for International Energy Agency and Swiss Federal Office of Energy, 2004.

3. *Ільченко В.Ю., Деркач О.Д., Колбасін В.О.* Дослідження енергоємності транспортної операції // Вісник Дніпропетровського державного університету. – 2008, №2.

4. *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 and 2003/30/EC.

COMPLEX ANALYSIS OF TECHNOLOGIES FOR ENERGY PRODUCTION FROM SOLID BIOMASS IN UKRAINE. PART 2. WOOD

Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drozdova O.I.

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

The paper presents results of energy, economic and ecological analysis of technologies for energy production from wood in Ukraine. The energy assessment is based on determination of Cumulative Energy Demand (CED) and Energy Yield Coefficient (EYC). The ecological analysis includes calculation of CO₂ balance associated with implementation of a certain bioenergy technology and its comparison with CO₂ emission when combusting natural gas. Economic analysis comprises calculation of a payback period. Case studies for a farm boiler and CHP plant running on wood chips from felling residues and for a 100 kW boiler operating on wood pellets are presented. It is shown that the projects are feasible from energy and ecological points of view. As for economic indicators, the introduction of wood fired boilers is profitable when replacing natural gas in industry and state-financed sector. Operation of a wood CHP plant is cost-efficient under selling power at the feed-in

tariff. Implementation of each bioenergy project results in creation of a few new jobs that is also a positive factor. References 4, tables 4, 1 figure.

Key words: renewable energy sources, biomass, wood, bioenergy technologies, energy analysis, ecological analysis, economic analysis.

1. *Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drozdova O.I.* Complex analysis of technologies for energy production from solid biomass. Part 1. Straw // *Пром. теплотехніка.* – 2013, – V. 35, № 3. (Ukr.)

2. *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.

3. *Ilchenko V.Yu., Derkach O.D., Kolbasin V.O.* Investigation of energy intensity of transport operation // *Bulletin of the Dnepropetrovsk State Agrarian University.* – 2008, №2. (Ukr.)

4. *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 and 2003/30/EC.

*Получено 07.11.2012
Received 07.11.2012*