

## **АГРОВІДХОДИ ЯК ВІДНОВЛЮВАНИЙ ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РЕСУРС ДЛЯ ЗАМІЩЕННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ**

Вінницький національний технічний університет

### **Анотація**

*Проаналізовано джерела і об'єми утворення агровідходів внаслідок сільськогосподарського виробництва України. Розглянута класифікація способів виробництва енергії з біомаси агровідходів. Досліджені питання енергетичного застосування агровідходів в якості відновлюваних енергетичних ресурсів, для заміщення використання природного газу. Оцінені скорочення питомих викидів парникових газів при комбінованому виробництві теплової та електричної енергії із використанням біомаси агровідходів.*

**Ключові слова:** рослинництво, сільськогосподарські культури, агровідходи, біомаса, парникові гази, відновлювальні енергетичні ресурси, виробництво енергії.

### **Abstract**

*The sources and volumes of agro-waste generation resulting from agricultural production in Ukraine have been analyzed. The classification of methods for producing energy from agro-waste biomass has been considered. The issues of energy use of agro-waste as renewable energy resources to replace the use of natural gas have been investigated. The reduction of specific greenhouse gas emissions in the combined production of heat and electricity using agro-waste biomass has been estimated.*

**Keywords:** crop production, agricultural crops, agro-waste, biomass, greenhouse gases, renewable energy resources, energy production.

### **Вступ**

Україна має розвинутий сектор сільського господарства, зокрема рослинництва, який щорічно генерує великий обсяг різноманітних рослинних відходів та залишків. Агровідходи - це відходи, що утворюються внаслідок сільськогосподарської діяльності, зокрема, залишки рослинності, тваринництва, а також відходи переробки сільськогосподарської продукції. До них належать такі матеріали, як соломка, стебла, насіння, гній та інші залишки рослин, які можуть використовуватися як біопаливо або добрива, а також для інших цілей. Відходи поділяються на первинні, тобто ті, що утворюються безпосередньо при збиранні врожаю сільськогосподарських культур, і вторинні – такі, що генеруються при обробці врожаю на підприємствах. Первинні відходи включають соломку зернових та інших культур, відходи виробництва кукурудзи на зерно і соняшника (стебла, стрижні, кошики і т. ін.). Вторинні відходи – це лушпиння соняшника, лушпайка гречки, рису, жом цукрового буряку і тому подібне. Частина відходів та залишків використовується на потреби самого сільського господарства (органічне добриво, підстилка та корм тварин), частина – іншими секторами економіки, а решта біомаси залишається незадіяною і часто утилізується (спалюється в полі, вивозиться на звалище) без принесення користі товаровиробникам. Значну частину біомаси, що не використовується, видається доцільним залучити до виробництва енергії [1]. При цьому важливим є питання яку саме частку відходів та залишків сільського господарства можна використовувати на енергетичні потреби без негативного впливу на родючість ґрунтів.

### **Основна частина**

Аналіз доступного енергетичного потенціалу біомаси агровідходів ґрунтується на теоретичній оцінці виходячи з статистичних даних по рівню сільськогосподарського виробництва (урожайності основних культур, структури сільського господарства, коефіцієнту утворюваних відходів).

На рисунку 1 представлений енергетичний потенціал біомаси агровідходів на 2022 рік. Біомасу

агровідходів можна використовувати в енергетичних цілях шляхом безпосереднього спалювання (деревини, соломи, стічних осадів), а також у переробленому вигляді рідких (ефіри ріпакової олії, спирти, рідкі продукти піролізу) або газоподібних біопалив (біогаз з відходів сільського господарства та рослинництва (рис. 2). Конверсія біомаси в інші види енергоносіїв або кінцеву енергію (теплову або електричну) може відбуватись фізичними, хімічними і біохімічними методами [2-6].

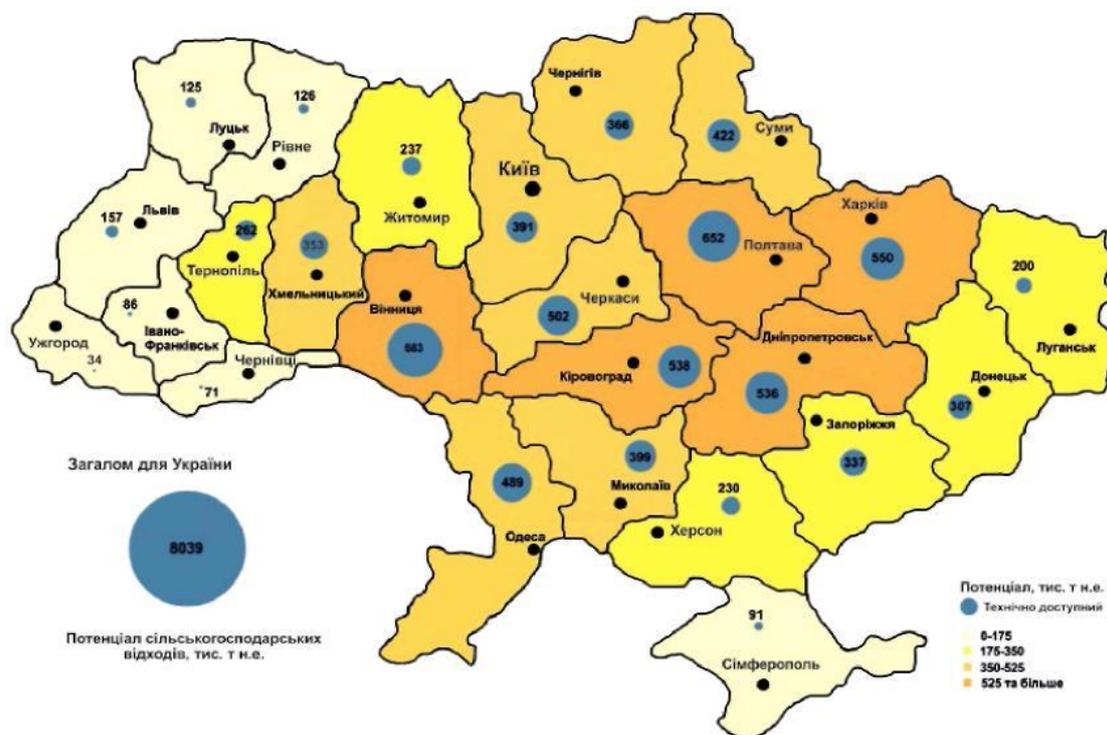


Рис. 1. Потенціал агровідходів в Україні

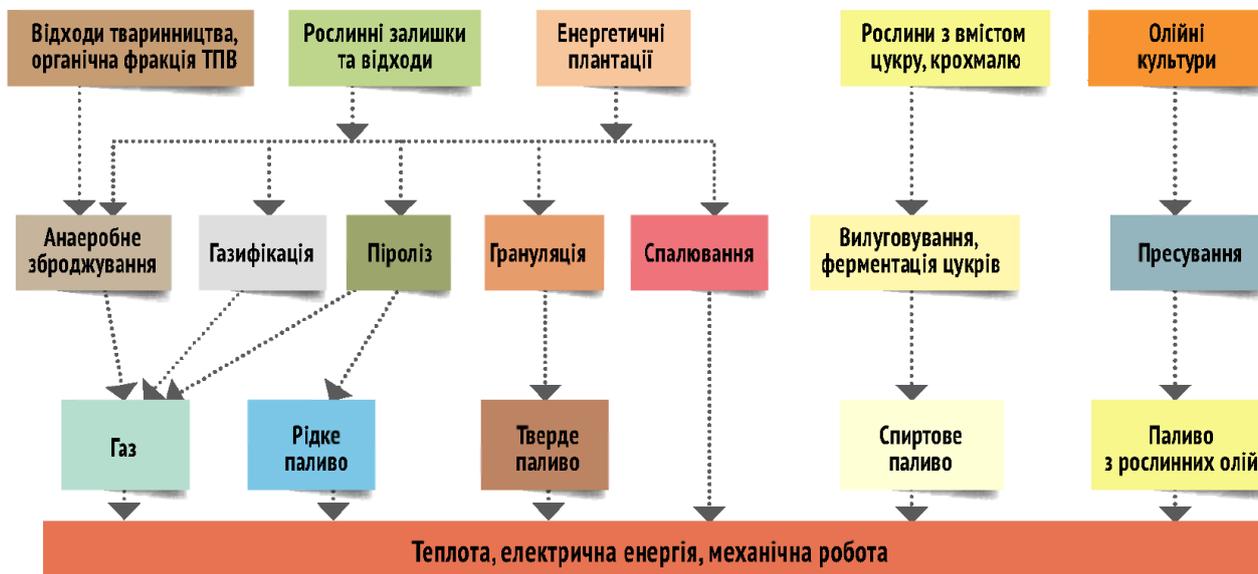


Рис. 2. Способи виробництва енергії з біомаси

Незважаючи на низький рівень розвитку відновлюваної енергетики сьогодні, Україна має хороші передумови для майбутнього розвитку цього напрямку, в першу чергу сектора біоенергетики. Україна володіє великим потенціалом біомаси, доступної для виробництва енергії. Основними складовими цього потенціалу є відходи сільського господарства, а в перспективі - енергетичні культури, вирощування яких почало активно розвиватися останні роки [6, 7].

Енергетичний потенціал біомаси в Україні за 2022 р. представлений в таблиці 1.

Таблиця 1 - Потенціал агровідходів в Україні за 2022 р.

Вид біомаси	Всього утворюється, млн. т	% від загальної кількості	Економічний потенціал, млн. т у.п.
Солома зернових культур	32	20	3,17
Солома ріпаку	2,9	70	0,96
Відходи виробництва кукурудзи на зерно	34	52	8,59
Відходи виробництва соняшника	17	67	5,55
Вторинні відходи с/г (лушпиння, жом)	9,7	77*	0,99
Енергетичні культури:			
- тополя, міскантус, верба та ін.	20	85	10,30
- ріпак (солома)	3,2	70	1,13
- ріпак (біодизель)	-	-	0,77
- кукурудза (біогаз)	-	-	1,10
Торф	-	-	0,4
Всього	-	-	32,96

\* в середньому

Величина енергетичного потенціалу біомаси агровідходів змінюється по роках і залежить, головним чином, від врожайності основних сільськогосподарських культур (пшениця, кукурудза, соняшник та ін.). За останні 10 років коливання енергетичного потенціалу склали від 25 до 38 млн. т у.п./рік (1000 куб.м природного газу = 1,16 т у.п.=0,812 т н.е. (н.е. – нафтовий еквівалент; у.п. – умовне паливо)) [4-6].

В Україні не виправдано високою є частка природного газу в енергобалансі (близько 45%). У проекті оновленої Енергетичної стратегії заплановано зниження споживання газу в Україні, зокрема для виробництва теплової енергії [7-9]. Так, загальне зниження споживання природного газу в 2030 р. складе близько 8 млрд. м<sup>3</sup> (14%) від рівня 2020 р. Із 27 млрд. м<sup>3</sup> газу, що використані для теплопостачання у 2020 р., до 2030 року є можливим (таблиці 2, 3):

- 1/3 замінити біопаливами (9 млрд. м<sup>3</sup>/рік);
- 1/3 заощадити за рахунок утеплення будівель, енергозбереження при виробництві, транспортуванні та споживанні теплової енергії (9 млрд. м<sup>3</sup>/рік);
- 1/3 залишити для цілей теплопостачання, переважно у великих містах (9 млрд. м<sup>3</sup>/рік) [1-6].

Таблиця 2 - Тепло згоряння палив

Теплота згоряння	Одиниці вимірювання	МДж, (ккал)
Газ природний, при 20°C 101,325 кПа	м <sup>3</sup>	31,8; (7600)
Солома	кг	15,7; (3750)
Пелети із соломи	кг	14,51; (3465)
Лушпиння соняшнику, сої	кг	17,00; (4060)
Кукурудза-початок (W>10%)	кг	14,65; (3500)
Свіжозрубана деревина (W=50...60%)	кг	8,12; (1940)
Висушена деревина (W=20%)	кг	14,24; (3400)
тріска	кг	10,93; (2610)
тирса	кг	8,37; (2000)
Пелета деревна	кг	17,17; (4100)

Таблиця 3 - Можливе скорочення споживання природного газу при виробництві теплової енергії

Сектори споживання	Споживання газу для теплопостачання, млрд. м <sup>3</sup> /рік			
	2020	2030		
	Споживання ПГ	Споживання ПГ	Економія ПГ	Заміщення ПГ біомасою
ЖКГ	8	4,0	2,0	2,0
Населення	17	4,0	6,5	6,5
Бюджетна сфера	1	0,4	0,3	0,3
ТЕЦ	1	0,6	0,2	0,2
Всього	27	9	9	9

На енергетичні потреби в Україні використовується лише близько 10% загального потенціалу біомаси. Головним чином це деревна біомаса у вигляді дров, тріски, гранул/брикетів (загалом 85% всього річного обсягу використання біомаси), та лушпиння соняшника (8%). Менш активно використовуються агровідходи соломи - 94000 тонн на рік, що становить <1% економічного

потенціалу соломи в Україні.

В Євросоюзі проводились дослідження питання енергетичного застосування агровідходів. За їх результатами, на енергетичні потреби можна використовувати 25-50% врожаю соломи, а решта біомаси має залишитися на полях. Виробництво енергії з соломи активно розвивається в Данії, Швеції й більшості країн Центральної Європи. На енергетичні потреби там щорічно використовується від 5% до 20% виробленої соломи [9,10]. Дослідження, виконані для умов США показали, що для виробництва енергії/біопалив можна використовувати 30-60% загального обсягу соломи та відходів виробництва кукурудзи на зерно. В Україні є надлишок соломи, який можна залучити до паливно-енергетичного балансу. Співвідношення зернової частини врожаю та незернової (соломи) становить приблизно 1:1, тому річні обсяги утворення соломи близькі до загального виробництва зернових культур в Україні. Виробництво зернових і зернобобових культур в Україні становить порядку 40-50 млн. т на рік з врожайністю 25-30 ц/га. За даними пресслужби Мінагрополітики, станом на листопад 2024 року валовий збір зернових та олійних культур 2024 року в Україні становив понад 71,4 млн тонн. Зокрема, було намолочено 52,1 млн тонн зернових та майже 19,3 млн тонн олійних. Найбільший внесок зробили пшениця (22,4 млн тонн), кукурудза (22,3 млн тонн) та соняшник (10 млн тонн). На кінець листопада 2024 року, валовий збір зернових та олійних культур в Україні досяг 73,6 млн тонн. Загальний урожай зернових та зернобобових культур склав 49,938 млн тонн із середньою врожайністю 4,8 т/га. За попередніми даними, врожай 2025 року очікується на рівні 54-56 млн тонн. Отже, маса незернової частини врожаю у 2025 році становитиме понад 50 млн тонн. Як Україна може використати незернову частину врожаю, тобто агровідходи, зокрема для виробництва енергії і заміщення споживання природного газу?

Загальний обсяг споживання газу в Україні становить близько 30–32 млрд кубометрів на рік, при цьому власний видобуток становить 18–20 млрд кубометрів. У 2025 році для покриття дефіциту буде потрібен імпорт у розмірі 2–3 млрд кубометрів газу.

Для України оптимальний обсяг соломи, яку можна використовувати на теплові потреби, за нульового балансу гумусу становить близько 40%. За попередніми підрахунками, в Україні на енергетичні цілі є можливість щорічно використовувати до 10 млн. т соломи зернових і близько 7 млн. т соломи ріпаку [2, 11-13].

Для заміщення 1000 м<sup>3</sup> природного газу, за умови однакової ефективності котельного обладнання, необхідно використати таку кількість палива таблиця 4.

Таблиця 4 - Заміщення 1000 м<sup>3</sup> природного газу відновлювальними паливами.

Дрова, у повітряно-сухому стані	кг	2520
	м <sup>3</sup>	5-6,3
Тріска деревна, вологість 40%	кг	3340
	м <sup>3</sup>	11-14
Стружка деревна, вологість 7-15%	кг	2270
	м <sup>3</sup>	16-21,6
Тирса деревна, вологість 33-38%	кг	2960
	м <sup>3</sup>	17,4
Гранули з дерева	кг	1970
	м <sup>3</sup>	3-3,6
Гранули з соломи	кг	2200
	м <sup>3</sup>	4-4,4
Гранули з лушпиння соняшника	кг	1890
	м <sup>3</sup>	3-3,4
Солома зернових в тюках	кг	2360
	м <sup>3</sup>	13-26

Відповідно до таблиці 4, 1 млрд м<sup>3</sup> природного газу можна замінити агровідходами, наприклад соломом зернових в тюках:

$$M_{\text{соломи зернових в тюках}} = \frac{2360 \times 1000000000}{1000} = 2360000 \text{ тонн.}$$

Отже, для заміщення 3 млрд м<sup>3</sup> імпортного газу, достатньо використати: 7080000 тонн соломи зернових в тюках.

Основними парниковими газами, викиди яких мають місце при роботі енергетичних систем є діоксид вуглецю (CO<sub>2</sub>), метан (CH<sub>4</sub>) та оксид азоту (N<sub>2</sub>O). Використання енергії агровідходів зменшує

викиди парникових газів, що є одним з найбільш вагомих показників при оцінці впливу біоенергетичних технологій на оточуюче середовище [9, 11]. Величина викидів всіх парникових газів приводиться до еквівалентної величини викидів CO<sub>2</sub> через відповідні коефіцієнти (таблиця 5).

Таблиця 5 - Питомі викиди парникових газів для різних технологій виробництва енергії із агровідходів

Види технологій	Питомі викиди ПГ г CO <sub>2</sub> -екв./кВт·год <sub>т</sub>	Скорочення викидів ПГ	
		г CO <sub>2</sub> -екв./кВт·год <sub>т</sub>	%
<b>Виробництво теплової енергії</b>			
Котел на міскантусі (70 кВт <sub>т</sub> )	101	295	75% <sup>1)</sup>
Котел на тюках соломи (500 кВт <sub>т</sub> ) <sup>4)</sup>	14	211	94%
Котел на гранулах з соломи (100 кВт <sub>т</sub> ) <sup>4)</sup>	60	165	72%
<b>Виробництво електричної енергії</b>			
ТЕС на тюках соломи (2 МВт <sub>е</sub> ) <sup>4)</sup>	217	905	80%
ТЕС на тюках соломи (25 МВт <sub>е</sub> ) <sup>9)</sup>	178 <sup>10)</sup>	нема даних	65%
<b>Сумісне виробництво теплової та електричної енергії</b>			
БГУ зі сумісним зброджуванням гною та силосу кукурудзи (річне виробництво е/е 4 ГВт·год, теплової енергії 7,2 ГВт·год)	266	207	56% <sup>3)</sup>
ТЕЦ на тюках соломи (2 МВт <sub>е</sub> +10 МВт <sub>т</sub> ) <sup>4)</sup>	37	150	80%

Згідно директиви ЄС, зниження викидів парникових газів при впровадженні технологій відновлюваної енергетики має бути не менше 60% у порівнянні з аналогічним використанням викопних палив. В таблиці 5 представлено результати дослідження [6-13], проведених в рамках директиви 2009/28/ЄС. З даних таблиці видно, що всі установки на твердій біомасі та більшість установок на біогазі відповідають вимогам директиви 2009/28/ЄС – скорочення викидів парникових газів, обумовлене їх роботою, становить > 60%. Ці результати добре узгоджуються з даними інших авторів, зібраними та представленими в дослідженні [11], рисунки 3, 4.

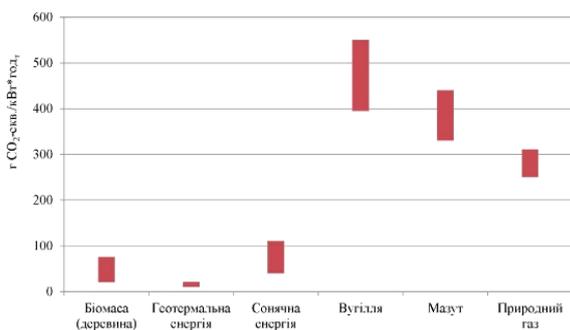


Рис. 3. Питомі викиди парникових газів при виробництві теплової енергії

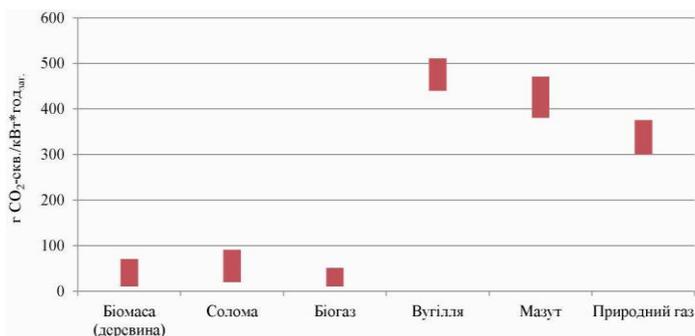


Рис. 4. Питомі викиди парникових газів при комбінованому виробництві теплової та електричної енергії

## Висновки

1. Енергетичний потенціал агровідходів в Україні становить близько 20-25 млн. т у. п./рік. Основними складовими потенціалу є відходи сільськогосподарського виробництва (солома, стебла кукурудзи, стебла соняшнику і т.п.) – більше 11 млн. т у.п./рік (за даними 2022 р.) та енергетичні культури – близько 10 млн. т у.т./рік.

2. Використання агровідходів дозволить Україні позбутися газової залежності і забезпечити енергетичні потреби за рахунок використання власних, швидко відновлюваних енергетичних ресурсів рослинного походження.

3. Агровідходи є місцевим видом палива. В процесі виробництва енергії використовуються наявні місцеві ресурси регіону, включаючи і трудові, що призводить до розвитку місцевої економіки.

4. Агровідходи є відновлюваним видом палива, і при раціональному використанні, є, практично невичерпним джерелом енергії, використання якого сприяє сталому розвитку регіону, та не створює ризиків підвищення цін через зміни на енергоринку традиційних викопних енергоресурсів.

5. Агровідходи є екологічно чистим паливом у порівнянні із іншими твердими видами палива,

наприклад, вугіллям. Як правило, агробіомаса містить мало сірки, а її спалювання при відносно невисоких температурах не призводить до утворення окислів азоту. Завдяки включенню біомаси у природний цикл поглинання, зберігання та вивільнення CO<sub>2</sub>, спалювання не призводить до посилення парникового ефекту та знижує негативний антропогенний вплив на оточуюче середовище.

6. Ринок виробництва енергії з агробіомаси є новим сектором економічної діяльності, що створює нові робочі місця, сприяє росту регіонального валового продукту та загальному «озелененню» економіки.

7. Використання агровідходів зменшує кількість відходів та сміття у містах, що сприяє очищенню засмічених територій, відновленню біорізноманіття, загальному покращенню навколишнього природного середовища.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Аналітична записка БАУ №7 «Перспективи використання відходів сільського господарства для виробництва енергії в Україні».
2. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А. Перспективи використання відходів сільського господарства для виробництва енергії в Україні. Аналітична записка БАУ №7, 2022 <http://www.uabio.org/img/files/docs/Position-paper-uabio-7-ua.pdf>
3. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Олійник Є.М. Перспективи виробництва теплової енергії з біомаси в Україні // Промислова теплотехніка. – 2013, Т. 35, № 5. – С. 48-57.
4. Енергетична стратегія України на період до 2030 року. Затверджена розпорядженням КМУ № 1071 від 24.07.2013. <http://mpe.kmu.gov.ua/fuel/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358>
5. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А. Бар'єри для розвитку біоенергетики в Україні. Частина 1 // Промислова теплотехніка. – 2013, Т. 35, № 4. – С. 63-71.
6. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А. Бар'єри для розвитку біоенергетики в Україні. Частина 2 // Промислова теплотехніка. – 2013, Т. 35, № 5. – С. 43-47.
7. Закон України «Про електроенергетику» (№ 575/97-ВР від 16.10.1997, зі змінами). <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/575/97-%D0%B2%D1%80>
8. Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#n12>
9. Статистичні дані Європейської Комісії у секторі енергетики [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/other\\_documents](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/other_documents)
10. Директива Європейського Парламенту і Ради (ЄС) 2018/2001 від 11 грудня 2018 року про стимулювання використання енергії з відновлюваних джерел (нова редакція)
11. Neil Bird, Annette Cowie, Francesco Cherubini, Gerfried Jungmeier. Using a Life Cycle Assessment approach to estimate the net greenhouse gas emissions of bioenergy. Report on IEA Bioenergy Task 38. <http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/Using-a-LCA-approach-to-estimate-the-net-GHG-emissions-of-bioenergy.pdf>
12. Доценко О.А., Суздалевич І.Ю., Васильківський І. В. Використання рослинних відходів для виробництва енергії / “V Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю” (Екологія/Ecology-2015), 23–26 вересня, 2015. Збірник наукових статей. – Вінниця: Видавництво-друкарня Діло, 2015. – С. 235.
13. Майданюк А.Д., Доценко О.А., Васильківський І. В. Удосконалення логістики використання рослинних відходів / “VI Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю” (Екологія/Ecology-2017), 25–27 вересня, 2017. Збірник наукових статей. – Вінниця: Видавництво-друкарня Діло, 2017. – С.53.

**Васильківський Ігор Володимирович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [igor.vntu@gmail.com](mailto:igor.vntu@gmail.com)

**Тітов Тарас Сергійович** – канд. хім. наук, доцент кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**Сидорук Тетяна Іванівна** – канд. хім. наук, доцент, доцент кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**Несса Вікторія Русланівна** – студ. групи ТЗД-24м, факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [viktoria3004nessa@gmail.com](mailto:viktoria3004nessa@gmail.com)

**Igor V. Vasytkivskiy** – Ph.D., Docent, Associate Professor of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [igor.vntu@gmail.com](mailto:igor.vntu@gmail.com)

**Taras S. Titov** – Ph.D. (Chem.), Associate Professor of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

**Tetiana I. Sydoruk** – Ph.D. (Chem.), Docent, Associate Professor of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

**Viktoria R. Nessa** – student, Faculty of Civil Engineering, Civil and Ecological Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [viktoria3004nessa@gmail.com](mailto:viktoria3004nessa@gmail.com)