



СПРИЯННЯ ВПРОВАДЖЕННЮ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ НА АГРОБІОМАСІ
У СІЛЬСЬКИХ РЕГІОНАХ ЄВРОПИ

ЕНЕРГІЯ З РЕШТОК КУКУРУДЗИ

UABIO



CERTH
CENTRE FOR
RESEARCH & TECHNOLOGY
HELLAS



Цей проєкт отримав фінансування
від Програми досліджень та інновацій
ЄС Горизонт 2020 згідно Грантової Угоди № 818369





UABIO



CERTH
CENTRE FOR
RESEARCH & TECHNOLOGY
HELLAS



Цей проєкт отримав фінансування
від Програми досліджень та інновацій ЄС
Горизонт 2020 згідно
Грантової Угоди № 818369

ПЕРЕДМОВА

Публікація «Енергія з решток кукурудзи», підготовлена Біоенергетичною асоціацією України (UABIO) та Центром досліджень і технологій Еллади (CERTH), входить у серію авторитетних посібників, розроблених у рамках проєкту AgroBioHeat. Мета цієї серії видань – надати системні знання про використання різних видів ресурсів агробіомаси. Зокрема, цей посібник зосереджується на ефективній заготівлі та біоенергетичному використанні решток кукурудзи (також відомих як кукурудзиння), які щорічно виробляються у значних обсягах і в даний час недостатньо застосовуються.

Проєкт AgroBioHeat спрямований на масове поширення вдосконалених і готових ринкових рішень для систем опалення, що працюють на агробіомасі в Європі. Агробіомаса є значним, недовикористовуваним місцевим ресурсом, який може допомогти в досягненні європейських енергетичних і кліматичних цілей, одночасно сприяючи розвитку сільських територій і економіки замкнутого циклу. Цей проєкт отримав фінансування від Програми досліджень та інновацій ЄС Горизонт 2020 згідно Грантової Угоди № 818369.

Додаткову інформацію про проєкт можна знайти на веб-сайті www.agrobioheat.eu

Даний документ відображає лише погляди авторів. Європейське виконавче агентство з питань клімату, інфраструктури та довкілля (CINEA) не несе відповідальності за будь-яке використання інформації, що міститься в ньому.

ОСНОВНІ АВТОРИ:

Георгій Гелетуха (UABIO)
Семен Драгнєв (UABIO)
Тетяна Желєзна (UABIO)
Маноліс Карампініс (CERTH)

ДОДАТКОВИЙ АВТОР:

Томас Брюнер (BIOS)

ДИЗАЙН ТА ВЕРСТКА

Ольга Нікітіна
olik5981@gmail.com

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

Скорочення	Пояснення
CB	Стрижень
CCM	Зерно-стрижнева суміш
DM	Суха речовина
E	Качани
EW	Обгортка качана
GR	Зерно
LV	Листя
mgy	Мільйон галонів на рік
MP	Маркетинговий рік
ST	Стебла
VS	Леткі тверді речовини
W	Вміст води
w.b.	Волога основа
ВДЕ	Відновлювані джерела енергії
ОГС	Органічні газоподібні сполуки
ТЕЦ	Теплоелектроцентрально
ТЕС	Теплова електростанція
к.с.	Кінська сила
с.р.	Суха речовина

ЗМІСТ

Вступ.....	7
Рештки кукурудзи як енергоносії	8
Стан вирощування кукурудзи	8
Рештки кукурудзи	9
Паливні характеристики решток кукурудзи	15
Заготівля решток кукурудзи	17
Технології збирання зерна кукурудзи	17
Технології збирання решток кукурудзи	19
Ланцюг постачання кукурудзиння DuPont	22
Транспортування тюків кукурудзиння	23
Збирання кукурудзиння у рулонах	24
Збирання подрібненого кукурудзиння	24
Системи збирання стрижнів качанів	25
Зберігання кукурудзиння	25
Ущільнення решток кукурудзи	27
Виробництво теплової енергії з решток кукурудзи	28
Виробництво теплової енергії з кукурудзиння	28
Виробництво теплової енергії зі стрижнів	29
Виробництво електричної енергії з решток кукурудзи	31
Виробництво біоетанолу з решток кукурудзи	33
Виробництво біогазу з решток кукурудзи	35
Аспекти сталості використання решток кукурудзи	38
Стале відчуження решток кукурудзи	38
Емісія парникових газів від логістики решток кукурудзи	39
Додаток I: Основні види техніки для збирання, логістика кукурудзиння та його перероблення в гранули/брикети	40
Додаток II: Енергетичні системи для виробництва тепла із решток кукурудзи	44
Консорціум проєкту AgroBioHeat	45

ПЕРЕЛІК ТАБЛИЦЬ

Таблиця 1: Основні виробники зерна кукурудзи у світі за останні 5 років (за МР)	8
Таблиця 2: Порівняння індикативних паливних характеристик фракцій кукурудзиння з іншими видами біомаси	15
Таблиця 3: Вихід біометану з решток кукурудзи та силосу кукурудзи	35

ПЕРЕЛІК РИСУНКІВ

Рисунок 1: Врожайність кукурудзи у США з 1866 до 2019 рр.	10
Рисунок 2: Виробництво і врожайність кукурудзи на зерно та зерно-стрижневої суміші у вибраних країнах ЄС з 2015 до 2019 рр.	10
Рисунок 3: Різні надземні частини рослини кукурудзи та співвідношення їх сухої маси	11
Рисунок 4: Розрахована емпірична модель для прогнозування врожайності решток кукурудзи залежно від економічної врожайності зерна	11
Рисунок 5: Кукурудзиння, що залишилося у полі після комбайна	12
Рисунок 6: Енергетичний потенціал решток кукурудзи в Європі, ТДж (2019 р.)	13
Рисунок 7: Різні напрямки кінцевого використання окремих частин кукурудзи	14
Рисунок 8: Залежність нижчої теплоти згорання кукурудзиння від її вологості (w.b.)	16
Рисунок 9: Технології збирання кукурудзи на зерно із потоками решток кукурудзи	17
Рисунок 10: Збирання кукурудзи зернозбираль- ним комбайном, обладнаним кукурудзяною жаткою	18
Рисунок 11: Утворення решток кукурудзи після зернозбирального комбайна	19
Рисунок 12: Технологічні схеми для збирання кукурудзиння	20
Рисунок 13: Моделі сільськогосподарської техніки для збирання кукурудзиння	21
Рисунок 14: Схема ланцюга постачання кукурудзиння на завод із виробництва біоетанолу з лігноцелюлозної сировини DuPont	22

Рисунок 15: Виробнича програма заводу біоетанолу з лігноцелюлозної сировини DuPont	23	Рисунок 22: Схема виробництва біоетанолу з лігноцелюлозної біомаси	33
Рисунок 16: Ланцюжки заготівлі кукурудзиння у подрібненому вигляді	24	Рисунок 23: Схема попередньої обробки лігноцелюлозної сировини для виробництва біогазу	36
Рисунок 17: Збирачі стрижнів	25	Рисунок 24: Залежність обсягів видалення решток кукурудзи від економіки, обмежуючих факторів та агрономічних стратегій	38
Рисунок 18: Зберігання тюків кукурудзиння під відкритим небом у Іспанії	26	Рисунок 25: Скорочення емісії парникових газів від альтернативного використання кукурудзиння у порівняння з звичайним виробництвом електрики у США	39
Рисунок 19: Прямокутні тюки кукурудзиння в селі Криничне	28		
Рисунок 20: ТЕС на біомасі Міахадас 15 МВт	32		
Рисунок 21: Тюки кукурудзиння на складі ТЕС Міахадас	32		

ВСТУП

Кукурудза – одна з найважливіших культур у світі. Це високопродуктивна рослина тропічного походження з фіксацією вуглецю С4. Кукурудза походить з Андського регіону Центральної Америки, що пояснює потребу в теплі для її росту і розвитку. За короткий час кукурудза виробляє більше органічної речовини, ніж інші культури. Її вирощують на зерно та корм¹ (силос або використання безпосередньо для годування тварин без силосування). Слово «кукурудза» часто вживається у значенні зерно кукурудзи, світове виробництво якого у

2015-2019 роках становило від 972 до 1123 млн т на рік. У 2019/2020 маркетинговому році (МР) у ЄС вироблено 65 млн т кукурудзи або майже 6% світового виробництва². В Україні показники з виробництва кукурудзи перевищили виробництво пшениці, і кукурудза за валовим збором стала основною культурою в країні. Цінні властивості кукурудзи зумовлюють її постійно високий попит на світовому та європейському ринках. Середня врожайність кукурудзи останніми роками в ЄС та Україні була вище 7 т/га.

Крім зерна утворюється значна кількість решток кукурудзи³ (стебла, листя, стрижні качанів, обгортки, тощо). Їх можна збирати та використовувати для різних цілей як агробіомасу, у тому числі для біоенергетики. Зібрані та вивезені з полів рештки кукурудзи вважаються побічними продуктами кукурудзи. Наприклад, їх можна використовувати як сировину для виробництва твердого біопалива, біогазу та рідких біопалив другого покоління. Але нині залишки кукурудзи є значним, недостатньо використовуваним місцевим відновлюваним ресурсом, який міг би підтримати досягнення європейських цілей у сферах енергетики та клімату, одночасно сприяючи розвитку сільських територій та економіці замкненого циклу.



Рештки кукурудзи мають специфічні паливні властивості, що вимагає для спалювання цього виду агробіомаси використання спеціально спроектованих котлів. Економічна доцільність використання цієї біомаси також залежить від відповідного ланцюга створення додаткової вартості «збиран-

ня – логістика – зберігання». У даному посібнику описано ці питання, розглянуто потенціал біомаси залишків кукурудзи для виробництва енергії в ЄС та Україні, можливість переробки цієї агробіомаси в гранули/брикети, біогаз і рідке біопаливо другого покоління, а також висвітлено аспекти сталості.

¹ У цьому посібнику не розглядається вирощування цукрової кукурудзи, післяжнивні рештки якої також використовуються як цінний корм для худоби.

² World Agricultural Production, USDA Reports <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>

³ Надземну частину кукурудзи на зерно та залишену на полі після збирання врожаю (в основному, стебла, листя, обгортки та стрижні качанів), часто називають «кукурудзинням» або «кукурудзяною соломою».

РЕШТКИ КУКУРУДЗИ ЯК ЕНЕРГОНОСІЙ

СТАН ВИРОЩУВАННЯ КУКУРУДЗИ

Кукурудза – найпопулярніша культура у рослинництві світу, у тому числі завдяки можливості її вирощування в різних місцях з високими показниками врожайності. Крім того, впливає зростання попиту на кукурудзу як культуру, що використовується для виробництва широкого спектру продукції, зокрема, біопалив. У світі близько 60% біоетанолу виробляється саме з кукурудзи⁴. У 2019 році в США майже 30% кукурудзи (105,6 млн т) було використано для виробництва біоетанолу першого покоління⁵.

У світі за виробництвом і врожайністю кукурудзи лідирують США (табл. 1). ЄС є четвертим виробником кукурудзи у світі, а Україна займає 6 місце. За попередніми даними, виробництво кукурудзи в

США у 2020/2021 МР становило 358,5 млн т (32% від світового виробництва), середня врожайність – 10,8 т/га. В інших країнах виробництво кукурудзи у 2020/2021 МР було таким: Китай – близько 260,7 млн т, Бразилія – 87 млн т, ЄС – 67,1 млн т, Аргентина – 50,5 млн т, Індія – 31,5 млн т, Україна – 30,3 млн т. Прогнози USDA на 2021/2022 МР⁶ становлять 70,4 млн т для ЄС і 40,0 млн т для України, що більше, ніж у попередньому році. Слід зазначити, що в ЄС також значні площі відведені під зелену масу кукурудзи, яка переважно переробляється на силос. Так, у 2019 році площа під вирощування зеленої маси кукурудзи становила 6,4 млн га, а площа кукурудзи на зерно та зерно-стрижневу суміш – 8,9 млн га⁷. Загальна площа посівів кукурудзи складала майже 14,5% ріллі в ЄС-28 і понад 18,5% в Україні.

ТАБЛИЦЯ 1:

Основні виробники зерна кукурудзи у світі за останні 5 років (за МР)⁶

№	Країна/регіон	Площа, млн га					Врожайність, т/га					Виробництво, млн т				
		2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021	2021/2022	2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021	2021/2022	2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021	2021/2022
1	США	33.5	32.9	32.9	33.3	34.4	11.1	11.1	10.5	10.8	11.1	371.1	364.3	346.0	358.5	382.6
2	Китай	42.4	42.1	41.3	41.3	43.3	6.1	6.1	6.3	6.3	6.5	259.1	257.2	260.8	260.7	272.6
3	Бразилія	16.6	17.5	18.5	19.9	20.8	4.9	5.8	5.5	4.4	5.7	82.0	101.0	102.0	87.0	118.0
4	ЄС	8.3	8.3	8.9	9.3	9.4	7.5	7.8	7.5	7.2	7.5	62.0	64.4	66.7	67.1	70.4
5	Аргентина	5.2	6.1	6.3	6.4	6.8	6.2	8.4	8.1	7.9	8.0	32.0	51.0	51.0	50.5	54.5
6	Україна	4.4	4.6	5.0	5.4	5.4	5.4	7.8	7.2	5.6	7.4	24.1	35.8	35.9	30.3	40.0
7	Індія	9.4	9.0	9.6	9.9	9.7	3.1	3.1	3.0	3.2	3.1	28.8	27.7	28.8	31.5	30.0
8	Мексика	7.3	7.2	6.6	7.1	7.3	3.8	3.8	4.0	3.8	3.8	27.6	27.6	26.7	27.4	28.0
	Світ	192.2	192.1	193.6	198.8	203.0	5.6	5.9	5.8	5.7	6.0	1080	1123	1120	1123	1209

ПРИМІТКИ: 2020/2021 МР – попередні дані, 2021/2022 МР – прогноз (грудень 2021 р.).

⁴ OECD FAO Agricultural Outlook 2019 2028. <http://www.fao.org/3/ca4076en/ca4076en.pdf>

⁵ World of corn 2020. <http://www.worldofcorn.com/pdf/WOC-2020.pdf>

⁶ World Agricultural Production, USDA Reports <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>

⁷ Eurostat <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/home>

Збільшення врожайності кукурудзи протягом останніх десятиліть (рис. 1) пов'язане з розвитком аграрної науки та використанням біотехнології для створення гібридів. У порівняльних випробуваннях американським фермерам вдалося досягти врожайності кукурудзи понад 25,0 т/га. У 2019 році Національна асоціація виробників кукурудзи США оголосила про світовий рекорд у Вірджинії близько 38,7 т/га (616,2 бушелів/акр) кукурудзи на зерно⁸. До 2028 року очікується зростання середньої світової врожайності кукурудзи на 14% від показників 2016-2018 рр.⁴

Розподіл врожайності та виробництва кукурудзи на зерно та зерно-стрижневої суміші у країнах ЄС-28 показано на рис. 2. Серед них переважає кукурудза на зерно. Провідними виробниками кукурудзи у 2019 році були Румунія (17,3 млн т), Франція (13,0 млн т) та Угорщина (8,3 млн т). З 2015 по 2019 р. найвищу середню врожайність кукурудзи та зерно-стрижневої суміші досягли в Іспанії (11,6 т/га), Греції (10,3 т/га), Австрії та Італії (10,1 т/га).

РЕШТКИ КУКУРУДЗИ

Основним продуктом вирощування кукурудзи є зерно, що обумовлює економічну ефективність діяльності фермерів. Крім того, рослина кукурудзи складається з різних підземних і надземних частин (рис. 3), які утворюють рештки кукурудзи. Важливо відзначити, що для кукурудзи співвідношення решток до зерна вище, ніж у інших зернових. За

експериментальними даними, утворення біомаси в листях і стеблах кукурудзи може бути високим навіть в умовах помірного водного стресу, що робить цю культуру важливим джерелом біомаси сільськогосподарських решток¹⁰. Співвідношення урожайності решток кукурудзи (R) до врожайності зерна (Y) залежить від багатьох факторів, насамперед від сорту рослин, методів агротехніки, клімату та польових умов¹¹. Загалом це співвідношення (R/Y) зменшується зі збільшенням врожаю кукурудзи (рис. 4), але зв'язок між урожаєм решток і врожайністю кукурудзи слабкий. Зручно використовувати стандартне співвідношення R/Y. Наприклад, в Україні типове $R/Y = 1,3$. Під час збирання вологість зерна та решток кукурудзи може бути різною, і описаний підхід цього не враховує. Часто для оцінки врожаю залишків використовують індекс врожаю (HI): співвідношення зерна до загальної біомаси, який завжди відноситься до маси сухої речовини. У США HI зазвичай коливається близько 0,50¹², що відповідає $R/Y = 1$.

У науковій літературі пропонуються різні залежності для оцінки співвідношення R/Y на основі врожайності зерна. У цьому посібнику для оцінки потенціалу біомаси з решток кукурудзи використовується рівняння, представлене Бентсен та ін.¹³, оскільки вважається, що воно добре відповідає експериментальним спостереженням:

$$R/Y = 2.656 \cdot \exp(-0.103 \cdot Y),$$

де R/Y та Y – у т/га сухої речовини.

⁸ <https://www.ocj.com/2019/12/2019-national-corn-yield-contest-hits-new-yield-record/>

⁹ https://www.nass.usda.gov/Publications/Todays_Reports/reports/croptr18.pdf

¹⁰ Camia A., Robert N., Jonsson R., Pilli R., García-Condado S., López-Lozano R., van der Velde M., Ronzon T., Gurria P., M'Barek R., Tamosiunas S., Fiore G., Araujo R., Hoepffner N., Marelli L., Giuntoli J., Biomass production, supply, uses and flows in the European Union. First results from an integrated assessment, EUR 28993 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, ISBN978-92-79-77237-5, doi:10.2760/539520, JRC109869

¹¹ Maximising the yield of biomass from residues of agricultural crops and biomass from forestry. Final report of Ecofys project. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Ecofys%20-%20Final_%20report_%20EC_max%20yield%20biomass%20residues%2020151214.pdf

¹² https://www.canr.msu.edu/news/harvest_index_a_predictor_of_corn_stover_yield

¹³ Bentsen NS, Felby C, Thorsen BJ. Agricultural residue production and potentials for energy and materials services. *Progr Energy Combustion Sci* 2014;40:59–73. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2013.09.003>

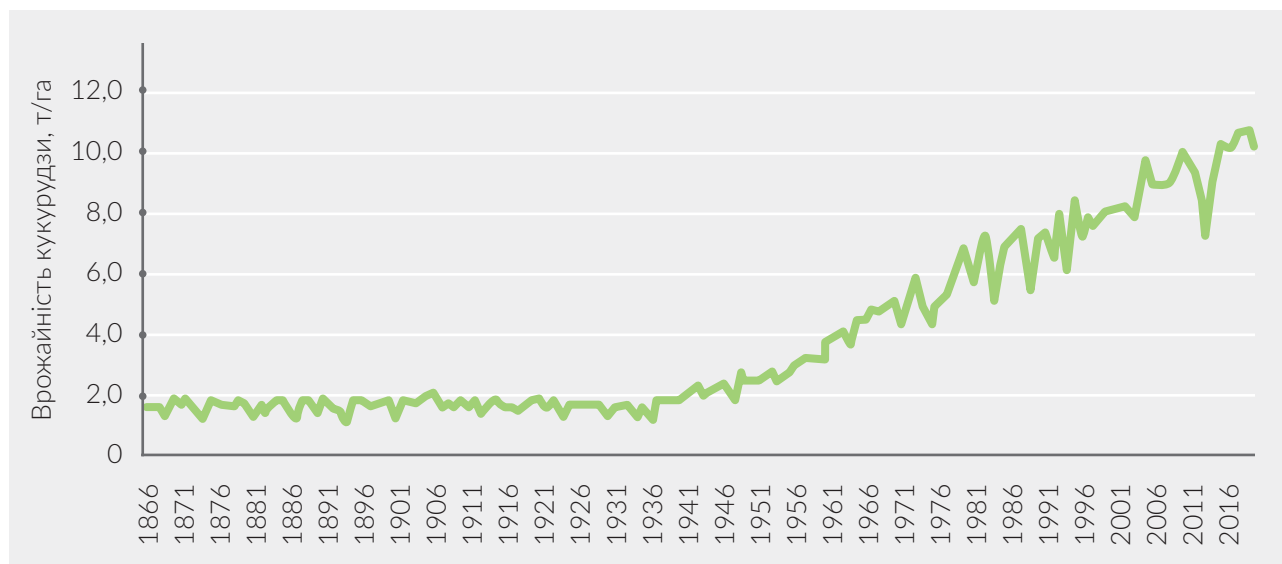


РИСУНОК 1:

Врожайність кукурудзи у США з 1866 до 2019 рр.?

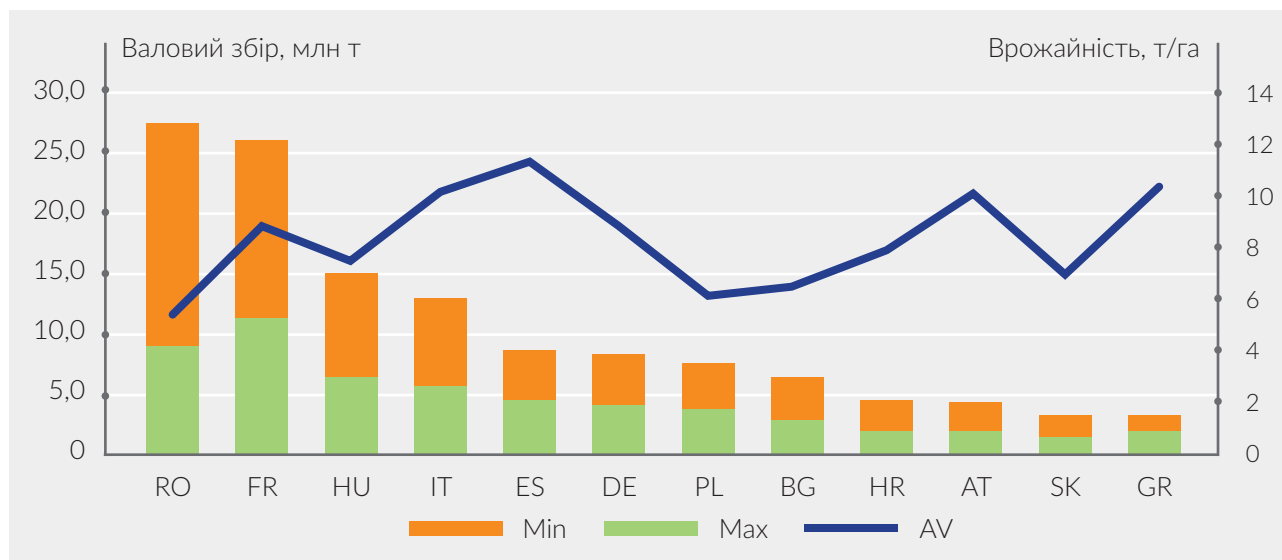


РИСУНОК 2:

Виробництво і врожайність кукурудзи на зерно та зерно-стрижневої суміші у вибраних країнах ЄС з 2015 до 2019 рр.

(Джерело: Eurostat online data code: TAG00093, представлення даних UABIO).

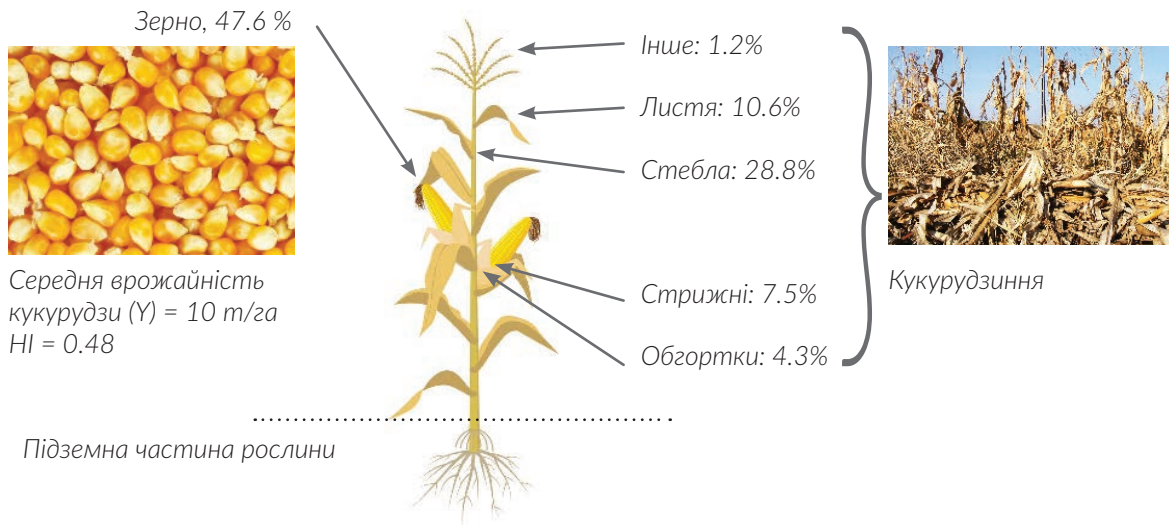


РИСУНОК 3:

Різні надземні частини рослини кукурудзи та співвідношення їх сухої маси¹⁴

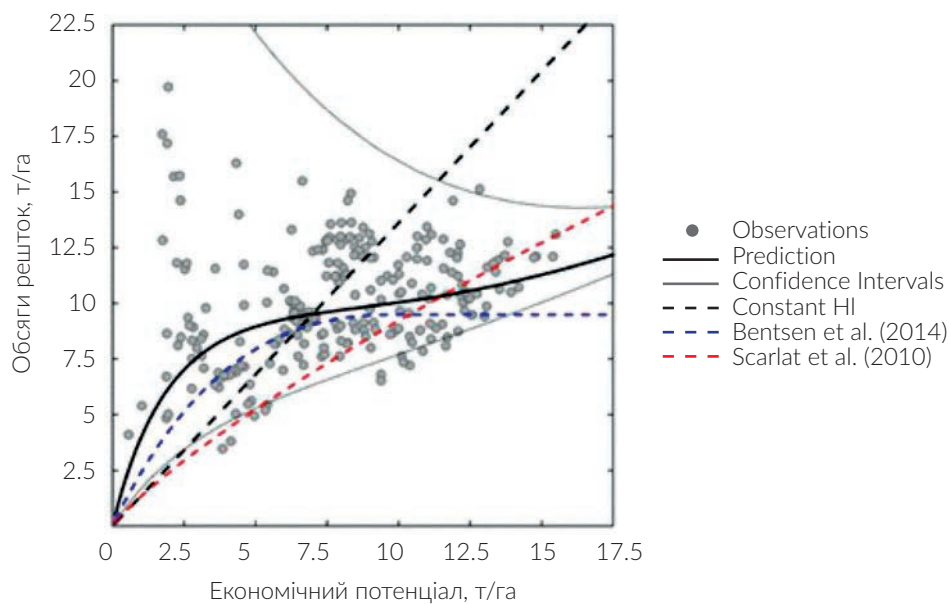


РИСУНОК 4:

Розрахована емпірична модель для прогнозування врожайності решток кукурудзи залежно від економічної врожайності зерна¹⁵

¹⁴ David Ertl Sustainable corn stover harvest / Iowa Corn Promotion Board, 2013. – 18 p.
https://www.researchgate.net/publication/319493290_Sustainable_Corn_Stover_Harvest_A_publication_of_the_Iowa_Corn_Promotion_Board

¹⁵ García-Condado S, López-Lozano R, Panarello L, et al. Assessing lignocellulosic biomass production from crop residues in the European Union: modelling, analysis of the current scenario and drivers of interannual variability. GCB Bioenergy. 2019;00:1–23. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12604>



РИСУНОК 5:

Кукурудзиння, що залишилося у полі після комбайна

Надземні залишки (кукурудзиння) можна частково зібрати як побічні продукти кукурудзи, що мають комерційну цінність (рис. 5). Решта надземних і підземних частин кукурудзи залишають на полі як післяжнивні рештки, які відіграють роль органічних добрив. Для якості ґрунту необхідно дотримуватися належних методів управління рештками. Відповідні норми їх видалення повинні ґрунтуватися на мінімальному рівні рослинних решток, які необхідно утримувати на землі для підтримки якості ґрунту, обсягу органічної речовини ґрунту та для зниження ризику ерозії¹⁶. Питання сталості стосовно збирання побічних продуктів кукурудзи описані в розділі «Аспекти сталості використання решток кукурудзи» цього посібника. Наведені в літературі дані щодо відсотка сталого видалення решток кукурудзи становлять від 25% до 70%. В даному посібнику в оцінці потенціалу енергетичної біомаси враховується частка видалення залишків кукурудзи – 40%.

Утворення сільськогосподарських відходів, у тому числі решток кукурудзи, є сезонним і залежить від періоду збирання. Кукурудзу на зерно збирають у різні терміни, залежно від сорту, місця вирощування та строків сівби. Зазвичай період збирання кукурудзи визначається рівнем вологості зерна, тому перед початком збирання аграрії визначають вологість зерна та його стиглість, враховуючи терміни сівби та групу стиглості гібриду. Вологість різних частин кукурудзи неоднорідна і швидко зменшується через 120 днів від дати посіву¹⁷. У Європі типовий період збирання кукурудзи – вересень-листопад. Зазначимо, що деякі аграрії збирають кукурудзу в грудні-січні, а то й пізніше. Однак це пов'язано не з агротехнічними вимогами, а з певними виробничими потребами та економічною доцільністю. Під час збирання врожаю кукурудза часто більш волога ($W > 30\%$), ніж зерно (стандартна вологість у ЄС $W14\%$), але після збирання зерна волога з біомаси

¹⁶ Nicolae Scarlat, Milan Martinov, Jean-François Dallemand Assessment of the availability of agricultural crop residues in the European Union: Potential and limitations for bioenergy use / Waste Management, Volume 30, Issue 10, October 2010, Pages 1889-1897. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.016>

¹⁷ C. Igathinathane, Alvin R.Womac, Shahab Sokhansanj, Lester O.Pordesimo. Vertical Mass and Moisture Distribution in in Standing Corn Stalks // 2004 ASAE/CSAE Annual International Meeting (Ottawa, Ontario, Canada, 1-4 August, 2004). – 20 p.

інтенсивно випаровується, наприклад, за рахунок вітру. Крім того, вологість решток кукурудзи сильно залежить від погодних умов під час збирання врожаю, а інтенсивні опади можуть призвести до дуже несприятливих умов для збирання біомаси і подальшого її енергетичного використання.

Для розрахунку енергетичного потенціалу решток кукурудзи (рис. 6) використано нижчу теплотворну здатність 17,5 МДж/кг (суха основа)¹⁸. Розподіл енергетичного потенціалу залишків кукурудзи по Європі нерівномірний. У 2019 році найбільша концентрація залишків кукурудзи з енергетичним еквівалентом 302,5 ПДж була в Україні. У ЄС лідерами були Румунія (155,2 ПДж), Франція (97,5 ПДж) та Угорщина (64,8 ПДж). Загальний енергетичний потенціал залишків кукурудзи в ЄС-28 становив 557,9 ПДж у 2019 році. Значний потенціал також існує в таких країнах як Іспанія, Греція, Бельгія, Австрія та Туреччина.

Доступний енергетичний потенціал решток кукурудзи фактично визначається агровиробниками. Вони

забезпечать стабільний збір кукурудзиння, якщо у них є економічний інтерес. Вартість побічних продуктів кукурудзи на ринку залежить від важливих для кінцевих споживачів характеристик агробіомаси. Різні частини побічних продуктів кукурудзи мають різні фізико-хімічні характеристики, але, у загальному, це лігноцелюозна біомаса. Основні способи використання зерна та залишків кукурудзи наведені на рис. 7. Рештки кукурудзи мають відносно низьку поживну цінність, особливо стебла кукурудзи, які вважаються низькоякісними кормами¹⁹. Харчова цінність листя та обгорток вища в порівнянні зі стеблами та стрижнями кукурудзи, але вони все ще не використовуються у великих обсягах. Нині кукурудзиння в основному залишають на полі, заорюють і заробляють у ґрунт. Слід зазначити, що на окремих територіях на полях спалюються післяжнивні рештки, у тому числі кукурудзиння, що спричиняє численні негативні наслідки для довкілля²⁰. Таким чином, наявні ресурси побічних продуктів кукурудзи можуть бути використані як сировина для виробництва твердого біопалива, біоетанолу другого покоління та біогазу.



РИСУНОК 6:

Енергетичний потенціал решток кукурудзи в Європі, ТДж (2019 р.)

¹⁸ Caroline Schneider, Hanz Hartmann Maize as energy crop for combustion. Agricultural optimization of fuel supply. TFZ, 2006. http://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/festbrennstoffe/dateien/09_bericht.pdf

¹⁹ Characterisation of Agricultural Waste Co- and By-Products. Report of the AgroCycle project. 2016. http://www.agrocycle.eu/files/2017/10/D1.2_AgroCycle.pdf

²⁰ Vladislav Zekić, Vesna Rodić, Milenko Jovanović Potentials and economic viability of small grain residue use as a source of energy in Serbia. Biomass and Bioenergy, 2010. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.07.012

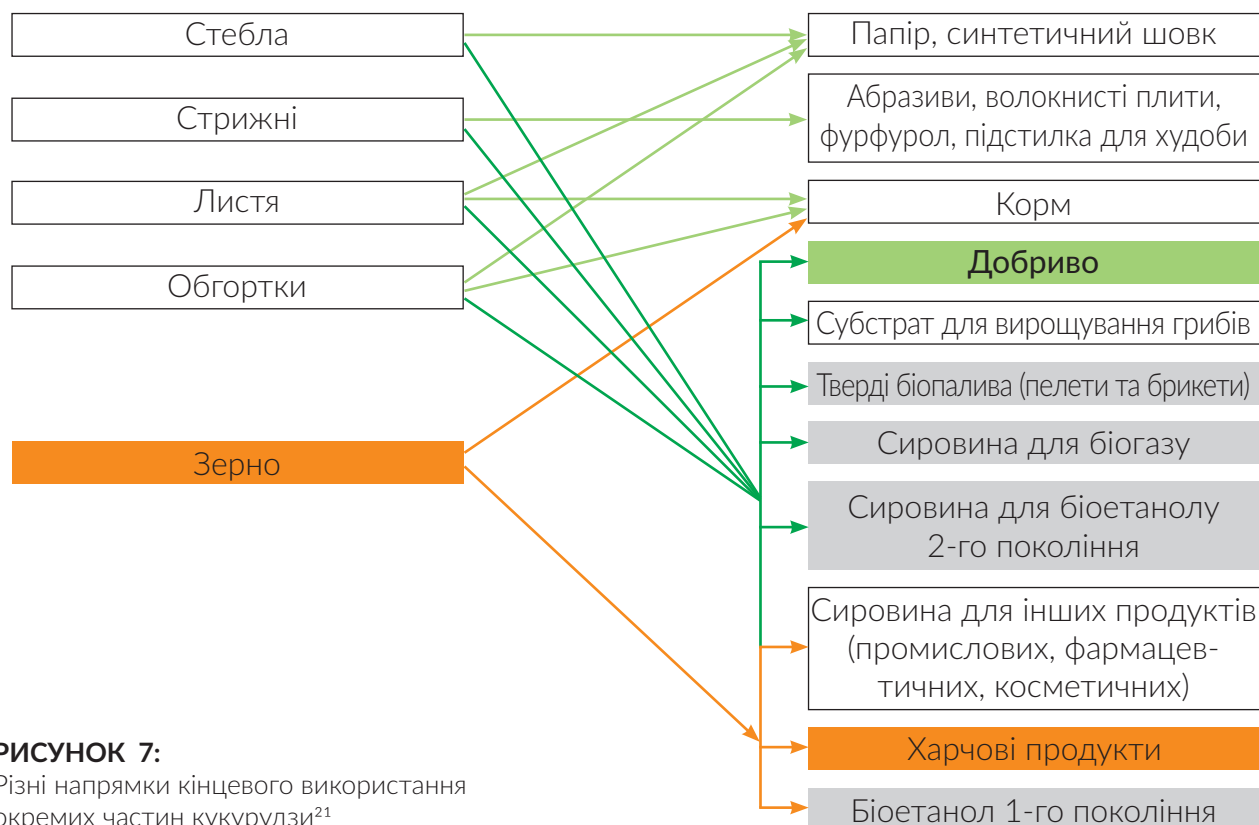


РИСУНОК 7:

Різні напрямки кінцевого використання окремих частин кукурудзи²¹



²¹ Position paper UABIO N 23 (2020) "Analysis of pellets and briquettes production from corn residues"
<https://uabio.org/wp-content/uploads/2018/05/position-paper-uabio-20-en.pdf>

ПАЛИВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕШТОК КУКУРУДЗИ

Загалом, рештки кукурудзи мають складні паливні властивості, які, однак, кращі, ніж у соломи зернових колосових. У будь-якому випадку, при виборі котла для спалювання решток кукурудзи слід враховувати фактичні паливні характеристики кукурудзиння, що постачається, та вимоги виробників котлів. Порівняння паливних характеристик решток кукурудзи з іншими сільськогосподарськими відходами та деревною тріскою наведено у таблиці 2.

ТАБЛИЦЯ 2:

Порівняння індикативних паливних характеристик фракцій кукурудзиння з іншими видами біомаси.

Параметри	Одиниці	Жовта солома ¹	Сіра солома ¹	Стрижні ²	Стебла кукурудзи ³	Деревна тріска ⁴
Вологість	%	10-20	10-20	12.5	10-18	40-50
Нижча теплотворна здатність	МДж/кг	14.4	15	15.2	15-17	10.4
Зольність	мас. %	4	3	2.2	5-6.5	1
Вуглець	мас. %	42	43	41.3	41	50
Водень	мас. %	5	5	5.2	5.1	6
Кисень	мас. %	37	38	38.8	38	38
Хлор	мас. %	0.75	0.2	0.14	0.13	0.02
Азот	мас. %	0.35	0.41	0.5	0.84	0.3
Сірка	мас. %	0.16	0.13	0.08	0.09	0.05
Калій (лужний метал)	мас. % сух.	1.03*	0.61**	0.48-1.02	0.61	0.14***
Температура деформації золи	°C	930*	905**	790-1200 (середнє значення 1033)	820-1160 (середнє значення 1070)	1270***

¹ Енергія з соломи. Технології, стратегії та інновації у Данії. Друге видання.

(http://agrobioheat.eu/wp-content/uploads/2020/11/AgroBioHeat_D7.6_Straw_to_energy_EN.pdf).

² Зведені дані з бази даних Phyllis (<https://phyllis.nl/>); Brunner et al., 2011²²; Brunner et al., 2021²³; Antonenko et al., 2018²⁴; AgroCycle. Characterisation of Agricultural Waste Co- and By-Products http://www.agrocycle.eu/files/2017/10/D1.2_AgroCycle.pdf.

³ Зведені дані з бази даних Phyllis (<https://phyllis.nl/>); Antonenko et al., 2018²⁴; AgroCycle. Characterisation of Agricultural Waste Co- and By-Products http://www.agrocycle.eu/files/2017/10/D1.2_AgroCycle.pdf

* Середнє значення для пшеничної соломи (Данія) з бази даних Phyllis (<https://phyllis.nl/>).

** Середнє значення для пшеничної соломи, яка була під атмосферним впливом (Данія), з бази даних Phyllis (<https://phyllis.nl/>).

*** Середнє значення для необробленої деревини з бази даних Phyllis (<https://phyllis.nl/>).

²² Brunner, T., Kanzian, W., Obernberger, I., & Theissl, A. (2011). Combustion properties of maize cobs – results from lab and pilot-scale tests. In *Proceedings of the 19th European Biomass Conference & Exhibition* (pp. 944-951).

²³ Brunner, T., Nowak, P., Mandl, C., Obernberger, I. (2021). Assessment of agrobiomass performance in state-of-the-art residential boilers. In *Proceedings of the 29th European Biomass Conference & Exhibition* (pp. 379-388).

²⁴ V.O. Antonenko, V.I. Zubenko, O.V. Epik Fuel properties of Ukrainian corn stover. DOI <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.11>

Елементарний склад решток кукурудзи майже такий же, як у соломи колосових зернових культур, тому вони мають порівнянну теплотворну здатність. Властивості кукурудзиння як і соломи сильно залежать від місця вирощування, часу збирання та погоди, ґрунту і добрив²⁵.

Зольність кукурудзиння є важливим фактором якості для подальшого виробництва біопалива. Вміст золи залежить від технології збирання, оскільки кількість золи збільшується при контакті біомаси з ґрунтом. Через це розрізняють два види золи: структурну і неструктурну²⁶. Структурна зола складається з неорганічних речовин, що містяться в біомасі рослин. Звичайна структурна зольність кукурудзиння становить 3,5%. Неструктурна зола – це неорганічна речовина (переважно ґрунт), яка потрапляє у біомасу під час збирання, зокрема при формуванні валків і тюкуванні. Типова загальна зольність при збиранні із використанням багаторазових проходів сільськогосподарських машин становить 8-10%.

Щодо плавлення золи, то деякі зразки решток кукурудзи ближчі до деревної біомаси, що забезпечує кращі умови для горіння порівняно з соломою зернових колосових культур. Для порівняння: температура деформації золи для деревини становить близько 1270 °С, а для качанів кукурудзи – 790-1200 °С, для стебел кукурудзи – 820-1160 °С (див. таблицю 2). Крім того, стебла кукурудзи містять менше хлору (0,13%), ніж свіжа («жовта») солома зернових колосових культур (0,75%). Це є позитивним фактором для решток кукурудзи як палива, оскільки сполуки хлору викликають корозію сталевих елементів енергетичного обладнання.

Вміст води має вирішальний вплив на теплотворну здатність решток кукурудзи. На рис. 8 наведена діаграма залежності нижчої теплотворної здатності від вологості кукурудзиння, що побудована за рівнянням (2.2) з довідника²⁷.

Для досягнення відносно низького вмісту води в побічних продуктах кукурудзи важливо вибрати відповідну стратегію збирання та логістики.

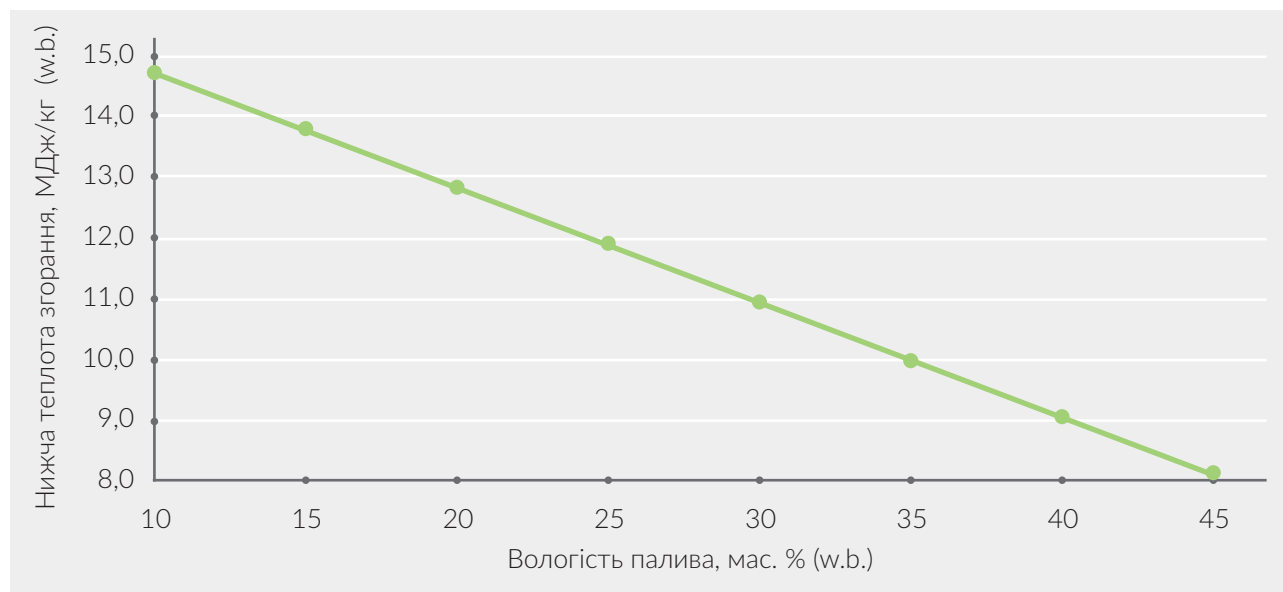


РИСУНОК 8:

Залежність нижчої теплоти згорання кукурудзиння від її вологості (w.b.)

²⁵ Vyll Varesa. Handbook for biofuel consumer // Tallinn: Tallinn Technology University, 2005 – 183 p.

²⁶ Brittany Schon, Matt Darr. Corn Stover Ash. <https://store.extension.iastate.edu/Product/Corn-Stover-Ash>

²⁷ Van Loo, S.; Koppejan, J. The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing; Earthscan: London, UK, 2008. – 465 p.

ЗАГОТІВЛЯ РЕШТОК КУКУРУДЗИ

ТЕХНОЛОГІЇ ЗБИРАННЯ ЗЕРНА КУКУРУДЗИ

Технологія збирання кукурудзи на зерно безпосередньо впливає на типи решток кукурудзи, які можуть бути отримані, та спосіб їх заготівлі. Існують три основні технологічні схеми збирання кукурудзи на зерно (рис. 9):

1. Збирання кукурудзозбиральними комбайнами з наступною доробкою качанів на стаціонарі:

1.1. з одночасним очищенням качанів від обгортки;

1.2. без очищення качанів від обгортки.

2. Збирання зернозбиральними комбайнами з кукурудзяними жатками.

3. Збирання комбайнами зерно-стрижневої суміші.

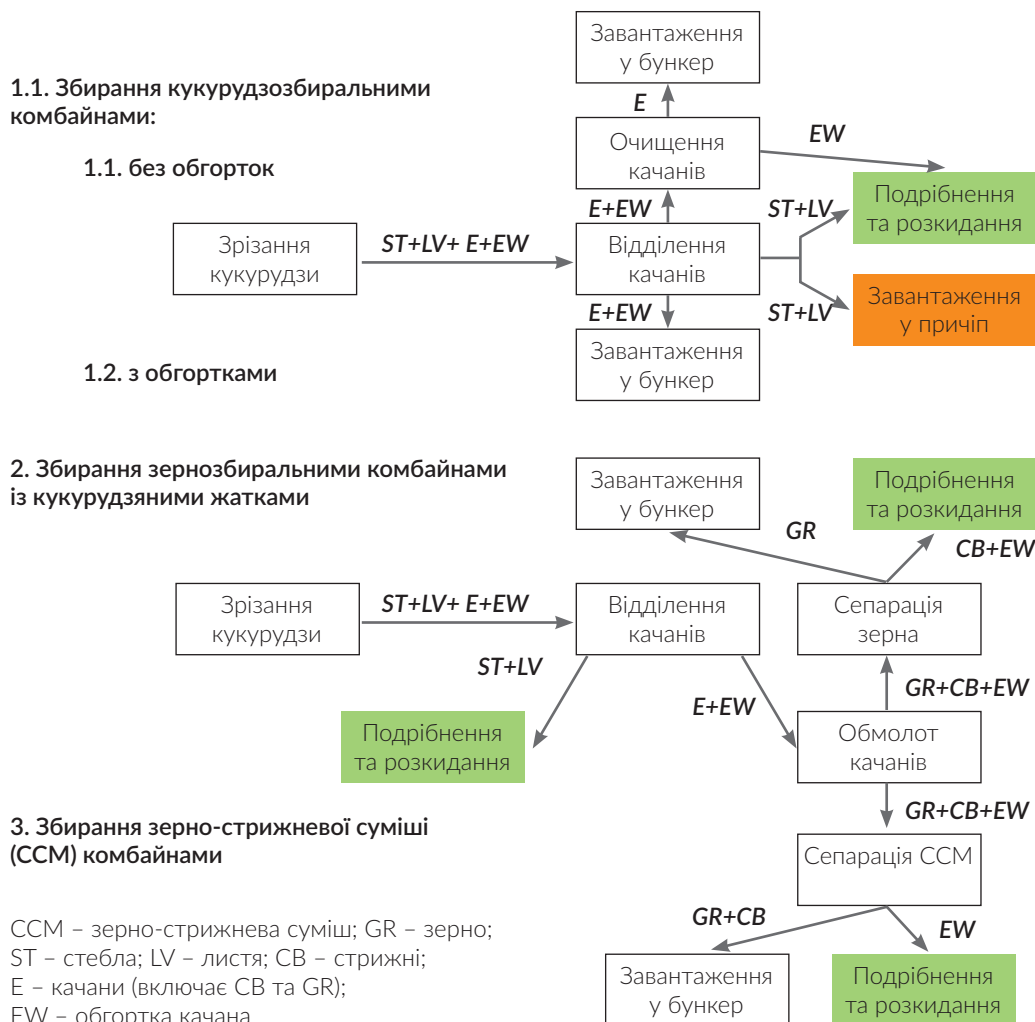


РИСУНОК 9:

Технології збирання кукурудзи на зерно із потоками решток кукурудзи²⁸

²⁸ UABio's Position Paper N 16 (2016) "Opportunities for harvesting by-products of grain corn for energy production in Ukraine" <http://uabio.org/img/files/docs/position-paper-uabio-16-en.pdf>



РИСУНОК 10:

Збирання кукурудзи зернозбиральним комбайном, обладнаним кукурудзяною жаткою.

Кукурудзу на зерно збирають при вологості зерна від 20 до 35-40%, а зерно-стрижневу суміш – 40-50%. Збирання врожаю культури без обмолоту качанів розпочинають при вологості зерна не більше 40%, а з обмолотом – при 30%. При більшій вологості погіршується обмолот, травмується зерно, знижується продуктивність комбайнів. Найбільш якісний обмолот відбувається при вологості зерна 20-22%²⁹.

У 80-90 роки минулого століття в Україні користувалася популярністю технологія збирання кукурудзи на зерно, що передбачала збирання всього біологічного врожаю за рахунок використання зернозбиральних комбайнів СК-5М, Єнісей-1200, Дон-1500 та КЗС-9-1 із спеціальними жатками виробництва заводу «Херсонмаш» ППК-4, КМД-6, ПЗКС-6, які спрямовували подрібнену побічну продукцію у причеп.

Нині основним способом збирання врожаю товарної кукурудзи є комбайновий обмолот качанів у полі, подрібнення і розкидання зрізаної маси при використанні зернозбиральних комбайнів з кукурудзяними жатками (рис. 10). Такий спосіб збирання кукурудзи є найбільш економічно доцільним. Він, порівняно із збиранням кукурудзи в качанах, забезпечує у 1,8-2 рази зменшення затрат праці та на 20-25% – витрати палива³⁰. Лише деякі господарства збирають кукурудзу в необмолочених качанах з наступним стаціонарним обмолотом, що дає можливість збору стрижнів. Це насінневі заводи, метою вирощування кукурудзи у яких є отримання (гібридного) насіння кукурудзи як посадкового матеріалу. Порівняно із ЄС, збирання зерно-стрижневої суміші в Україні поки що мало розповсюджене.

²⁹ V.D. Hrechkosii, M.D. Dmytryshak, R.V. Shatrov and other. Complex mechanization of grain production: Textbook // K: Ltd. "Nilan-Ltd", 2012 – 288 p.

³⁰ Cherenkov A.V., Tsykov V.S., Dziubetskyi B.V., Shevchenko M.S. et al. Intensification of corn technologies – a guarantee for yield stabilization at 90-100 m.c./ha level (practical recommendations) // Dnepropetrovsk: NU Institute of Steppe zone agriculture NAASU, 2012 – 31 p.

ТЕХНОЛОГІЇ ЗБИРАННЯ РЕШТОК КУКУРУДЗИ

При збиранні зернових комбайном, обладнаним кукурудзяною жаткою, рослинні рештки перерозподіляються таким чином (рис. 11): залишки стерні (10% маси зерна), залишки за кукурудзяною жат-

кою (96% маси зерна) і залишки позаду зернозбирального комбайна (24% маси зерна). Слід зазначити, що кукурудзяні жатки потребують значно більше потужності, ніж зернові. Як правило, це 7,5 кВт (10 к.с.) на рядок і додаткова потужність 2,3 кВт (3 к.с.) на рядок, необхідна для жатки, якщо встановлено насадки для подрібнення стебел³¹.



ST – стебла, LV – листя, EW – обгортка, CB – стрижень, M_{grain} – вага зерна

РИСУНОК 11:

Утворення решток кукурудзи після зернозбирального комбайна.

Пресування біомаси в тюки за рахунок ущільнення сировини більш ніж в 4 рази (від 40 кг/м³ до понад 160 кг/м³) сприяє підвищенню ефективності логістики та зменшенню необхідної площі сховищ. Технологічні схеми збирання залишків кукурудзи у тюках можна розділити на 4 основні типи:

1. Однопрохідна система збирання: до зернозбирального комбайна приєднується прес-підбирач, що дозволяє формувати тюки побічних продуктів кукурудзи одночасно з обмолотом зерна (рис. 12a).
2. Двопрохідна система: зернозбиральний комбайн із кукурудзяною жаткою, що утворює кукурудзяний валок, який потім пресується прес-підбирачем, агрегатованим із трактором (рис. 12b).
3. Трипрохідна система: зернозбиральний комбайн + трактор з мульчувачем для формування валків + трактор з прес-підбирачем великих прямокутних тюків (рулонів) (рис. 12c).

4. Багатопохідна система: зернозбиральний комбайн + трактор з мульчувачем + трактор з граблями + трактор з прес-підбирачем (рис. 12d).

Залежно від місцевих особливостей кукурудзиння, зібране багатопохідною системою, буде мати орієнтовну зольність від 8 до 12%, що в основному складається із домішок ґрунту, підбраного у процесі тюкування. При однопрохідному збиранні урожаю зольність решток кукурудзи менше 4%, тому що біомаса не контактує з ґрунтом поки не утвориться тюк (рис. 12a). Через додатковий потік біомаси однопрохідні комбайни втрачають продуктивність на збиранні кукурудзи. Комбайни, призначені для значних обсягів біомаси, знижують продуктивності на 30% при збиранні кукурудзиння обсягом 3,4 т/га³². Корпорація AGCO виробляє обладнання Challenger для однопрохідних систем збирання врожаю, що доступне на ринку деяких країн, включаючи США.

³¹ Corn: Chemistry and Technology, Third Edition. Edited by Sergio O. Serna-Saldivar Woodhead Publishing and AACC International Press, 2018. – 690 p.

³² J. Darr, K. Webster, A. Shah Machinery Innovations to Meet Industrial Biomass Harvesting Demands in Expanding United States Markets / Land.Technik AgEng 2013. Conference Proceedings, 2013. – 399-406 p.



а) Однопрохідна система: комбайн з прес-підбирачем



б) Комбайн з жаткою валкоутворювачем + трактор з прес-підбирачем



с) Комбайн + трактор з мульчувачем-валкоутворювачем + трактор з прес-підбирачем



д) Комбайн + трактор з мульчувачем + трактор з граблями + трактор з прес-підбирачем

РИСУНОК 12:

Технологічні схеми для збирання кукурудзиння³³.

Для ефективного збору та тюкування побічної продукції кукурудзи важливо зробити валок із решток кукурудзи. У двопрохідній системі використовується зернозбиральний комбайн зі спеціальною кукурудзяною жаткою, що формує валки з кукурудзяних решток (рис. 12b). Кукурудзяна жатка Geringhoff Mais Star Collect може подрібнювати та розкидати листя та стебла кукурудзи на полі або класти їх у валки. Поверх валків також можна додавати подрібнені качани та обгортки, які утворюються після подрібнювача комбайна. Компанія New Holland ви-

робляє пристрої Cornrower™ для формування валків, які можна приєднати до комбайна. Порівняльні польові випробування одно- та двопрохідного збирання кукурудзиння³⁴ показали, що продуктивність збирання зерна двопрохідними системами була на 9% нижчою, ніж у звичайних комбайнів. Крім того, при застосуванні цих двох технологій збирання агровиробникам доводиться інвестувати в спеціальне обладнання (система однопрохідного збирання або кукурудзяні жатки), що призводить до зниження продуктивності збирання зерна кукурудзи.

³³ Report on "Analysis of utilisation of corn straw as an energy source" (2018). Prepared by SEC Biomass for EBRD under the Contract C38842/1018/5362.

³⁴ K. J. Shinnars, R. G. Bennett, D. S. Hoffman Single- and two-pass corn grain and stover harvesting Transactions of the ASABE. 55(2): 341-350. (doi: 10.13031/2013.41372) @2012
<https://elibrary.asabe.org/login.asp?search=0&JID=3&AID=41372&CID=t2012&v=55&i=2&T=2>

Зазвичай у агровиробників відсутні необхідні ресурси для забезпечення заготівлі біомаси, оскільки вони націлені на виробництво зерна кукурудзи. Агровиробники, як правило, збирають зерно кукурудзи стандартними зернозбиральними комбайнами та кукурудзяними жатками, намагаючись не збільшити терміни збиральної кампанії. Для ефективного збирання решток кукурудзи краще залучати сервісну компанію, яка має спеціалізовану ефективну техніку та якісно збирає агробіомасу. Це може бути досягнуто в трьох- і багатопрхідних системах.

У трипрхідній системі для подрібнення і формування валків кукурудзиння використовується спеціальний мульчувач-валкоутворювач (рис. 12c). У цьому випадку зернозбиральний комбайн може підвищити свою продуктивність під час збирання зерна кукурудзи. Американська компанія Hiniker виробляє машини серії 5600 шириною 15, 20 і 30 футів для подрібнення і формування валків рослинних решток. Щоб забезпечити високу лінійну вагу мульчувача та зменшити кількість проходів техніки, Hiniker 5610 та 5620 з'єднують два проходи в одному валку. Подрібнювач шириною 30 футів необхідно приєднати до трактора з потужністю двигуна 200 к.с.

У багатоходовій системі використовується агрегований із трактором мульчувач для подрібнення решток кукурудзи, які на наступному етапі згрібаються граблями, приєднаними до трактора (рис. 9d). Для роботи зі стеблами кукурудзи граблі повинні бути оснащені більш міцними пальцями в порівнянні з граблями для сіна. Обсяги біомаси після мульчувача можна регулювати, змінюючи зазор між подрібнювальними ножами та землею. Також здійснюються регулювання граблів. Оскільки мульчувачі мають менше можливостей зачепити ґрунт, забруднення ґрунтом або рівень зольності кукурудзиння, отриманого за допомогою мульчувача-валкоутворювача, як правило, нижче, ніж у разі формування валка граблями³⁵.

Для запобігання втратам сухої речовини та погіршення якості біомаси, тюки необхідно швидко ви-

возити з поля та складати у штабелі для зберігання. Наприклад, самозавантажувальний причіп 16K Plus Bale Runner збирає за один прохід 12 великих тюків шириною 1,2 м, висотою 0,9 м і агрегується із трактором потужністю 180 к.с. У США також використовуються спеціальні самохідні штабелери. Машина Stinger Stacker 6500 має двигун потужністю 305 к.с., 6-ступінчасту автоматичну коробку перемикачів передач і протягом 1 години може підбирати, вивозити та складати в купу 80-120 великих прямокутних тюків.

З розглянутих технологій, трипрхідна система (рис. 12d) більш застосовна для європейських умов через можливість використання стандартної техніки, доступної для сільськогосподарських виробників, і меншого контакту біомаси з ґрунтом. На різних етапах збирального процесу можуть використовуватися різні моделі техніки. Деякі приклади такої техніки наведено на рис. 13. Додаткова інформація про техніку для збирання, логістики кукурудзи та її переробки в гранули/брикети включена в Додаток І.

ЛАНЦЮГ ПОСТАЧАННЯ КУКУРУДЗИННЯ DuPont

Приклад повного ланцюга постачання решток кукурудзи (тюкована біомаса) представлений на рис. 14. Цей ланцюжок поставок біомаси реалізовано і використано компанією DuPont (США) для забезпечення сировиною заводу з виробництва біоетанолу з лігноцелюлозної сировини. 30 жовтня 2015 року в місті Невада, штат Айова, було відкрито великий сучасний біопереробний завод Dupont. Потужність заводу становила понад 110 млн літрів біоетанолу з лігноцелюлозної сировини на рік. Кукурудзиння збирали місцеві фермери, інші роботи виконували працівники заводу. У 2018 році Verbio North America Corp. придбала DuPont Cellulosic Ethanol LLC в Неваді. Новий власник планує виробляти на об'єкті відновлюваний природний газ (RNG), але спочатку йому потрібно буде провести деяку технологічні зміни виробництва³⁶.

³⁵ Matt Darr *Industrial harvesting of corn stover as a biomass* (2012). *Proceedings of the Integrated Crop Management Conference*. 9. <https://lib.dr.iastate.edu/icm/2012/proceedings/9>

³⁶ <http://ethanolproducer.com/articles/15885/burgeoning-biomethane>



РИСУНОК 13:

Моделі сільськогосподарської техніки для збирання кукурудзиння.



РИСУНОК 14:

Схема ланцюга постачання кукурудзиння на завод із виробництва біоетанолу з лігноцелюлозної сировини DuPont³⁷.

³⁷ DuPont Nevada Site Cellulosic Ethanol Facility Feedstock Collection Program
http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/industrial-biotechnology/documents/IB-PDF-04-Feedstock_Collection_Program_2015.pdf

**РИСУНОК 15:**

Виробнича програма заводу біоетанолу з лігноцелюлозної сировини DuPont³⁸

Виробнича програма підприємства наведена на рис. 15. Завод DuPont оплачував виробникам дозвіл на збирання кукурудзиння та здійснював збирання, зберігання та транспортування біомаси. Агровиробники отримували кошти для покриття витрат за надання доступу до поля та для компенсації кількості поживних речовин, які були вилучені разом із побічними продуктами кукурудзи. Кукурудзиння збирали із 500 найближчих господарств. На заводі було 85 постійних робочих місць, а сезонним збиранням, транспортуванням і зберіганням сировини займалося 150 осіб.

За програмою заготівлі кукурудзиння компанія DuPont уклала контракти на збирання, зберігання та доставку кукурудзиння на завод виробництва біоетанолу з лігноцелюлозної сировини. Кваліфіковані агровиробники повинні були відповідати таким критеріям:

- розташовані в радіусі 48 км від Невади, штат Айова;
- кукурудза повинна вирощуватися за нульовою або консерваційною технологією обробки ґрунту;
- урожайність від 12,2 т/га;
- відносно рівні поля (з ухилом до 4%).

ТРАНСПОРТУВАННЯ ТЮКІВ КУКУРУДЗИННЯ

Також, як описано вище, систему збирання побічних продуктів кукурудзи у великі прямокутні тюки використовують й інші компанії. Після укладання тюків на оперативних складах поблизу полів їх слід транспортувати на основний (центральный) склад. Для вантажних робіт на складах використовуються фронтальні та телескопічні навантажувачі. Для перевезення з місцевого на центральний склад застосовують вантажівки з платформами напівпричепами. Таке обладнання традиційно використовується для логістичних операцій із тюками соломи та сіна. Але тюки із побічних продуктів кукурудзи, як правило, мають вищий вміст вологи, а отже, вони важчі порівняно з тюками із соломи зернових колосових культур та ріпаку, тому це слід врахувати при виборі машин для збирання та укладання тюків. Важливо правильно закріпити вантаж за допомогою стяжних або храпових ременів на бортових причепах або причепах без бортів³⁹. На стандартному 48-футовому напівпричепі США можна перевозити до 36 великих прямокутних тюків із середньою сухою масою 0,43 т. Щільність

³⁸ <http://www.dupont.com/products-and-services/industrial-biotechnology/advanced-biofuels/articles/nevada-cellulosic-ethanol-by-the-numbers.html>

³⁹ Justin McGill, Matt Darr *Transporting Biomass on Iowa Roadways*. PM 3051G (2014)
<https://store.extension.iastate.edu/product/Transporting-Biomass-on-Iowa-Roadways>

сухих тюків 196 кг/м³ має бути досягнута для забезпечення максимальної ефективності перевезення із використанням стандартних напівпричепів. Вантажі з біомаси повинні бути належним чином закріплені, щоб вони не зміщувалися під час транспортування.

ЗБИРАННЯ КУКУРУДЗИННЯ У РУЛОНАХ

Замість прес-підбирачів великих прямокутних тюків біомасу можна пресувати рулонними прес-підбирачами в рулони. Рулонні прес-підбирачі також дуже поширені для заготівлі біомаси і мають перевагу в простоті експлуатації та простішому технічному обслуговуванні⁴⁰. Для рулонних прес-підбирачів можна використовувати трактора з валом відбору потужністю до 75 к.с. Але для заготівлі біомаси у значних обсягах та забезпечення більшої продуктивності прес-підбирача рекомендується використовувати трактора потужністю від 120 к.с. Рулонні прес-підбирачі високої щільності з попереднім подрібнення можуть утворювати рулони щільністю 160 кг/м³. Великі прямокутні прес-підбирачі вимагають значно більшої потужності трактора, ніж рулонні. Зазвичай виробники великих

прямокутних прес-підбирачів зазначають у технічній документації, що для агрегаткування необхідно використовувати трактора з потужністю від 180 к.с. Якщо використовуються прес-підбирачі високої щільності, може знадобитися навіть додаткова потужність трактора. Такі прес-підбирачі можуть виготовляти тюки щільністю понад 184 кг/м³. Але в цілому рулонні прес-підбирачі менш продуктивні, ніж великі прямокутні прес-підбирачі. Враховуючи меншу об'ємну ефективність транспортування та зберігання, логістичні операції рулонів складніші та дорожчі у порівнянні з прямокутними тюками.

ЗБИРАННЯ ПОДРІБНЕНОГО КУКУРУДЗИННЯ

Крім технологій збирання побічної продукції кукурудзи на зерно у прямокутних тюках, також цю біомасу можна пресувати у рулони, використовуючи рулонні прес-підбирачі замість прес-підбирачів прямокутних тюків, або збирати у подрібненому вигляді як суміш різних фракцій рослинних залишків, так і окремі з них, наприклад, стрижні. На рис. 16 зображена технологічна схема збирання кукурудзиння у подрібненому вигляді з використанням кормозби-



а) Система на базі кормозбирального комбайна: зернозбиральний комбайн + трактор з мульчувачем-валкоутворювачем + кормозбиральний комбайн + трактор з причепом



б) Система на базі кормозбирального причепа-підбирача: зернозбиральний комбайн + трактор з мульчувачем-валкоутворювачем + трактор з кормозбиральним причепом-підбирачем

РИСУНОК 16:

Ланцюжки заготівлі кукурудзиння у подрібненому вигляді

⁴⁰ Matt Darr, Keith Webster Corn Stover Harvesting Machinery. PM3051A (2014)

<https://store.extension.iastate.edu/product/Corn-Stover-Harvesting-Machinery>

⁴¹ Monika Fleschhut, Kurt-Jurgen Hulsbergen, Stefan Thurner, Joachim Eder Analysis of different corn stover harvest systems / LANDTECHNIK, 71 (6), 2016. – 252-270 p.

рального комбайна або кормозбирального причепа-підбирача, які застосовуються також для збирання силосу. Згідно результатів польових досліджень у Баварському державному науково-дослідному центрі сільського господарства у 2014-2015 рр., вміст золи у кукурудзинні був на рівні $7,0 \pm 1,9\%$ у с.р. для кормозбирального комбайна та $6,9 \pm 2,0\%$ у с.р. для кормозбирального причепа-підбирача⁴¹.

СИСТЕМИ ЗБИРАННЯ СТРИЖНІВ КАЧАНІВ

Іншим варіантом заготівлі побічної продукції кукурудзи є збирання частини залишків після обмолоту зерна комбайном. У 2018 р. дослідники італійської компанії CREA-IT (Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e l'Analisi dell'Economia Agraria) провели польові випробування в рамках проекту BECOOL для оцінки ефективності інноваційної механізованої системи збору стрижнів качанів, яка називається Harcob⁴² (рис. 17а). Використовуючи комбайн із системою Harcob, вдалося зібрати в середньому 2 т/га стрижнів, продуктивність за збіраною біома-

сою – 4,1 т/год⁴³. Компанія Vermeer випускає збирач стрижнів CCX770 (рис. 17б), який доступний на ринку сільськогосподарської техніки⁴⁴. Збирач стрижнів Vermeer CCX770 – це причіпна машина, яка приєднується до зернозбирального комбайна. Цей технічний засіб дозволяє агровиробникам за один прохід збирати зерно кукурудзи та окремо – стрижні.

В Україні деякі аграрії регулюють систему сепарації зернозбиральних комбайнів, щоб зменшити відокремлення зерна кукурудзи від качанів. Таким чином зерно з качанами передається в зерновий бункер. Потім цю суміш відокремлюють на стаціонарних сепараційних установках, а качани використовують як біомасу для сушіння кукурудзи у зерносушарках. Описана технологія базується на існуючій техніці і не потребує капітальних витрат на додаткове обладнання. Але такий підхід використовується лише для покриття власних потреб агровиробників і не застосовується для масштабного збирання цього виду біомаси для біоенергетичного сектору.



а)



б)

РИСУНОК 17:

Збирачі стрижнів: а) система Harcob; б) Vermeer CCX770.

ЗБЕРІГАННЯ КУКУРУДЗИННЯ

Побічну продукцію кукурудзи на зерно слід зберігати в умовах запобігання її надмірного зволоження під впливом опадів та підмочування з землі, уникаючи гниття та забезпечуючи необхідний протипожежний захист. Вибір типу сховища зале-

жить від місця розташування складу та місцевих умов. Кукурудзиння можна зберігати просто неба, під накриттям, у закритому складі або у сховищі в анаеробних умовах (без доступу кисню)⁴⁵. При виборі відповідних систем зберігання слід враховувати декілька факторів: стабільність сировини під час зберігання, вартість складської інфраструк-

⁴² <https://www.becoolproject.eu/2018/10/22/recovering-maize-cob-converting-untapped-biomass-resource-into-valuable-feed-stock/>

⁴³ <http://www.etaflorence.it/proceedings/?detail=15215>

⁴⁴ https://www.vermeer.com/NA/en/N/equipment/cob_harvester

⁴⁵ Matt Darr, Ajay Shah, Kevin Peyton, Keith Webster Corn Stover Storage Methods <https://store.extension.iastate.edu/product/14077>



РИСУНОК 18:

Зберігання тюків кукурудзиння під відкритим небом у Іспанії

тури, доступність сировини протягом усього терміну зберігання, інтеграція складу з переробним заводом. На складах важливо забезпечити вільний доступ вантажної техніки до біомаси.

Зберігання біомаси у закритих складах дає багато переваг порівняно з іншими системами. Однак через відносно низьку щільність кукурудзиння, включаючи тюки, та високі капітальні витрати на будівництво нових складів, їх використання в основному є економічно недоцільним. Хоча, якщо стейкхолдер має існуючі складські приміщення, він може використовувати їх і для зберігання біомаси.

Зберігання кукурудзиння просто неба може використовуватися для тимчасових складів, коли верхній шар біомаси служить накриттям (рис. 18). Крім того, такий спосіб може застосовуватися у деяких регіонах і для центрального складу, але потрібно

робити це дуже обережно через можливі значні втрати сухої речовини у біомасі.

Анаеробне зберігання, або силосування, дуже поширений метод зберігання вологих кормів у тваринництві. Такий спосіб економічно вигідний для сировини з високим вмістом води, особливо для зберігання тюків раннього сезону збирання або у надзвичайно вологі сезони⁴⁵.

Зберігання побічної продукції кукурудзи на зерно під накриттям забезпечує оптимальний баланс витрат і збереження якості. Гнучкий накривний матеріал – агроволокно – може використовуватися для захисту від дощу та снігу. Цей матеріал дає можливість виходити повітрю на поверхню, що запобігає утворенню грибка та цвілі всередині біомаси. Агроволокно застосовується й для сушіння тріски. Використовувати агроволокно можливо понад 5 років⁴⁶.

⁴⁵ Matt Darr, Ajay Shah, Kevin Peyton, Keith Webster Corn Stover Storage Methods <https://store.extension.iastate.edu/product/14077>

⁴⁶ <http://zavod-kobzarenko.derevo.ua/catalog/details/6019>

Склади кукурудзиння повинні відповідати вимогам Правил пожежної безпеки. Наприклад, в Україні⁴⁷ площа одного штабеля пресованої соломи не повинна перевищувати 500 м², а площа основи однієї скирти не повинна перевищувати 300 м². Скирти, штабелі дозволяється розташовувати попарно, при цьому розриви між скиртами, штабелями в одній парі мають бути не менше 6 м, а між сусідніми парами – не менше 30 м.

УЩІЛЬНЕННЯ РЕШТОК КУКУРУДЗИ

Подальша переробка побічних продуктів кукурудзи у паливні брикети та гранули підвищує додану вартість біомаси. Паливні брикети, вироблені з біомаси, являють собою спресовані матеріали циліндричної, прямокутної або будь-якої іншої форми з поперечним розміром не менше 25 мм і довжиною 100-400 мм. Типовий діаметр – 60-75 мм, а довжина брикетів зазвичай не перевищує 5 величин діаметру. Стандартних розмірів у даного виду продукту немає. Паливні брикети характеризуються різноманітністю форм, але загалом, виділяють три типи – NESTRO, RUF та Pini&Kay (ці назви походять від назв фірм, які виробляють найбільш популярні преси для отримання даних типів брикетів). Типовий процес виробництва брикетів з біомаси включає сім етапів: одержання сировини, подрібнення, калібрування, сушка, пресування сировини в брикети (брикетування), охолодження та пакування брикетів. Отримання міцного брикету з подрібненої рослинної маси забезпечується як фізико-механічними властивостями матеріалу, так і умовами самого процесу брикетування. При цьому необхідно досягти показників визначеного рівня якості, які включають щільність брикету (0,8-1,3 т/м³), вологість, розміри (діаметр, довжина), утримання форми. Щільність є основним фактором, що визначає механічну міцність і водостійкість брикету. Важливою перевагою брикетів як палива є постійна температура під час горіння протягом кількох годин. Брикети з біомаси можна спалювати в побутових котлах і малих котлах на твердому паливі з ручним завантаженням (до ~100-150 кВт), які часто вже є в господарствах населення, бюджетних установах або установах соціальної сфери. На ринку також є автоматизовані котли з бункерами (до ~240 кВт), призначені для брикетів з біомаси. Брикети меншої щільності (тобто «м'які» за рахунок пресування

більш вологої сировини) можна використовувати у великих котлах із шнековою подачею. Очікується, що шнек, виготовлений з міцного металу, зможе подрібнювати брикети та забезпечувати їх безперебійну подачу в топку.

Для збільшення ефективності логістичних операцій та розширення можливості енергетичного використання сільськогосподарську біомасу гранулюють для отримання паливних гранул (пелет). Пелети із кукурудзиння відносяться до недревних пелет, а технологічний процес їх виробництва загалом схожий на брикетування біомаси, що також відповідає характеристикам сировини. Недревні пелети – це ущільнене шляхом механічного пресування біопаливо, виготовлене з дробленої або подрібненої біомаси з добавками або без них, що має форму циліндра з поламаними кінцями, як правило, діаметром менше 25 мм, різної довжини в межах 3,15-40 мм⁴⁸. Основними характеристиками, що впливають на організацію виробничого процесу гранулювання, є вхідні показники біомаси (розмір частинок, форма, наявність включень), а також вміст вологи. При переробці післяжнивних решток, лушпиння соняшнику, очерету тощо можна використовувати типову схему, розроблену для виробництва пелет з соломи.

Підсумовуючи, можна зазначити, що для збирання побічних продуктів кукурудзи можна застосувати різні технології, які базуються на використанні різноманітних машин. Для великомасштабного збирання доцільно використовувати спеціальну високопродуктивну техніку, у т. ч. мульчувачі-валкоутворювачі для подрібнення біомаси, прес-підбирачі, причепи тощо. Малі обсяги кукурудзиння можна збирати вже наявною технікою. Важливо зменшити забруднення біомаси ґрунтом та запобігти високому вмісту вологи в побічних продуктах кукурудзи. Основні складові витрат на зберігання побічної продукції кукурудзи під накриттям: орендна плата за землю, витрати на підготовку складського майданчику, вартість агроволокна та інших матеріалів, витрати на вантажні операції, витрати на охорону й витрати, пов'язані з втратами сухої речовини у сировині. Переробка кукурудзиння у паливні брикети та пелети підвищує енергетичну щільність біомаси, що особливо важливо при транспортуванні біомаси на великі відстані.

⁴⁷ <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0313-07>

⁴⁸ ISO 17225-6:2014 Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 6: Graded non-woody pellets

ВИРОБНИЦТВО ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ З РЕШТОК КУКУРУДЗИ

ВИРОБНИЦТВО ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ З КУКУРУДЗИННЯ

Рештки кукурудзи, як і інші рослинні рештки, традиційно використовувалися для опалення приміщень у сільській місцевості з холодною зимою, особливо на територіях з нестачею лісів. Наприклад, в Україні у південних селах Одеської області десятиліттями застосовується практика, коли мешканці сіл орендують у сільгосп підприємств чи фермерів ділянки полів кукурудзи. Раніше такі ділянки обробляли та збирали з них кукурудзиння вручну, а нині використовують техніку, зокрема прес-підбирачі для решток кукурудзи. Зібрані рештки кукурудзи зберігають біля своїх приватних будинків (рис. 19). У холодну пору рештки кукурудзи використовують як корм для худоби і біомасу для опалення. Спалюють кукурудзиння у традиційних печах, використання яких останніми роками зменшується.

Подрібнене кукурудзиння через його низьку щільність обумовлює труднощі у використанні для невеликого побутового опалення. Також, може бути

проблемою поводження із великими тюками. У цьому випадку виробництво брикетів і пелет з такої біомаси може стати варіантом для сучасних котлів. Проте наразі в Україні та Європі не розгорнуто широке виробництво твердого біопалива із решток кукурудзи. Є лише кілька прикладів теплогенераторів на тюках кукурудзи, які використовуються для обігріву та сушіння зерна. Основною причиною цього є проблема заготівлі біомаси під час дощової погоди та забруднення її ґрунтом при формуванні валків.

Як зазначалося вище, рештки кукурудзи можна вважати кращою біомасою для спалювання порівняно з соломою зернових колосових, але паливні характеристики агробіомаси залежать від багатьох місцевих умов та методів збирання. У будь-якому випадку, котли повинні бути пристосовані для спалювання кукурудзиння. Це може бути як модернізований котел для спалювання деревної біомаси, так і спеціально розроблений котел. Загалом, котли для спалювання соломи зернових можна вважати придатними і для спалювання кукурудзиння за умови, що воно має відповідний для згоряння вміст вологи.



РИСУНОК 19:

Прямокутні тюки кукурудзиння в селі Криничне.

Також можна використовувати теплотехнічні системи для спалювання сумішей видів біомаси, наприклад, деревини з рештками кукурудзи.

У статтях^{49, 50} описані дослідження спалювання невеликих тюків кукурудзиння в котлі потужністю 146 кВт без модифікацій з подвійною камерою згоряння, призначеному для деревних полін, та спалювання рулонів кукурудзиння в котлі на біомасі з періодичним завантаженням Farm 2000 номінальною потужністю 176 кВт. Обидва котли показали хороший потенціал для виробництва тепла з використанням тюків кукурудзиння, але ці котли потребували вдосконалення для більш ефективного спалювання. Так, у котлі 146 кВт малі тюки кукурудзиння утворювали в середньому 7,5% золи, що включало близько 2% незгорілих залишків, а деревина – 1,7% золи. Викиди димових газів становили в середньому 1324 мг/м³ CO та 99,1 мг/м³ NOx для кукурудзиння (118 мг/м³ CO та 50,6 мг/м³ NOx для деревини). Загальна ефективність теплопередачі для кукурудзиння була нижчою, ніж для дров (57% проти 77%). А в котлі на біомасі з періодичним завантаженням палива середні викиди від кукурудзиння складали 2725 мг/м³ CO, 9,8 мг/м³ NOx і 2,1 мг/м³ SO₂, які були нижчими щодо NOx і SO₂ та вищими щодо CO, ніж викиди з пшеничної соломи (2210 мг/м³ CO, 40,4 мг/м³ NOx і 3,7 мг/м³ SO₂).

Слід зазначити, що в обох котлах використовувалися системи спалювання з нерухомими колосниками, які часто демонструють низький ККД і високі викиди незгорілих забруднюючих речовин при спалюванні агробіомаси з високим вмістом золи. Системи з рухомими колосниковими рештками можуть досягти більшої швидкості та ефективності згоряння у порівнянні із стаціонарними рештками, оскільки тверде паливо рухається через колосникову рештку від впускної секції до секції відведення золи, що дозволяє краще змішувати повітря і паливо та полегшує розподіл вуглецю, який потім горить швидше⁵¹.

Інтерес до використання кукурудзиння для опалення можна виявити на територіях, які мають намір відмовитися від вугілля та володіють значним потенціалом цього ресурсу біомаси. У Греції му-

ніципальна тепlopостачальна компанія Амінтайо (DETEPA) у Західній Македонії восени 2020 р. урочисто відкрила нову опалювальну установку на біомасі (2×15 МВт) для заміни тепла, що постачається від електростанції, яка працює на бурому вугіллі. У перший рік роботи котельня більше покладалася на біомасу, яку можна було отримати від існуючих виробників (деревна тріска та гранули з лушпиння соняшнику). Наразі DETEPA дуже зацікавлена в розвитку місцевих ланцюгів постачання агробіомаси, маючи на меті закупити близько 5000 т кукурудзиння та обрізок виноградників в опалювальний сезон 2021-2022 рр.⁵² В Китаї існує величезний потенціал сільськогосподарських відходів, включаючи рештки кукурудзи. Компанія Great Resources розробила різні проєкти для енергетичного використання решток кукурудзи – від зерносушильних установок на брикетах кукурудзиння до установок, що виробляють з кукурудзиння різні енергоносії (холод, тепло, пару, електроенергію) та добрива⁵³.

ВИРОБНИЦТВО ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ЗІ СТРИЖНІВ

На перший погляд, паливні властивості стрижнів качанів кукурудзи виглядають досить перспективними через менший вміст золи та азоту в порівнянні з багатьма іншими видами палива з агробіомаси. Основною проблемою при спалюванні стрижнів є високий вміст калію, що знижує температуру плавлення золи. На колосниковій рештці котла можуть утворюватися розплавлені шлаки, що перекривають проходи повітря. Крім того, відкладення золи на теплообмінних поверхнях утворюють теплоізоляційний шар і можуть призвести до значних втрат ефективності через зниження тепловіддачі. Нарешті, стрижні зазвичай мають високий вміст хлору, який у поєднанні з калієм та іншими сполуками може призвести до утворення корозійних речовин.

Результати спалювання стрижнів кукурудзи в Австрії в лабораторному реакторі та експериментальній установці з колосниковою решткою описані в статті²². Енергетична щільність стрижнів становить 518 кВт·год/м³ (близько 55% енергетичної щільності тріски при порівнянні вологості). Через

⁴⁹ R.Morissette, P.Savoie, J.Villeneuve Combustion of Corn Stover Bales in a Small 146-kW Boiler // *Energies*, 2011, 4. – 1102-1111 p.

⁵⁰ R.Morissette, P. Savoie, J. Villeneuve. Corn Stover and Wheat Straw Combustion in a 176-kW Boiler Adapted for Round Bales // *Energies*, 2013, 6. – 5760-5774 p.

⁵¹ https://agrobioheat.eu/wp-content/uploads/2020/10/AgroBioHeat_D4.2_agrobiomass-fuels-and-utilization-systems_v1.0.pdf

⁵² www.ot.gr/2021/10/05/english-edition/kozani-green-heating-from-corn-and-vine-residues/

⁵³ Hong Hao Unlock the huge potential of agro residue. Presentation. 9.12.2021

<https://www.worldbioenergy.org/news/574/50/WBA-Webinar-1-Agricultural-residues-to-energy/>

більший вміст N у стрижнях порівняно з хімічно необробленою деревною тріскою слід очікувати збільшення викидів NOx. Під час експериментальних випробувань спалювальна установка працювала на 70-85% від номінальної потужності котла (350 кВт·год.). Спостерігалось утворення дрібних шматочків шлаку в подовій золі, що в основному пов'язано з утворенням збагачених K та Na силікатів з температурами плавлення близько 1050 °C. Щодо газоподібних викидів, можна стверджувати, що при викидах CO та O₂, відповідно, у середньому 15,6 мг/Нм³ та 1,3 мг/Нм³ (сухий димовий газ, 13 об. % O₂) можна досягти дуже хорошого вигорання газової фази. Середні викиди NOx становили 247 мг/Нм³, але подальший потенціал скорочення викидів NOx приблизно на 30% може бути досягнутий лише за рахунок оптимізованого застосування первинних заходів. Як вже очікувалося за результатами аналізу хімічного складу вологого палива, підвищені викиди HCl і SOx мали бути отримані в середньому на рівні 34 мг/Нм³ та 30 мг/Нм³, відповідно. У загальних викидах твердих частинок (за течією мультициклону) явно переважали викиди дрібних частинок, які в середньому становили 91 мг/Нм³. Отже, особливо для більш потужних установок, для контролю викидів дрібних частинок необхідно встановити рукавний або електростатичний фільтр. Аналіз подової золи та циклонної летючої золи показав, що цикл відповідних поживних речовин для рослин (крім N) можна майже замкнути шляхом переробки у добрива подової золи або суміші подової і циклонної летючої золи для подальшого внесення на поля кукурудзи. Потенційний вплив високого вмісту калію у

стрижнях кукурудзи було продемонстровано в серії випробувань, проведених в рамках проекту AgroBioHeat²³. Дві найсучасніші системи згоряння (котел з рухомою решіткою в поєднанні з електростатичним фільтром (ESP) для контролю твердих частинок і котел з інноваційною концепцією максимальної кількості стадій подачі повітря) придатні для опалювання житлових приміщень із застосуванням різноманітних видів палива з агробіомаси (оливкові кісточки, гранули з лушпиння соняшнику, міскантус, тополя, агропелети та стрижні кукурудзи). Випробувані стрижні кукурудзи показали особливо високий вміст калію (понад 1 % мас.), що призвело до винятково високих викидів твердих частинок порівняно з іншими випробуваними паливами з агробіомаси, а також до підвищення температури димових газів і відповідних втрат ККД.

З особливостями спалювання стрижнів кукурудзи можна впоратися в установках середньої потужності, використовуючи відповідні технології та ноу-хау. Французький виробник котлів Compte-R з 2012 р. розробив кілька таких котлів на стрижнях кукурудзи. Основними характеристиками цих систем є використання колосникових решіток з водяним охолодженням, які підтримують температуру нижче 850 °C, відповідний дизайн і конструкція камери згоряння та поверхні теплообмінника з метою зниження температури димових газів на вході в трубні дошки нижче 650 °C, а також використання відповідних систем очищення димових газів, щоб уникнути викиду дрібних частинок в атмосферу⁵⁴. Котли для стрижнів кукурудзи Compte-R встановлюють на підприємствах з переробки зерна, а також на теплоцентралях.

МЕРЕЖА ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ Eco2Wacken у Страсбурзі⁵⁵

З 2016 року кілька ключових будівель району Вакен у Страсбургу забезпечуються теплом від котельні з двома котлами Compte-R потужністю 3,2 МВт на дровах і 2 МВт стрижнях кукурудзи. Мережа Eco2Wacken забезпечує 30 ГВт·год теплової енергії на рік і використовує 8 тис. т тріски та 3 тис. т стрижнів кукурудзи на рік із середнім ККД 87 %. Паливо доставляється вантажівками (менше трьох доставок на добу) і розвантажуються у двох окремих зонах. Сховище для деревини має місткість 300 м³, чого вистачає на чотири дні ро-

боти, а сховище для качанів кукурудзи має силос на 180 м³, що гарантує два дні роботи. Стрижні закуповуються у сусідньої сільськогосподарської компанії; зола, отримана після їх згоряння, багата калієм і повертається на поля як добриво. Рукавні фільтри використовуються для підтримки викидів пилу на дуже низьких рівнях (нижче 10 мг/Нм³). Резервне забезпечення здійснюється двома газовими котлами потужністю 6 МВт, а бак для гарячої води об'ємом 95 м³ забезпечує можливість зберігання теплової енергії. Підраховано, що завдяки роботі цієї системи централізованого тепlopостачання щорічно вдається уникнути понад 7000 т викидів CO₂.

⁵⁴ <https://www.bioenergie-promotion.fr/51630/compte-r-confirme-son-expertise-en-combustion-des-agrocombustibles-solides/>

⁵⁵ <https://www.bioenergie-promotion.fr/51570/bois-rafle-de-mais-pour-la-chaufferie-eco2wacken-de-strasbourg/>

ВИРОБНИЦТВО ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ З РЕШТОК КУКУРУДЗИ

Рештки кукурудзи можуть використовуватися на ТЕЦ і теплових електростанціях (ТЕС), які працюють на соломі. У деяких випадках кукурудзиння можна застосовувати як додаткову біомасу для сумісного спалювання з деревиною. Типова біомасова електростанція використовує пряме спалювання біомаси в котлі для виробництва пари високого тиску, яка приводить в рух турбіну і виробляє електроенергію. ТЕЦ забезпечує одночасне виробництво електричної та теплової енергії.

Багато проектів електростанцій для використання решток кукурудзи як палива розроблено DP CleanTech. У 2007 році компанія повністю впровадила сучасну електростанцію на соломі Ляоюань потужністю 30 МВт в китайській провінції Цзілінь. Електростанція працює на місцевому біопаливі, в основному з сільськогосподарських відходів, таких як солома кукурудзи (кукурудзиння). Соломо-спалювальний котел спроектований для роботи з твердим паливом, таким як деревна тріска, що може подаватися через допоміжний силос в обсязі до 35% загального споживання палива. Установка споживає понад 160 тис. т соломи на рік і працює 7800 год/рік. Паровий котел на соломі виробляє пару тиском 92 бар і температурою 540 °С, що призводить до загального ККД установки понад 32% і ККД котла понад 93%. Солома подається в котел системою паливоподачі і спалюється на вібраційній колосниковій решітці з водяним охолодженням у ретельно контрольованих умовах; вібраційні рухи регулюють стадії горіння⁵⁶.

Електростанція на біомасі Міахадас потужністю 15 МВт_е в Іспанії (рис. 20, 21) працює з 2010 р. і споживає 110 000 т/рік трав'янистої (солома, кукурудзиння) та деревної біомаси (біомаса від обрізки багаторічних сільськогосподарських насаджень і відходи лісового господарства). ТЕС було

розроблено як науково-дослідний проєкт спільно з компаніями та технологічними центрами в Іспанії, Фінляндії та Данії за підтримки 7-ї Рамкової програми ЄС. Оператор – Acciona Energia. Середньорічне виробництво електроенергії становить 128 ГВт·год, що еквівалентно потребі в електроенергії 40 000 будинків. При цьому вдається досягнути скорочення 123 тис. т/рік викидів CO₂⁵⁷. На електростанції використовується паровий котел з вібраційною решіткою і паропроодуктивністю 71 т/год, цикл Ренкіна без регенерації та система подвійної подачі тюків і тріски⁵⁸.

Данська компанія Babcock & Wilcox Vølund забезпечила постачання технології на енергетичну установку на біомасі, що працює на паперовій фабриці Bulleh Shah Packaging Limited в Пакистані⁶⁰. Установка може використовувати різні сільськогосподарські відходи (пшеничну соломку, кукурудзиння, стебла рису, бавовняні стебла та ін.) від місцевих фермерів для виробництва пари з продуктивністю 150 т/год. Номінальна витрата палива 37,7 т/год. Для ефективного спалювання біомаси котел оснащений вібраційною решіткою B&W Vølund з водяним охолодженням. Зола, отримана з цього котла, віддається безкоштовно. Вона може використовуватися як добриво для вирощування сільськогосподарських культур, як сировина для виготовлення цегли і як альтернатива піску під час кріплення плитки для підлоги⁶¹.

Додаткову інформацію про теплоелектростанції на соломі можна знайти в посібнику AgroBioHeat «Енергія з соломи. Технології, стратегії та інновації у Данії. Друге видання» (http://agrobioheat.eu/wp-content/uploads/2021/02/AgroBioHeat_D7.6_%D0%95%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D1%96%D1%8F_%D0%B7_%D1%81%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%BC%D0%B8e_UK_web.pdf).

⁵⁶ <https://www.dpcleantech.com/waste-and-biomass-clean-energy-technologies/combustion-technology/dp-wcv-grate/download/994/30/22>

⁵⁷ https://www.acciona.com/projects/miajadas-biomass-plant/?_adin=01010174103

⁵⁸ http://ghesa.com/en/portfolio_page/miajadas/

⁵⁹ https://www.acciona-energia.com/es/areas-de-actividad/?_adin=0744759730

⁶⁰ <https://www.babcock.com/-/media/documents/case-profiles/renewables/pch201-130-packages.ashx?la=ru-ru&hash=-F11E957E430907C7A937EE06E6AA6FAA852EB0A2>

⁶¹ <https://www.packages.com.pk/wp-content/uploads/2020/09/Packages-Group-Sustainability-Report-2019.pdf>



РИСУНОК 20:
ТЕС на біомасі Міахадас 15 МВт



РИСУНОК 21:
Тюки кукурудзиння на складі ТЕС Міахадас⁵⁹

ВИРОБНИЦТВО БІОЕТАНОЛУ З РЕШТОК КУКУРУДЗИ

Кукурудза – важлива сировина для виробництва біоетанолу. Згідно зі звітами Європейської асоціації відновлюваного етанолу (ePURE), європейська біоетанольна промисловість продовжує розвиватися. У 2020 році встановлена виробнича потужність (ЄС-27 + Великобританія) складала 9992 млн л, тоді як у 2019 році вона становила 9893 млн л. Члени ePURE в 2020 р. переробили у біоетанол 6,67 млн т кукурудзи, що забезпечило виробництво 49,5% від загального обсягу біоетанолу (відповідно, 6,56 млн т і 48,6% у 2019 р.). Це свідчить про важливість кукурудзи як сировини у виробництві біоетанолу першого покоління в ЄС⁶².

Очікується, що рештки кукурудзи також стануть вагомою сировиною для біоетанолу другого покоління, який є сучасним біопаливом з лігноцелюлозної біомаси. Внесок сучасного біопалива та біогазу, виробленого із сировини, переліченої в частині А Додатку IX Директиви RED II, як частка кінцевого споживання енергії в транспортному секторі, має становити щонайменше 0,2 % у 2022 р., 1 % у

2025 р., і 3,5 % у 2030 р. Слід зазначити, що сучасні біопалива з цієї сировини можна зараховувати удвічі більше за їх енергетичний вміст у національний внесок ВДЕ.

Для виробництва біоетанолу із решток кукурудзи необхідна стадія попередньої обробки сировини для руйнування її лігноцелюлозної структури, що полегшує доступ ферментів до ланцюгів целюлози або сприяє використанню їх лігноцелюлозних фракцій. Типова схема виробництва біоетанолу з лігноцелюлозної сировини наведена на рис. 22. З однієї тони сухої маси кукурудзиння потенційний вихід етанолу становить 428 л. За даними заводу з виробництва біоетанолу з лігноцелюлозної сировини DuPont Nevada, з 1 т зібраного кукурудзиння можна отримати 283,5 л біоетанолу (див. рис. 15). Крім того, кукурудза з полів може бути джерелом зерна для виробництва біоетанолу першого покоління. Загалом, з гектара кукурудзи можна отримати 140,8 ГДж від спалюванні решток і біопалива⁶³.

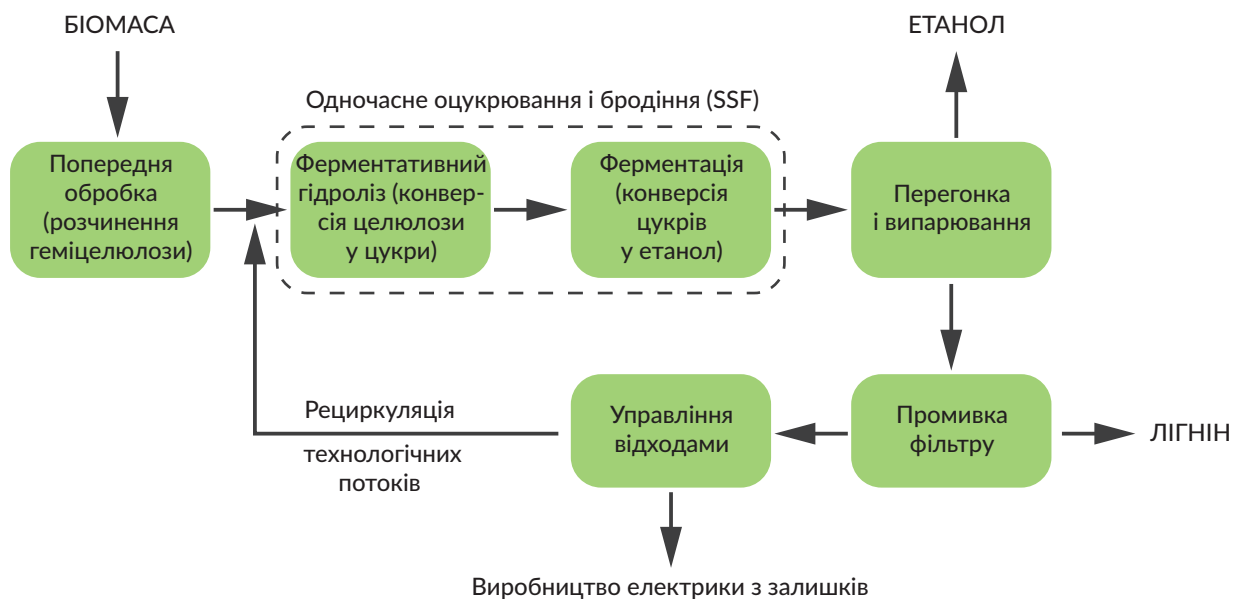


РИСУНОК 22:

Схема виробництва біоетанолу з лігноцелюлозної біомаси⁶⁴.

⁶² <https://www.epure.org/wp-content/uploads/2021/09/210823-DEF-PR-European-renewable-ethanol-Key-figures-2020-web.pdf>

⁶³ Second-Generation Biofuel Markets: State of Play, Trade and Developing Country Perspectives. United Nations conference on trade and development – 69 p.

⁶⁴ M. N. A. M. Yusoff, N. W. M. Zulkifli, B. M. Masum and H. H. Masjuki Feasibility of bioethanol and biobutanol as transportation fuel in spark-ignition engine: a review. RSC Adv., 2015, 5, 100184–100211.

Слід відзначити, що лише незначна кількість підприємств, що виробляють етанол з целюлозних матеріалів, успішно працювали у світі на кінець 2020 року⁶⁵. Діяльність із запуску на ринок біоетанолу з лігноцелюлозної сировини останнім часом проводиться переважно в США та Бразилії⁶⁶. Крім того, нові установки з виробництва біоетанолу другого покоління були запущені в ЄС та Китаї, але лише деякі з них є комерційними підприємствами, які можуть виробляти біоетанол із решток кукурудзи.

У 2020 р. у США загальна встановлена виробнича потужність біоетанолу склала 66 млрд л/рік, при цьому минулого року було вироблено 52,2 млрд л⁶⁷. Целюлозну біомасу як сировину можуть використовувати 4,1% виробничих потужностей біоетанолу США, у тому числі 0,4% працює лише на целюлозній біомасі. Деякі з них виробляють біоетанол із решток кукурудзи. Найбільші потужності виробництва біоетанолу у США на даний момент є у VERBIO North America Corp у Неваді з виробничою потужністю 113,5 млн. л/рік (30 т/рік⁶⁸), що був придбаний у компанії DuPont; проєкт LIBERTY в Емметсбурзі – 75,7 млн. л/рік (20 т/рік); Seaboard Energy Kansas у м. Хьюстон – 94,6 млн л/рік (25 т/рік).

У Бразилії віджимки цукрової тростини (багаса) є основною сировиною для виробництва целюлозного біоетанолу. Очікується, що у 2020 році 178 тис. т цієї біомаси буде використано для виробництва 32 млн л⁶⁹. Через експлуатаційні/механічні труднощі, поки що такі біоетанольні заводи не досягли повної потужності. У Китаї компанія Longlive Bio-technology Co. Ltd у 2012 році відкрила в Шаньдуні виробництво целюлозного біоетанолу потужністю 60 тис. т/рік⁷⁰.

У 2020 р. в ЄС, за прогнозами USDA, мало бути вироблено 25 млн л целюлозного біоетанолу⁷¹. Одне з найбільших у світі виробництв целюлозного біоетанолу, завод Beta Renewables, офіційно відкрився у Кресцентіно (Італія) у 2013 році, але його було за-

крито у 2017 року через реструктуризацію хімічної компанії Mossi & Ghisolfi. Завод мав річну потужність 40 тис. т біоетанолу, виробленого з пшеничної соломи, рисової соломи та гігантського очерету (*Arundo donax*)⁷². У листопаді 2018 року завод був придбаний хімічною дочірньою компанією Eni Versalis. Новий оператор планував запустити завод у 2020 році.

Проєкт COMETHA за підтримки 7-ї Рамкової програми Європейського Союзу з розвитку дослідницької діяльності з 2014 по 2018 рр. передбачав будівництво та експлуатацію інтегрованого промислового об'єкта перед-комерційного рівня для виробництва 80 000 т/рік біоетанолу другого покоління з лігноцелюлозної біомаси в Порто Маргера (Італія)⁷³. Проєкт спрямований на розвиток сталого ланцюга постачання 360 тис. т/рік лігноцелюлозної біомаси, отриманої з регіону Венето. Такою біомасою є, наприклад, багаторічні енергетичні рослини (*Arundo donax*) та сільськогосподарські відходи (кукурудзиння – найбільш підходяща сировина для виробництва біоетанолу у розглянутому географічному сценарії).

У 2021 році швейцарська компанія Clariant на південному заході Румунії мала завершити будівництво заводу з виробництва целюлозного етанолу. Одним з інноваційних рішень, розроблених компанією, є технологія sunliquid®, яка створює додаткову вартість за рахунок переробки у целюлозний біоетанол сільськогосподарських залишків, зокрема, соломи зернових колосових, кукурудзиння, рисової соломи або багаси з цукрової тростини. Завод sunliquid® у Румунії буде виробляти 50 тис. т целюлозного етанолу шляхом перетворення 250 тис. т місцевої соломи пшениці. При цьому будуть створені понад 400 постійних робочих місць. Крім того, проєкти з виробництва целюлозного біоетанолу за технологією Clariant також планується реалізувати у Словаччині, Польщі та Болгарії⁷⁴.

⁶⁵ Renewables 2021 Global Status Report. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf

⁶⁶ Technical options for retrofitting industries with bioenergy. BioFitHandbook <https://www.biofit-h2020.eu/publications-reports/BioFitHandbook-2020-03-18.pdf>

⁶⁷ Essential energy. 2021. Ethanol industry outlook. Renewable fuels association report. https://ethanolrfa.org/wp-content/uploads/2021/02/RFA_Outlook_2021_fin_low.pdf

⁶⁸ Million gallons per year

⁶⁹ Biofuels Annual. Brazil. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_Sao%20Paulo%20ATO_Brazil_08-03-2020

⁷⁰ <https://www.etipbioenergy.eu/value-chains/conversion-technologies/advanced-technologies/sugar-to-alcohols>

⁷¹ Biofuels Annual. European Union. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_The%20Hague_European%20Union_06-29-2020

⁷² Monica Padella, Adrian O'Connell, Matteo Prussi. What is still Limiting the Deployment of Cellulosic Ethanol? Analysis of the Current Status of the Sector Appl. Sci. 2019, 9, 4523; doi:10.3390/app9214523

⁷³ <https://cordis.europa.eu/project/id/322406>

⁷⁴ <https://www.euractiv.com/section/alternative-renewable-fuels/opinion/making-european-sustainable-mobility-a-reality-with-cellulosic-ethanol/>

ВИРОБНИЦТВО БІОГАЗУ З РЕШТОК КУКУРУДЗИ

Кукурудзяний силос є одним із найпопулярніших субстратів, що використовуються як сировина для сільськогосподарських біогазових установок. Однак через зростання цін на кукурудзяний силос багато операторів біогазових установок почали шукати альтернативні субстрати, які можна легко отримати, є недорогими та мають хорошу продуктивність по виходу метану⁷⁵. Одним із таких субстратів можуть бути рештки кукурудзи.

Однією з переваг використання решток кукурудзи для анаеробного зброджування є те, що на процес не впливає потенційно високий вміст вологи після

збирання, що може бути проблематично для процесів прямого спалювання. Ферментований субстрат з біогазової установки можна застосовувати як біодобриво для сільськогосподарських угідь для рециркуляції поживних речовин разом з частиною вуглецю.

Порівняно з кукурудзяним силосом, анаеробне зброджування решток кукурудзи (соломи) має нижчий потенціал біогазу (табл. 3). Це також вимагає більшого часу утримання в порівнянні з кукурудзяним силосом, але вважається, що з такою різницею оператори біогазових установок можуть впоратися.

TABLE 3:

Вихід біометану з решток кукурудзи⁷⁶ та силосу кукурудзи⁷⁷.

	DM, % волога вага	Біогаз, I _N /кг VS	CH ₄ , I _N /кг VS	Деструктована DM, %
1. Фракції решток кукурудзи				
• Стебла	25.5 ± 0.8	424.3	233.8	53.9
• Листя	63.3 ± 0.8	442.9	244.5	57.0
• Листя	58.2 ± 0.6	544.4	307.0	70.4
• Стрижні	43.5 ± 0.2	379.8	206.6	51.3
2. Силос кукурудзи	27.7	673	345	77.9

DM – суха речовина; VS – леткі тверді речовини

⁷⁵ Mazurkiewicz, J.; Marczuk, A.; Pochwatka, P.; Kujawa, S. Maize Straw as a Valuable Energetic Material for Biogas Plant Feeding. *Materials* 2019, 12, 3848. <https://doi.org/10.3390/ma12233848>

⁷⁶ Simona Menardo, Gianfranco Airolti, Vincenzo Cacciatore, Paolo Balsari Potential biogas and methane yield of maize stover fractions and evaluation of some possible stover harvest chains, *Biosystems Engineering*, Volume 129, 2015, 352-359. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.11.010>.

⁷⁷ Bauer, A., Leonhartsberger, C., Bösch, P., Amon, B., Friedl, A., & Amon, T. (2009). Analysis of methane yields from energy crops and agricultural by-products and estimation of energy potential from sustainable crop rotation systems in EU-27. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 12(2), 153–161. doi:10.1007/s10098-009-0236-1.

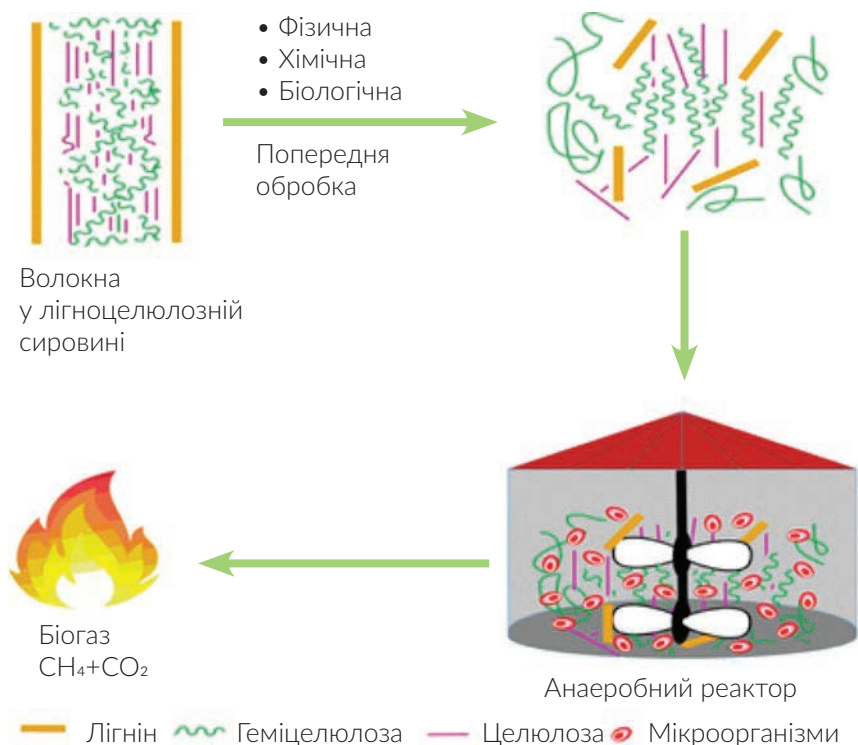


РИСУНОК 23:

Схема попередньої обробки лігноцелюлозної сировини для виробництва біогазу⁸¹

Через високий вміст у залишках кукурудзи лігноцелюлозних хімічних сполук (див. табл. 2), перед ферментацією їх необхідно попередньо обробити шляхом механічного, фізичного, біологічного чи хімічного руйнування (рис. 23). Ці процеси покращують вихід біогазу та зменшують час утримання субстрату в анаеробному реакторі, але вимагають додаткової енергії та фінансових витрат. З енергетичної точки зору, лише хімічна попередня обробка вважається сталою⁷⁸. Аналіз семи видів хімічних попередніх обробок кукурудзиння показує, що солома, попередньо оброблена 3% H_2O_2 і 8%

$\text{Ca}(\text{OH})_2$, дала найбільший вихід метану – 216,7 і 206,6 мл $\text{CH}_4/\text{г}$ летких твердих речовин (VS), що на 115,4% і 105,3% вище, ніж у необробленій соломі, відповідно⁷⁹. Ці два процеси показали кращі економічні показники та ефективність, ніж інші попередні види обробок, які були порівняні у дослідженні. Також перспективною є попередня біологічна обробка. Кукурудзиння, попередньо оброблене композицією мікроорганізмів, виробляло на 131,6% більше загального метану, ніж необроблений контрольний зразок⁸⁰.

⁷⁸ Croce, S., Wei, Q., D'Imporzano, G., Dong, R., & Adani, F. (2016). Anaerobic digestion of straw and corn stover: The effect of biological process optimization and pre-treatment on total bio-methane yield and energy performance. *Biotechnology Advances*, 34(8), 1289–1304. doi:10.1016/j.biotechadv.2016.09.004

⁷⁹ Song Z, GaiheYang, Liu X, Yan Z, Yuan Y, et al. (2014) Comparison of Seven Chemical Pretreatments of Corn Straw for Improving Methane Yield by Anaerobic Digestion. *PLoS ONE* 9(4): e93801. doi:10.1371/journal.pone.0093801

⁸⁰ Panpan Li, Chao He, Gang Li, Pan Ding, Mingming Lan, Zan Gao & Youzhou Jiao (2020) Biological pretreatment of corn straw for enhancing degradation efficiency and biogas production, *Bioengineered*, 11:1, 251-260, DOI: 10.1080/21655979.2020.1733733

⁸¹ Amin, F.R., Khalid, H., Zhang, H. et al. Pretreatment methods of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion. *AMB Expr* 7, 72 (2017). <https://doi.org/10.1186/s13568-017-0375-4>

У 2013 р. була введена в експлуатацію пілотна установка електричною потужністю 50 кВт для переробки кукурудзиння як моносубстрату в Реньцю (Китай)⁸². Біогазова установка складається з реактору гідролізу безперервної подачі (40 м³) для стадії попередньої обробки та 2 метантенків об'ємом 476 м³.

У грудні 2019 року компанія AB Energy SPA (Іспанія) запустила у Мілані виробництво біометану зі швидкістю потоку 606 Нм³/год із сільськогосподарської сировини, включаючи стебла кукурудзи. Біометан подається в італійську газову мережу⁸³.

Промислові біогазові технології використання кукурудзиння та інших рослинних решток як сировини розвиваються. Новий проєкт такого типу німецької компанії EnviTec Biogas буде побудований поблизу міста Цинь Сіань у провінції Шеньсі в Китаї. Після реалізації проєкту чотири біогазові

реактори заводу вироблятимуть близько 37 тис. Нм³ біогазу/день з сільськогосподарських відходів, таких як стебла кукурудзи⁸⁴. Запатентована компанією Evonik триступенева мембранна система газоочищення дає змогу переробляти біогаз до біометану з низькими втратами метану⁸⁵.

Теофіпольська енергетична компанія будує біогазову установку електричною потужністю 10,5 МВт в Україні у Хмельницькій області. Установка використовуватиме рослинні рештки, у тому числі великі обсяги кукурудзиння.

Німецька компанія Verbio оголосила про встановлення анаеробного реактора на колишньому заводі целюлозного етанолу DuPont в штаті Невада в США. Реактор буде використовувати 100 тис. т кукурудзиння/рік для виробництва біометану, обсяг якого за вмістом енергії еквівалентний 80 млн л бензину на рік⁸⁶.

⁸² Bionova Biogas GmbH. Map with references Semi-aerobic Hydrolysis Facilities in Germany and around the world https://bionova-biogas.de/en/pdf/2014_References_Bionova.pdf

⁸³ Biogas success stories 2020. European Biogas Association. https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2020/11/EBA_catalogue2020_WEB-1.pdf

⁸⁴ Biogas barometer 2020. EurObserv'ER <https://www.eurobserv-er.org/pdf/biogas-barometer-2020/>

⁸⁵ <https://www.bioenergy-news.com/news/construction-underway-on-two-envitec-biogas-projects-in-china/>

⁸⁶ Renewables 2021 Global Status Report. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf

АСПЕКТИ СТАЛОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РЕШТОК КУКУРУДЗИ

СТАЛЕ ВІДЧУЖЕННЯ РЕШТОК КУКУРУДЗИ

Нерозбірливе збирання рослинних решток може спричинити шкідливий вплив на стан ґрунту, ріст рослин та інші екосистемні аспекти⁸⁷. Зменшення надходження органічних залишків у ґрунт призводить до зменшення запасів вуглецю, що негативно впливає на ґрунтову біоту. Але вплив обробки рослинних решток на викиди парникових газів у ґрунті все ще не повністю зрозумілий і вимагає додаткових польових досліджень. Загалом, збирання залишків зменшує викиди CO₂ та N₂O, що утворюються в результаті розпаду біомаси, і не впливає на викиди CH₄. Однак, поступове виснаження запасів C та N у ґрунті, пов'язане із заміною азоту мінеральними добривами, може спричинити негативний баланс C та збільшення викидів N₂O у районах, де збирають рештки. Реакція рослин на управління рослинними рештками залежить від конкретної території і для сталого виробництва біоенергії можна застосовувати різні найкращі методи управління (наприклад, консервацій-

ний обробіток ґрунту, сівозміни та покривні культури, управління поживними речовинами та/або органічними залишками).

Так само, стратегія збирання решток кукурудзи залежить від місцевих умов. Концептуальна схема того як економічні чинники мають бути збалансовані з обмежуючими факторами, заснованими на захисті ґрунтів та наданні екосистемних послуг, показана на рис. 24.

Для допомоги фермерам у прийнятті раціонального рішення, Службою охорони природних ресурсів Міністерства сільського господарства США були розроблені конкретні рекомендації щодо збирання рослинних решток для запобігання деградації ґрунту в результаті надмірного збору кукурудзиння⁸⁹. Згідно з документом, сталі обсяги видалення рослинних решток для виробництва біопалива будуть відрізнятися в залежності від таких факторів, як метод управління, врожайність культури і тип ґрунту. Такі інструменти, як RUSLE, WEQ та індекс кондиціонування ґрунту, ймовірно, будуть найбільш практичними способами визначення безпечних обсягів



РИСУНОК 24:

Залежність обсягів видалення решток кукурудзи від економічних аспектів: обмежуючих факторів та агрономічних стратегій⁸⁸. Смужки праворуч ілюструють різні розроблені та доступні методи управління ґрунтом та культурами, які можуть бути застосовані для забезпечення сталого постачання сировини.

⁸⁸ Cherubin Mauricio et al. (2018). Crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: A review. *Scientia Agricola*, v.75, n.3, 55-272. 75. doi:10.1590/1678-992X-2016-0459

⁸⁹ <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2442&context=usdaarsfacpub>

для видалення. Коефіцієнти видалення відрізняються від ступеня покриття поверхні ґрунту біомасою: необхідний відповідний перерахунок, який буде відрізнятися залежно від культури та регіону. У той час як ділянки з низькими схилами та високою врожайністю можуть сприяти збиранню решток, у багатьох областях кількість залишків, необхідна для підтримки якості ґрунту, буде вищою, ніж існуюча практика ґрунтового покриття. Деякі компанії забезпечують стале видалення залишків врожаю, наприклад, Pacific Ag⁹⁰ визначає для кожного виробника, поле за полем, потрібну кількість решток для збирання, щоб забезпечити необхідний вміст вологи та захисту ґрунту, одночасно оптимізуючи ефективність обробки, внесення речовин та появи сходів.

ЕМІСІЯ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ВІД ЛОГІСТИКИ РЕШТОК КУКУРУДЗИ

При використанні на великих енергетичних установках (≥ 20 МВт) рештки кукурудзи повинні відповідати критеріям скорочення викидів парникових газів RED II та іншим критеріям сталості (наприклад, якість ґрунту та вуглець у ґрунті, біорізноманіття та запаси вуглецю). У звіті дослідницького проекту ЕС Smart CHP⁹¹ представлена оцінка сталості ланцюга поставок кукурудзиння для ТЕЦ в Румунії. Цей ланцюжок оцінюється на основі загальних значень викидів для постачання біомаси, процесу виробництва біонафти за технологією швидкого піролізу (FPBO) та транспортування FPBO від віртуального місця розташування заводу до кінцевого користувача. У процесі виробляється не тільки біонафта, але також пара та електроенергія як побічні продукти. Результати

показують, що значення скорочення викидів для ланцюга постачання кукурудзиння Smart ТЕЦ становлять 95% для електроенергії та 96% для теплової енергії у випадку мінімальної відстані транспортування FPBO 50 км та 94% і 96%, відповідно, для 150 км. Загальні викиди парникових газів від постачання кукурудзиння складають $2,0 \text{ гCO}_2_{\text{екв}}/\text{МДж}$ біомаси, включаючи викиди від збору кукурудзи $0,88 \text{ гCO}_2_{\text{екв}}/\text{МДж}$ біомаси.

У США електроенергія та паливо, отримані з кукурудзиння, зменшують викиди парникових газів на 21–92% порівняно із використанням традиційних палив. Екологічний ефект найбільший для комбінованого виробництва теплової та електричної енергії, при цьому за оцінками в США досягається скорочення викидів парникових газів $1,4 \text{ т CO}_2_{\text{екв}}$ на 1 т кукурудзиння у порівнянні із природним газом⁹², що показано на рис. 25. Приклад із китайської провінції Цзілінь⁹³ свідчить про те, що використання гранул із кукурудзиння може скоротити на 90,46% викиди парникових газів протягом життєвого циклу при заміщенні вугілля для спалювання.

Таким чином, виробництво енергії із решток кукурудзи призводить до утворення невеликих викидів парникових газів, які можна оцінити за допомогою затверджені методології розрахунку скорочення викидів для конкретного ланцюга створення вартості. У випадку твердої біомаси, лише установки, що виробляють електроенергію, тепло і холод або паливо з загальною номінальною входною тепловою потужністю ≥ 20 МВт, повинні відповідати критеріям сталості та скороченню викидів парникових газів відповідно до Європейської директиви про відновлювані джерела енергії (REDII).

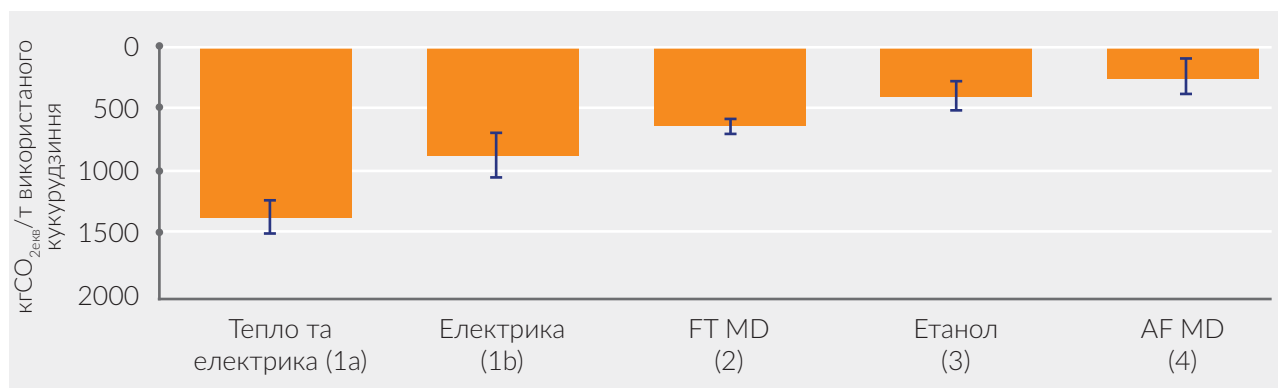


РИСУНОК 25:

Скорочення емісії парникових газів від альтернативного використання кукурудзиння у порівнянні з звичайним виробництвом електрики у США. FT – Фішер-Тропш; MD – середній дистилят; AF – розширене бродіння⁹².

⁸⁹ Susan S. Andrews. White paper. Crop Residue Removal for Biomass Energy Production: Effects on Soils and Recommendations // USDA-Natural Resource Conservation Service – February 22, 2006.

⁹⁰ <https://pacificag.com/harvesting/>

⁹¹ D5.1 SUSTAINABILITY ASSESSMENT_ BTG_ JUNE 2020 https://www.smartchp.eu/?jet_download=1799

⁹² Trivedi, P., Malina, R., & Barrett, S. R. H. (2015). Environmental and economic tradeoffs of using corn stover for liquid fuels and power production. *Energy & Environmental Science*, 8(5), 1428–1437. doi:10.1039/c5ee00153f

⁹³ Shizhong Song, Pei Liu, Jing Xu, Chinhao Chong, Xianzheng Huang, Linwei Ma, Zheng Li, Weidou Ni, Life cycle assessment and economic evaluation of pellet fuel from corn straw in China: A case study in Jilin Province, *Energy* (2017), doi: 10.1016/j.energy.2017.04.068

ДОДАТОК І: ОСНОВНІ ВИДИ ТЕХНІКИ ДЛЯ ЗБИРАННЯ, ЛОГІСТИКА КУКУРУДЗИННЯ ТА ЙОГО ПЕРЕРОБЛЕННЯ В ГРАНУЛИ/БРИКЕТИ

Додаткову інформацію щодо виробників техніки та дилерів можна знайти в онлайн-таблиці за посиланням нижче:

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1o-u1S0B5IXwjQW72b7C_G5kNAwmxE6-l6VcyEd6myog/edit#gid=0

Логотип	Контактна інформація	Опис	Подрібнення/ валкування	Тюкування	Збирання/ навантаження	Транспорту- вання	Гранулювання/ Брикетування
	BioG GmbH Weilbolden 18, 4972 Utzenaich Austria +43 (0) 7751/50149-0 office@biog.at https://biog.at	BioChipper, розроблений компанією BioG, має концепцію мульчувача з валкоутворювачем, дозволяє збирати рослинні рештки, такі як кукурудзиння, солома ріпаку, солома зернових, проміжні культури та матеріали для ландшафтного дизайну. Операції захоплення маси, подрібнення та валкування виконуються за один прийом.	●				
	HINIKER COMPANY 58766 240th Street Mankato, MN 56002 USA (507)-625-6621 (800)-433-5620 https://www.hiniker.com	Мульчувач Hiniker серії 5600 може істотно скоротити час роботи в полях, подрібнюючи та формуючи валки із стебел за один прохід.	●				
	LOFTNESS COMPANY 650 South Main Street PO Box 337 Hector, MN 55342 USA 320-848-6266 info@loftness.com https://www.loftness.com	Подрібнювач-валкоутворювач Loftness перетворює проблеми на нові можливості. Непередбачувані ринки та попит на біомасу дозволяють отримати прибуток від рослинних решток.	●				
	CLAAS https://www.claas-group.com/	CLAAS є світовим виробником самохідних кормозбиральних та зернозбиральних комбайнів. Компанія також виробляє іншу сільськогосподарську техніку: трактори, прес-підбирачі та кормозбиральні машини.		●	●		

Логотип	Контактна інформація	Опис	Подрібнення/ валкування	Тюкування	Збирання/ навантаження	Транспорту- вання	Гранулювання/ брикетування
	Maschinenfabrik Bernard KRONE GmbH & Co. KG Zentrale: Heinrich- Krone-Straße 10 D-48480 Spelle Tel.: +49 (0)5977/935-0 Fax: +49 (0)5977-935- 339 Info.ldm@krone.de https://landmaschinen.krone.de/	Як фахівець із заготівлі кормів, KRONE виробляє дискові косарки, ворошилки, граблі, кормовози та силосні причепи, рулонні та прямокутні прес-підбирачі, а також високопродуктивні самохідні косарки BiG M та кормозбиральні комбайни BiG X.		●	●	●	
	Kuhn Group KUHNSAS 4 Impasse des Fabriques BP 50060 F-67706 Saverne CEDEX +33(0)3 88 01 81 00 Fax: +33(0)3 88 01 81 01 https://www.kuhn.com/	Kuhn Group є світовим виробником сінозбирального та кормозбирального обладнання. Kuhn виробляє подрібнювачі, граблі та прес-підбирачі.	●	●			
	AGCO Corporation https://www.agcocorp.com	Виробляючи продукцію під відомими брендами Challenger®, Fendt®, GSI®, Massey Ferguson® і Valtra®, корпорація AGCO надає технічні рішення фермерам по всьому світу за допомогою повної лінійки тракторів, зернозбиральних комбайнів, обладнання для сіна та кормів, посівного та ґрунтообробного обладнання, систем зберігання зерна та виробництва протеїну. Технічні рішення AGCO для сіна та фуражу варіюються від косарок і прес-підбирачів до фуражних повітродувок і місткостей для зберігання.		●	●		
	CNH Industrial https://www.cnhindustrial.com/	CNH Industrial виробляє та продає сільськогосподарську та будівельну техніку, вантажівки, комерційний транспорт. Брендами компанії, що представляє техніку для збирання сільськогосподарських відходів та логістики, є New Holland, Case, Iveco.	●	●	●	●	

Логотип	Контактна інформація	Опис	Подрібнення/валкування	Тюкування	Збирання/навантаження	Транспортування	Гранулювання/Брикетування
	John Deere https://www.deere.com	З моменту заснування у 1837 році John Deere постачає продукцію та послуги для агровиробників. John Deere виробляє широкий асортимент техніки для збирання біомаси, включаючи прес-підбирачі та навантажувачі.	●	●	●		
	Arcusin S.A. Polígono Industrial Pla d'Urgell - Av. Merlet, 8 - 25245 VILA-SANA Lleida (Spain) T 973 71 28 55 - 696 98 29 10 arcusin@arcusin.com https://www.arcusin.com	Arcusin S.A. виробляє техніку для збирання тюків. Автоматичний навантажувач тюків AutoStack FSX і XP54. Накопичувач тюків ForStack 8.12.			●		
	ZAVOD KOBZARENKO LTD Ukraine, 42500, Sumy region., Lypova Dolyna, Rusaniwska street, 17 +38 (044) 451-68-77, +38 (095) 277-63-98 www.kobzarenko.com.ua	Виробництво обладнання для збирання і транспортування тюків: - причіп для прямокутних тюків ПТ-16 КВАДРО; - самозавантажувальні причеми для рулонів; - причеми платформи.			●	●	
	ProAG 2131 Airport Drive Saskatoon, SK Canada S7L 7E1 306-933-8585 https://www.proagdesigns.com/	ProAG причеми тюковози призначені як для рулонів, так і для великих прямокутних тюків для їх збирання та укладання.			●		
	URSUS S.A. DOBRE MIASTO - HQ ul. Fabryczna 21, 11-040 Dobre Miasto Poland +48 22 506 56 00 dobre_miasto@ursus.com https://www.ursus.com/	Польська компанія URSUS виробляє транспортні засоби, сільськогосподарські машини і обладнання, у тому числі прес-підбирачі та платформи для транспортування тюків.		●		●	

Логотип	Контактна інформація	Опис	Подрібнення/ валкування	Тюкування	Збирання/ навантаження	Транспорту- вання	Гранулювання/ брикетування
	AMANDUS KAHL GmbH & Co. KG Dieselstrasse 5–9 21465 Reinbek Hamburg, Germany +49 (0) 40 72 77 10 info@akahl.de https://akahl.de	Гранулювання відновлюваної сировини для енергетичних потреб – основна діяльність КАХЛ. Заводи для гранулювання соломи та сухого корму стали частиною програми постачання КАХЛ.					●
	CPM Europe B.V. Rijder 2, 1507 DN Zaandam The Netherlands +31 75 65 12 611 info@cpmeurope.nl https://www.cpmeurope.nl/	CPM Europe виробляє високоякісне обладнання для гранулювання та подрібнення різноманітної деревини та сільськогосподарської біомаси.					●
	ANDRITZ Feed and Biofuel A/S Esbjerg, Denmark Phone: +45 72 160 300 andritz-fb.dk@andritz.com https://www.andritz.com	ANDRITZ може спроектувати, виготовити, постачати та оптимізувати обладнання для виробництва високоякісних гранул з біомаси. Запропоновані рішення завжди підкріплюються технічними консультаціями, проектуванням, установкою та післяпродажним обслуговуванням у сервісних центрах, розташованих по всьому світу.					●
	ICK GROUP office 222, 89 A, Prospect Peremogy, Kyiv, 03115, Ukraine tel.: +38 (067) 215 10 32 fax: +38 (044) 451 02 30 e-mail: info@ick.ua https://ick.ua/	ICK Group виробляє обладнання під власною торговою маркою GRANTECH. У компанії багаторічний досвід впровадження енергозберігаючих технологій та технологій гранулювання різних матеріалів.					●
	C.F. Nielsen A/S Solbjergvej 19 DK-9574 Baelum tel: +45 9833 7400 https://cfnielsen.com/	C. F. Nielsen є провідним світовим брендом у сфері проектування та виробництва механічних брикетувальних машин для біомаси та відходів.					●
	PE "Briquetting Technologies" 13313, Ukraine, Zhytomyr region, c. Berdychiv, Semenivska str., 116 +38 (067) 410 21 02 bricteh@gmail.com https://briq-tech.com/	Комплекс обладнання для виробництва паливних брикетів і пелет.					●

ДОДАТОК II: ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ТЕПЛА ІЗ РЕШТОК КУКУРУДЗИ

Більше інформації від виробників котлів можна знайти в онлайн-таблиці за посиланням нижче:
https://docs.google.com/spreadsheets/d/1hb1IEKxIR_OStT5LOibOfZzggeZ-BjeARq33iwjiaE/edit#gid=0

Логотип	Контактна інформація	Опис	Small boilers (100-500 kW)	Middle boilers (500 kW – 1 MW)	Large boilers (above 1 MW)	Steam boilers
	Group COMPTE.R https://www.compte-r.com/en/	Понад 130 років COMPTE.R впроваджує інновації та винаходить нові рішення для опалення на біомасі для розвитку відновлюваної енергетики.			●	●
	DP CleanTech https://www.dpcleantech.com/	DP CleanTech пропонує рішення для переробки біомаси в чисту енергію, які перевірені, запатентовані на базі провідних технологій для спалювання, газифікації та виробництва біогазу.			●	●
	Babcock & Wilcox Vølund https://www.babcock.com/	B&W надає екологічно свідомі технологічні рішення та послуги енергетичним та промисловим споживачам у всьому світі.			●	●
	TTS eko s.r.o. https://www.ttsboilers.cz/	В рамках екологічної програми компанія TTS в основному займається розробкою, виробництвом, монтажем та обслуговуванням промислових котлів і котелень для спалювання біомаси.			●	
	Volyn-Kalvis LLC https://www.volyn-kalvis.com.ua/en/	ТОВ «Волинь-Калвіс» виробляє водогрійні автоматизовані твердопаливні котли з рухомою решіткою для різних видів біомаси: тирси, тріски, зернових відходів, стебла сояшнику та кукурудзи, а також пелети з деревини, сояшнику, торфу та інших рослинних матеріалів.	●	●	●	
	Kruger boiler plant https://kruger.com.ua/	Котлозавод «Крігер» - компанія повного циклу будівництва «під ключ» для бізнесу, пов'язаного з виробництвом теплової енергії.		●	●	●

КОНСОРЦІУМ ПРОЄКТУ AGROBIOHEAT

Логотип	Опис
	Centre for Research and Technology Hellas (CERTH) – один із провідних дослідницьких центрів у Греції. Галузі його спеціалізації включають діяльність у сфері відновлюваних джерел енергії, виробництва та утилізації твердого біопалива, енергозбереження та охорони навколишнього середовища. www.certh.gr
	Іспанська Біоенергетична Асоціація AVEBIOM представляє всі компанії для повного ланцюга постачання біоенергії в Іспанії. www.avebiom.org
	BIOS – австрійська науково-дослідна та інженерна компанія з більш ніж 20-річним досвідом у сфері використання біомаси для енергетичних цілей. www.bios-bioenergy.at
	Bioenergy Europe (раніше відома як AEBIOM) є рупором європейської біоенергетики. Її діяльність спрямована на розвиток сталого ринку біоенергетики, що базується на справедливих умовах ведення бізнесу. www.bioenergyeurope.org
	Food & Bio Cluster Denmark є національним кластером Данії по харчовим продуктам і біоресурсам. Кластер сприяє співробітництву між дослідницькими організаціями і бізнесом та пропонує своїм членам універсальний доступ до мережі контактів, фінансування, розвитку бізнесу, проєктам, обладнанню а також надає різноманітні консультаційні послуги. www.foodbiocluster.dk
	Технологічний центр CIRCE заснований у 1993 р. з метою надання інноваційних рішень в галузі енергетики для сталого розвитку. www.fcirce.es
	INASO-PASEGES – громадська неприбуткова організація, заснована у 2005 р. в Афінах Панельною конфедерацією спілок сільськогосподарських кооперативів (PASEGES). www.neapaseges.gr
	Кооператив «Зелена енергія» (ZEZ) був створений у 2013 році в рамках проєкту «Розвиток енергетичних кооперативів у Хорватії», реалізованого Програмою розвитку ООН (ПРООН) у Хорватії. www.zez.coop
	Основною метою діяльності Кластеру GEA є розвиток сектору біоенергетики в Румунії та підвищення зацікавленості у виробництві та утилізації біомаси. www.greencluster.ro
	Біоенергетична асоціація України (UABIO) була зареєстрована у 2013 році як громадська організація. Метою діяльності асоціації є створення спільної платформи для співпраці на ринку біоенергетики України. www.uabio.org

Логотип	Опис
	AILE працює у галузі відновлюваних джерел енергії та енергозбереження у сільськогосподарських районах Західної Франції. www.aile.asso.fr
	White Research – компанія, що здійснює соціальні дослідження і консалтинг та спеціалізується на споживчій поведінці, аналізі ринку та управлінні інноваціями. Розташована у Брюсселі. www.white-research.eu
	Agronergy є постачальником енергетичних послуг, що спеціалізується на виробництві теплової енергії з відновлюваних джерел енергії. www.agronergy.fr



ПУБЛІКАЦІЯ

У цій публікації, підготовленій Біоенергетичною асоціацією України (UABIO) та Центром досліджень і технологій Еллади (CERTH), висвітлюються питання щодо сучасного стану виробництва кукурудзи, особливостей її вирощування та можливостей використання решток кукурудзи для отримання енергії. У посібнику наведено огляд технологій збирання решток кукурудзи та їх використання для виробництва теплової і електричної енергії, біогазу та біоетанолу. Видання також включає переліки компаній, які пропонують техніку для збирання, логістика кукурудзиння та його перероблення в гранули/брикети та енергетичні системи для виробництва тепла із решток кукурудзи. Публікація підготовлена в рамках проекту AgroBioHeat, який фінансується програмою ЄС Горизонт 2020. Проект сприяє впровадженню економічно та екологічно сталих технічних рішень для виробництва теплової енергії з агробіомаси в Європі.



UABIO



CERTH
CENTRE FOR
RESEARCH & TECHNOLOGY
HELLAS



Цей проєкт отримав фінансування від Програми досліджень та інновацій ЄС Горизонт 2020 згідно Грантової Угоди № 818369

