

ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ НАН УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГЕЛЕТУХА Георгій Георгійович

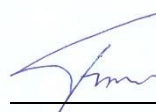
УДК 620.92

ДИСЕРТАЦІЯ
НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ЗАСАДИ ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГІЇ З
БІОЛОГІЧНИХ ВИДІВ ПАЛИВА

05.14.08 – перетворювання відновлюваних видів енергії

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



Г.Г. Гелету́ха

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий консультант

КЛИМЕНКО Віктор Миколайович
доктор технічних наук
член-кореспондент НАН України

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Гелетуха Г.Г. Науково-технічні засади виробництва енергії з біологічних видів палива. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.08 – перетворювання відновлюваних видів енергії. – Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена розвитку науково-технічних засад виробництва енергії з біологічних видів палива, зокрема вдосконаленню технологій заготівлі, спалювання і анаеробного зброджування побічної продукції АПК. Розроблено наукові засади комплексного використання наявної в Україні біомаси для виробництва теплової і електричної енергії, а також екологічного впливу спалювання біологічних видів палива на оточуюче середовище.

У вступі показана актуальність даного напрямку досліджень та обґрунтовано вибір теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, вказано зв'язок з науковими програмами, темами, планами, особистий внесок здобувача, стан публікацій та апробацію результатів дисертаційного дослідження, наведено відомості про їх впровадження та зазначено структуру роботи.

В першому розділі проведено комплексний аналіз сучасного стану розвитку технологій виробництва енергії з біологічних видів палива. Проаналізовано та виконано порівняння розвитку біоенергетики в ЄС, світі та в Україні. На сьогодні в Україні розвиток біоенергетичних технологій суттєво відстає від країн ЄС і світу. Виконано огляд методологічних підходів для оцінки енергетичного потенціалу біомаси, огляд досвіду законодавчого регулювання та державної підтримки біоенергетики, огляд технологій спалювання та анаеробного зброджування біомаси. Зроблено висновок, що до теперішнього часу в Україні недостатньо розроблені теоретичні засади і методологічний апарат, методи та засоби використання біологічних видів палива, зокрема, твердих видів біопалива та біогазу і біометану отриманих з аграрної сировини.

На основі проведеного аналізу визначено основні методичні, технологічні та організаційні проблеми, вирішення яких необхідне для широкої і успішної реалізації біоенергетичних проєктів в Україні.

Сформульовано актуальну науково-прикладну проблему, яка полягає у недостатності існуючих закономірностей та наукових результатів для подальшого підвищення ефективності виробництва енергії з біологічних видів палива, для оцінки реального енергетичного потенціалу біомаси в Україні, для дослідження процесів заготівлі біомаси, її перетворення у тверде біопаливо, процесів спалювання та анаеробного зброджування біомаси та їх екологічного впливу на довкілля. Визначено основні завдання дослідження для вирішення поставленої проблеми.

Другий розділ присвячено розробленню стратегічних засад виробництва і використання біопалив в Україні. Зокрема, розроблено методику оцінювання енергетичного потенціалу біомаси, в якій уточнено відсоток теоретичного потенціалу ПП с-г культур, що може бути використаний для виробництва енергії, а також враховані нові поточні та прогнозовані складові цього потенціалу. На основі розробленої методики оцінено енергетичні потенціали біомаси ряду областей та України в цілому. Розроблено дорожню карту розвитку біоенергетики України до 2050 р., яка враховує динаміку застосування твердих біопалив, біогазу, біометану, рідких біопалив при виробництві теплової та електричної енергії, а також в якості моторних палив.

Третій розділ присвячено розробленню наукових засад виробництва енергії з біологічних видів палива. Проаналізовані для умов України можливості збирання і енергетичного використання пожнивних решток кукурудзи, які базуються на аналізі можливих технологій збору ПП кукурудзи на базі різних с-г машин, беручи до уваги наявне на ринку обладнання та результати польових випробувань у США та ЄС. Виконано аналіз енергетичної ефективності та скорочення викидів парникових газів при використанні ПП кукурудзи у вигляді тюків, гранул та брикетів для виробництва теплової енергії. Проаналізовані можливості застосування електрогенеруючих потужностей на біомасі, біогазі і біометані для балансування енергетичної системи України.

Четвертий розділ присвячено експериментальним дослідженням та розробленню технологій і обладнання для виробництва енергії з біологічних видів палива. Отримала подальший розвиток технологія спалювання відходів деревини в котлах з топковим пристроєм ретортного типу, що дозволило розширити предметні сфери застосування технології на деревне паливо з вологістю до 50%, при цьому паливо може мати неоднорідний фракційний склад, а максимальний розмір його частинок визначається пропускною спроможністю шнекового живильника. Отримала подальший розвиток технологія спалювання соломи в водогрійних котлах періодичної дії, в якій шляхом підбору ряду конструктивних та експлуатаційних параметрів, а саме

підбору швидкості і кута нахилу сопел дуття та запропонованого швидкого та ступеневого повертання сопел, досягнуто стабільне вигорання та усунення неповноти згорання тюка, забезпечення стабільних показників поточної теплової потужності котла, зменшення емісії CO.

Отримала подальший розвиток технологія спалювання малих тюків соломи в водогрійних котлах ретортно-сигарного типу, в склад яких входить завантажувальний пристрій лоткового типу, в якому організоване безперервне стабільне спалювання цілих малих тюків соломи та забезпечені помірні викиди шкідливих речовин. Отримала подальший розвиток технологія анаеробного зброджування ПП АПК (солома, стебла кукурудзи, лушпиння соняшника).

П'ятий розділ присвячено техніко-економічному обґрунтуванню технологій виробництва енергії з біологічних видів палива. Виконані ТЕО ряду нових і перспективних для України біоенергетичних технологій: заготівлі ПП кукурудзи; виробництва гранул і брикетів з ПП кукурудзи; анаеробного зброджування ПП АПК; виробництва і використання біометану.

Результати дослідження впроваджено на підприємствах країни та у навчальному процесі вищих навчальних закладів, зокрема:

- Технологію спалювання відходів деревини в котлах з топковим пристроєм ретортного типу впроваджено на котлобудівельному заводі ТОВ «Волинь-Кальвіс».

- Технології спалювання соломи в водогрійних котлах періодичної дії та спалювання малих тюків соломи в водогрійних котлах ретортно-сигарного типу впроваджено у ТОВ «Котлозавод «Крігер».

- Результати експериментальних досліджень анаеробного зброджування аграрних відходів і залишків (солома, стебла кукурудзи, лушпиння соняшника) впроваджено у ПрАТ «МХП Еко Енерджи».

- Методика оцінки енергетичного потенціалу біомаси України та ТЕО заготівлі побічної продукції кукурудзи, виробництва гранул і брикетів з побічної продукції кукурудзи, анаеробного зброджування аграрних відходів і залишків, виробництва і використання біометану впроваджено у навчальному процесі кафедри економічної теорії факультету аграрного менеджменту Національного університету біоресурсів і природокористування України.

- Розроблені проекти законів в галузі біоенергетики передано в Держенергоефективності та комітет ПЕК і ЖКГ Верховної Ради України.

Ключові слова: біологічні види палива, біомаса, спалювання біомаси, анаеробне зброджування, енергетична ефективність, шкідливі викиди.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Біологічні ресурси і технології виробництва біопалива: Монографія / Я.Б.Блюм, Г.Г.Гелетука, І.П.Григорюк, К.В. Дмитрук, В.О.Дубровін, А.І.Ємець, Г.М.Забарний, Г.М.Калетнік, М.Д.Мельничук, В.Г.Мироненко, Д.Б.Рахметов, А.А. Сибірний, С.П.Циганков Київ: «Аграр Медіа Груп», 2010. 408 с.
2. Новітні технології біоенергоконверсії: Монографія / Я.Б.Блюм, Г.Г.Гелетука, І.П.Григорюк, В.О.Дубровін, А.І.Ємець, Г.М.Забарний, Г.М.Калетнік, М.Д.Мельничук, В.Г.Мироненко, Д.Б.Рахметов, С.П.Циганков. Київ: «Аграр Медіа Груп», 2010. 326 с.
3. Promoting sustainable use of underutilized lands for bioenergy production through a web-based platform for Europe / G. Geletukha, C. Khawaja, R. Janssen, D. Rutz and others // Proceedings of 27th European Biomass Conference and Exhibition, 27-30 May 2019, Lisbon, Portugal. p. 1921 – 1924, DOI: 10.5071/27thEUBCE2019-ICO.12.3. ISSN 2282-5819. Індексується у Scopus.
4. Fostering sustainable feedstock production for advanced biofuels on underutilized land in Europe / Georgiy Geletukha, Rita Mergner, Rainer Janssen, Dominik Rutz and others // Proceedings of 25th European Biomass Conference and Exhibition, 12-15 June 2017, Stockholm, Sweden, p. 125-130. DOI: 10.5071/25thEUBCE2017-1CO.5.5. ISSN 2282-5819. Індексується у Scopus.
5. Development of ecologically friendly technology for gasification of municipal solid wastes / Slenkin M., Geletukha G. // In: Sheffield J.W., Sheffield Ç. (eds) Assessment of Hydrogen Energy for Sustainable Development. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht, 2007. p. 243-247. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6442-5_20 Індексується у Scopus.
6. Energy potential of biomass in Ukraine / Geletukha G.G., Martsenyuk Z.A. // Heat Transfer Research: Volume 29 № 6 (1998), с 433-437 (ISSN: 1064-2285) DOI: [10.1615/heattransres.v29.i6-8.100](https://doi.org/10.1615/heattransres.v29.i6-8.100) Індексується у Scopus.
7. Producer gas cleaning from tars in a vortex bubbling device / Aznar M.R., Borisov I.I., Geletukha G.G., Corella J., Khalatov A.A. and others // Heat Transfer Research: Volume 30 № 1 (1999), с 50-58 (ISSN: 1064-2285). Індексується у Scopus.
8. Water boiling at tubular surfaces formed by cavities / Khalatov A.A., Kovalenko G.V., Geletuha G.G. // Heat Transfer Research: Volume 29 № 1 (1998), с 8-13 (ISSN: 1064-2285). Індексується у Scopus. <http://www.dl.begellhouse.com/references/46784ef93dddff27,2906653112975831,159ff3ec19ab21f1.html>
9. Heat transfer from a horizontal cylinder with cavities under water pool boiling conditions / Khalatov A.A., Kovalenko G.V., Geletuha G.G. // Heat Transfer Research: Volume 29 № 4 (1998), с 275-280 (ISSN: 1064-2285). Індексується у Scopus. <http://www.dl.begellhouse.com/journals/46784ef93dddff27,27da601e47fce063,06ca642404b5a9c9.html>
10. Heat exchange during cooling the producer gas in vortex bubbling unit / Borisov I.I., Khalatov A.A., Geletukha G.G., Kobzar' S.G., Shevtsov S.V. //

Xinxing Jianzhu Cailiao// New Building Materials, January 1998. Індексується у Scopus.

11. Гелету́ха Г.Г. Аналіз концепції зеленого енергетичного переходу України до 2050 р. // Біоенергетика: 2020, № 1 (15), с. 38-39.

12. Гелету́ха Г.Г., Железна Т.А., Драгнєв С.В., Баштовий А.І. Потенціал та перспективи енергетичного використання агробіомаси в Україні. // Теплофізика та Теплоенергетика: Том 42 № 1 (2020), с. 42-51. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2020.5>

13. Гелету́ха Г.Г., Железна Т.А., Баштовий А.І. Дорожня карта розвитку біоенергетики України до 2050 року // Теплофізика та теплоенергетика, 2020. – Т. 42, №2. – С. 60-67. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2020.6>

14. Гелету́ха Г.Г. Аналіз виробництва пелет та брикетів з побічної продукції кукурудзи на зерно в Україні. // Теплофізика та теплоенергетика, 2020. – Т. 42, №2. – С. 83-91. <http://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/399>

15. Гелету́ха Г.Г. Застосування ТЕЦ на біомасі для балансування енергосистеми України. // Теплофізика та теплоенергетика, 2020. – Т. 42, №3. – С. 47-55. <http://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/405>

16. Гелету́ха Г.Г., Железна Т.А., Драгнєв С.В., Баштовий А.І. Аналіз можливостей виробництва і споживання паливних брикетів з біомаси сільськогосподарського походження в Україні. Частина 2. // Теплофізика та Теплоенергетика: Том 41 № 1 (2019), с. 67-73. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2019.9>

17. Гелету́ха Г.Г., Железна Т.А., Драгнєв С.В., Баштовий А.І. Аналіз бар'єрів для виробництва енергії з агробіомаси в Україні. Частина 1. // Теплофізика та Теплоенергетика: Том 41 № 3 (2019), с. 77-84. <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2019.11>

18. Гелету́ха Г.Г., Железна Т.А., Драгнєв С.В., Баштовий А.І. Аналіз бар'єрів для виробництва енергії з агробіомаси в Україні. Частина 2 // Теплофізика та теплоенергетика. 2019, т. 41, № 4, с. 44-50. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2019.6>

19. Гелету́ха Г.Г., Железна Т.А., Драгнєв С.В., Баштовий А.І. Аналіз можливостей заготівлі деревного палива в лісах України // Промислова теплотехніка. 2018, т. 40, № 1, с. 61-67. <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2018.09>

20. Гелету́ха Г.Г., Железна Т.А., Драгнєв С.В., Баштовий А.І. Перспективи використання біомаси від обрізки та видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень для виробництва енергії в Україні // Промислова теплотехніка. 2018, т. 40, № 1, с. 68-74. <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2018.10>

21. Гелету́ха Г.Г., Железна Т.А., Баштовий А.І., Гелету́ха Г.І. Проблеми та перспективи розвитку біоенергетики в Україні // Промислова теплотехніка. 2018, т. 40, № 2, с. 41-48. <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2018.06>

22. Г.Г. Гелету́ха, Т.А. Железна, С.В. Драгнєв, А.І. Баштовий, І.Л. Роговський. Обґрунтування типових проектів виробництва і споживання паливних брикетів з агробіомаси в Україні // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка і

енергетика АПК. 2018, вип. 282, с. 173-181.
URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2018_282_16

23. Гелету́ха Г.Г., Железна Т.А., Драгнєв С.В., Баштовий А.І. Аналіз можливостей виробництва і споживання паливних брикетів з біомаси сільськогосподарського походження в Україні. Частина 1. // Промислова теплотехніка. 2018, т. 40, № 4, с. 62-68 <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.09>

24. Гелету́ха Г.Г., Железна Т.А., Баштовий А.І. Енергетичний та екологічний аналіз технологій виробництва електроенергії з твердої біомаси. Частина 1 // Промислова теплотехніка. 2017, т. 39, № 1, с. 58-64. <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2017.09>

25. Гелету́ха Г.Г., Железна Т.А. Стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні // Промислова теплотехніка. 2017, т. 39, № 2, с. 60-64. <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2017.09>

26. Гелету́ха Г.Г., Железна Т.А., Баштовий А.І. Енергетичний та екологічний аналіз технологій виробництва електроенергії з твердої біомаси. Частина 2 // Промислова теплотехніка. 2017, т. 39, № 3, с. 73-77. <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2017.11>

27. Драгнєв С.В., Железна Т. А., Гелету́ха Г. Г. Можливості заготівлі побічної продукції кукурудзи на зерно для енергетичного використання в Україні. Частина 1 // Біоенергетика/Bioenergy. 2016, №1 (7). с. 18-22.

28. Драгнєв С.В., Железна Т. А., Гелету́ха Г. Г. Можливості заготівлі побічної продукції кукурудзи на зерно для енергетичного використання в Україні. Частина 2 // Біоенергетика/Bioenergy. – 2016, №2 (8). с. 16-20.

29. Гелету́ха Г.Г., Железна Т.А., Баштовий А.І. Аналіз енергетичних стратегій країн ЄС та світу і ролі в них відновлюваних джерел енергії. Частина 1 // Промислова теплотехніка. 2016, т. 38, № 2, с. 56-64. <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2016.07>

30. Гелету́ха Г.Г., Железна Т.А., Баштовий А.І. Аналіз енергетичних стратегій країн ЄС та світу і ролі в них відновлюваних джерел енергії. Частина 2 // Промислова теплотехніка. 2016, т. 38, № 3, с. 57-66. <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2016.08>

31. Железна Т.А., Баштовий А.І., Гелету́ха Г.Г. Аналіз можливості отримання деревного палива з додаткових джерел в Україні // Промислова теплотехніка. 2016, т. 38, № 4, с. 71-77. <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2016.08>

32. Гелету́ха Г.Г., Железная Т.А., Дроздова О.И. Энергетический и экологический анализ технологий производства энергии из биомассы. Часть 2 // Промышленная теплотехника. 2015, т. 37, № 1, с. 53-62. <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2015.07>

33. Гелету́ха Г.Г., Железная Т.А., Кучерук П.П., Олейник Е.Н., Трибой А.В. Биоэнергетика в Украине: современное состояние и перспективы развития. Часть 1 // Промышленная теплотехника. 2015, т. 37, № 2, с. 68-76. <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2015.08>

34. Гелету́ха Г.Г., Железная Т.А., Кучерук П.П., Олейник Е.Н., Трибой А.В. Биоэнергетика в Украине: современное состояние и перспективы развития.

Часть 2 // Промышленная теплотехника. 2015, т. 37, № 3, с. 65-73.
<https://doi.org/10.31472/ihe.3.2015.08>

35. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Трибой А.В. Перспективы выращивания и использования энергетических культур в Украине. Часть 1. // Промышленная теплотехника. 2015, т. 37, № 4, с. 53-60. <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2015.06>

36. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Трибой А.В. Перспективы выращивания и использования энергетических культур в Украине. Часть 2. // Промышленная теплотехника. 2015, т. 37, № 5, с. 58-67. <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2015.07>

37. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А. Біоенергетика в Україні: стан розвитку, бар'єри та шляхи подолання // Біоенергетика. 2014, № 1 (3), с. 16-19.

38. Гелетуха Г.Г., Крамар В.Г. Методика попередньої техніко-економічної оцінки та вибору парових турбін для проектів ТЕЦ на біомасі в комунальному теплопостачанні. Частина 1 // Промислова теплотехніка 2014. т. 36, №1. с. 66-73.

39. Гелетуха Г.Г., Крамар В.Г. Методика попередньої техніко-економічної оцінки та вибору парових турбін для проектів ТЕЦ на біомасі в комунальному теплопостачанні. Частина 2 // Промислова теплотехніка 2014. т. 36, №2. с. 78-85.

40. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Трибой А.В. Перспективы использования отходов сельского хозяйства для производства энергии в Украине. Часть 1 // Промышленная теплотехника. 2014, т. 36, № 4, с.36-42.

41. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Трибой А.В. Перспективы использования отходов сельского хозяйства для производства энергии в Украине. Часть 2 // Промышленная теплотехника. 2014, т. 36, № 5, с.73-80.

42. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Дроздова О.И. Энергетический и экологический анализ технологий производства энергии из биомассы. Часть 1 // Промышленная теплотехника. 2014, т. 36, № 6, с.78-88.

43. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А. Место биоэнергетики в проекте обновленной Энергетической стратегии Украины до 2030 года // Промышленная теплотехника. 2013, т. 35, № 2, с.64-70.

44. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Дроздова О.І. Комплексний аналіз технологій виробництва енергії з твердої біомаси в Україні. Частина 1. Солома // Промислова теплотехніка. 2013, т. 35, № 3, с.56-63. <https://uabio.org/wp-content/uploads/2013/06/complex-analysis-article-zheliezna.pdf>

45. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Дроздова О.І. Комплексний аналіз технологій виробництва енергії з твердої біомаси в Україні. Частина 2. Деревина // Промислова теплотехніка. 2013, т. 35, № 4, с.56-62.

46. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А. Барьеры для развития биоэнергетики в Украине. Часть 1 // Промышленная теплотехника. 2013, т. 35, № 4, с.63-71.

47. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А. Барьеры для развития биоэнергетики в Украине. Часть 2 // Промышленная теплотехника. 2013, т. 35, № 5, с.43-47.

48. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Олейник Е.Н. Перспективы производства тепловой энергии из биомассы в Украине // Промышленная теплотехника. 2013, т. 35, № 5, с.48-57.

49. Гелету́ха Г.Г., Железна́ Т.А., Олейник Е.Н., Гелету́ха А.И. Перспективи виробництва електричної енергії з біомаси в Україні // Промышленная теплотехника 2013, т. 35, № 6, с.67-75.

50. Гелету́ха Г.Г., Кучерук П.П., Матвеев Ю.Б., Куцый Д.В., Гелету́ха А.И. Перспективи виробництва і використання біогазу в Україні // Промышленная теплотехника 2013, т. 35, № 6, с.76-82.

51. Гелету́ха Г.Г., Железна́ Т.А., Дроздова О.І. Комплексний аналіз технологій виробництва енергії з біомаси // Промышленная теплотехника. 2012, т. 34, №1, с.87-95.
<http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/59059/11-Geletukha.pdf?sequence=1>

52. Гелету́ха Г.Г., Железна́ Т.А., Дроздова О.І. Аналіз механізмів стимулювання виробництва теплової енергії з біомаси в Європейському союзі // Промышленная теплотехника. 2012, т. 34, №3.- С. 67-72.

53. Гелету́ха Г.Г., Матвеев Ю.Б., Кучерук П.П., Ходаковская Т.В., Гелету́ха А.И. Аналіз необхідності застосування в Україні «зеленого» тарифу на електроенергію, вироблювану з біогазу // Промышленная теплотехника. 2012, Т.34, №4, - С.67-74.

54. Гелету́ха Г.Г., Железна́ Т.А., Дроздова О.І. Возобновляемые источники энергии в Украине: стимулы и барьеры // Промышленная теплотехника. 2012, т. 34, №5. С. 58-63.

55. Гелету́ха Г.Г., Железна́ Т.А., Жовмір М.М., Матвеев Ю.Б., Дроздова О.І. Оцінка енергетичного потенціалу біомаси в Україні. Частина 2. Енергетичні культури, рідкі біопалива, біогаз // Промислова теплотехніка. 2011, т. 33, № 1, с.57-64.
<http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/60302/09-GeletukhaNEW.pdf?sequence=1>

56. Кучерук П.П., Матвеев Ю.Б., Ходаківська Т.В., Гелету́ха Г.Г. Дослідження ефективності сумісного зброджування гною свиней та силосу кукурудзи // Механізація, екологізація і конвертація біосировини в тваринництві. 2011, №1(8) с. 92-100.

57. Гелету́ха Г.Г., Железна́ Т.А., Дроздова О.І. Аналіз механізмів стимулювання розвитку «зеленої» електроенергетики в Європейському Союзі // Промислова теплотехніка. 2011, т. 33, № 5, с.35-41.

58. Гелету́ха Г.Г., Жовмір М.М., Олійник Є.М., Радченко С.В. Біомаса як паливна сировина // Промышленная теплотехника. 2011-, т. 33, №5. с. 76-84.
<http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/60379/11-GeletukhaNEW.pdf?sequence=1>

59. Гелету́ха Г.Г. Железна́ Т.А. Сучасний стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні. Частина 2 // Промышленная теплотехника. 2010. Т. 32, № 4. с. 94-100.
<http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/60593/12-Geletukha.pdf?sequence=1>

60. Гелету́ха Г.Г., Жовмір М.М., Олійник Є.М., Радченко С.В. Особливості теплотехнічних випробувань водогрійних котлів з періодичним спалюванням цілих тюків соломи // Промышленная теплотехника. 2010, т. 32, №6. с. 45-51.

<http://dspace.nbuiv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/60620/07-Geletukha.pdf?sequence=1>

61. Г.Г. Гелету́ха, Т.А. Желе́зна, М.М. Жовмі́р, Ю.Б. Матвеев, О.І. Дроздова. Оцінка енергетичного потенціалу біомаси в Україні. Частина 1. Відходи сільського господарства та деревна біомаса // Промышленная теплотехника. 2010. Т. 32, № 6. с. 58-65.

<http://dspace.nbuiv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/60622/09-GeletukhaNEW.pdf?sequence=1>

62. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Матвеев Ю.Б., Жовмі́р М.М. Використання місцевих видів палива для виробництва енергії в Україні // Промышленная теплотехника. 2006, т. 28, № 2, с. 85-93.

<http://dspace.nbuiv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/61394/12-Geletukha.pdf?sequence=1>

63. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Жовмі́р М.М. Виробництво енергії з місцевих видів палива в Україні // Науковий вісник Національного аграрного університету. 2006, вип. 95. с. 118-127.

64. Гелету́ха Г.Г., Желе́зная Т.А., Жовмі́р Н.М., Матвеев Ю.Б. Современное состояние и перспективы развития биоэнергетики в Украине // Промышленная теплотехника. 2005, т. 27, № 1, с. 78-85.

65. Гелету́ха Г.Г., Желе́зная Т.А., Тишаев С.В., Кобза́рь С.Г. Развитие биоэнергетических технологий в Украине // Экотехнологии и ресурсосбережение. 2002. № 3, с. 3-11.

Наукові праці, які засвідчують апробацію результатів дисертації:

66. Geletukha G., Zheliezna T. Bioenergy in Ukraine: State of the art and prospects for the development // Proceedings of 18th European Biomass Conference and Exhibition, 3-7 May 2010, Lyon, France. – P. 2106-2108. URL: https://euea-energyagency.org/wp-content/uploads/2012/08/OC12_4_Geletukha_Paper_18_BM_Conf_Lyon_2010a.pdf

67. Geletukha G., Edward Smeets, APC Faaijs and others. A Review and Harmonization of Biomass Resources Assessments // Proceedings of 17th European Biomass Conference & Exhibition “From Research to Industry and Markets”, Hamburg, Germany, 29 June-03 July 2009, P. 364-374.

68. Geletukha, G., Zheleyezna, T., Matveev, Y., Zhovmir, M. Analysis of the Present State and Prospects for Bioenergy Development in Ukraine // Proceedings of 16th European Biomass Conference and Exhibition «From Research to Industry and Markets», 2-6 June 2008, Valencia, Spain, p. 2570-2573.

69. G.Geletukha, P.Kucheruk, Yu.Matveev. Status and prospects of biogas energy use in Ukraine // Proceedings of the International Conference “Progress in Biogas. Biogas production from agricultural biomass and organic residues”, 18-21 September 2007, Stuttgart, Germany, p.29-34. URL: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21085528>

70. T. Zhelyezna, G. Geletukha, O. Morozova. Production of Liquid Biofuels in Ukraine: Present Status and Prospects // Proceedings of 15th European Biomass conference. 7-11 May 2007, Berlin, Germany, p. 2628-2630.

71. Sergii Chaplygin, Mykola Zhovmir, Georgiy Geletukha, Yevgen Oliynik. Experimental investigation of baled straw burning // Book of proceedings 3rd International Bioenergy Conference and Exhibition BIOENERGY 2007, 3-7 September 2007, Jyvaskyla, Finland, p. 535-539.

72. M. Zhovmir, G. Geletukha, S. Chaplygin, Ye. Oliynik. Energy Efficiency and Pollutants Emission at Whole Straw Bales Combustion // Proceedings of 15th European Biomass Conference and Exhibition From Research to Market Deployment, 7-11 May 2007, Berlin, Germany, p. 2433-2435.

73. Geletukha G., Zhelyezna T., Matveev Yu., Zhovmir N. Bioenergy Development in Ukraine: Present Status, Perspectives and New Possibilities in Frame of Kyoto Protocol Mechanisms // Труды 14-й Европейской конференции «Биомасса для производства энергии, промышленности и защиты климата», 17-21 октября, 2005 г, Париж, Франция, с. 1518-1521.

74. Гелетуха Г.Г. Использование промышленных, лесных и сельскохозяйственных отходов для получения энергии в Украине // Труды 2-й МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «СОТРУДНИЧЕСТВО ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ОТХОДОВ», 9-10 февраля 2005 г., Харьков, Украина, с.332-336.

75. Гелетуха Г.Г., Матвеев Ю.Б. Системы сбора и утилизации биогаза на полигонах твердых бытовых отходов в Украине: опыт и перспективы // Труды 2-й МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «СОТРУДНИЧЕСТВО ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ОТХОДОВ», 9-10 февраля 2005 г., Харьков, Украина, с.257-260.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

76. Когенерационные системы с тепловыми двигателями: Справочное пособие в 3-х частях. Часть 3: Инновационные технологии для когенерации / Клименко В.Н., Мазур А.И., Письменный Е.Н., Багрий П.И., Гелетуха Г.Г. Київ: ИПЦ АЛКОН НАН України, 2016. 528 с.

77. Биоэнергетика в Украине: текущее состояние и перспективы развития: монография / Гелетуха Г.Г., Железная Т.А, Олейник Е.Н.. Lambert Academic Publishing, 2014. 88 с.

78. Енергетичний потенціал біомаси в Україні / уклад.: Лакида П.І., Гелетуха Г.Г., Василишин Р.Д., Железна Т.А., та ін., відповід. наук. ред.: д.с.-г.н., проф. П.І. Лакида. Київ: Видавничий центр НУБіП України, 2011. 28 с.

79. Комунальна теплоенергетика України: стан, проблеми, шляхи модернізації: колективна монографія у 2-х томах/ кол. авторів за заг. ред. А.А. Долінського, Б.І. Баска, Є.Т. Базєєва, І.А. Піроженко. Київ: ТОВ «Поліграф-Сервіс», 2007. Гелетуха Г.Г. Заходи щодо заміщення природного газу біомасою. том 2, с. 418-431.

80. Енергоефективність та енергозбереження: економічний, техніко-технологічний та екологічний аспекти: колективна монографія / кол. авторів за заг. ред. П. М. Макаренка, О. В. Калініченко, В. І. Аранчій. Полтавська державна аграрна академія, Опольський університет (Польща). Полтава: ПП «Астроя», 2019. 603 с. Гелетуха Г.Г., Олійник Є.М., Зубенко В.І. Роль біомаси для досягнення глобальних та національних цілей зі зниження викидів

парникових газів, с. 457-462. Гелету́ха Г.Г., Анто́ненко В.О., Ра́дченко С.В. Забезпечення екологічних вимог при виробництві енергії з біомаси, с 463-468. Гелету́ха Г.Г., Олі́йник Є.М., Зу́бенко В.І. Енергетичні властивості біомаси та економічна ефективність виробництва теплової енергії, с 469-474.

81. Проведення комплексного дослідження ринку котлів, що працюють на біомасі в Україні / Г.Гелету́ха, Є.Олі́йник, В.Анто́ненко, С.Чапли́гін, В.Зу́бенко, С.Ра́дченко. Програма розвитку ООН. Київ, 2016. 212 с.

82. Комплексний аналіз українського ринку пелет з біомаси / Г.Гелету́ха, В.Крама́р, О.Епі́к, Т.Анто́щук, В.Ті́тков. Програма розвитку ООН. Київ, 2016. 334 с.

83. Підготовка та впровадження проектів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні: практ. посіб. / Олі́йник Є., Анто́ненко В., Чапли́гін С., Зу́бенко В., Же́lezна Т., Га́йдаї О., Крама́р В., Епі́к О. за ред. Г. Гелету́хи. Київ.: Поліграф плюс, 2015. 72 с.

84. Практичний посібник з використання біомаси у муніципальному секторі України (для представників агропромислового комплексу) / Г.Гелету́ха, С.Драгне́в, П.Кучеру́к, Ю.Ма́твеев. Програма розвитку ООН. Київ, 2017. 70 с.

85. Практичний посібник з використання біомаси у муніципальному секторі України (для представників державних установ та громадських організацій, що працюють в сфері екології) / Г.Гелету́ха, Ю.Ма́твеев, Є.Олі́йник, Д.Ку́ций. Програма розвитку ООН. Київ, 2017. 54 с.

86. Развитие биогазовых технологий в Украине и Германии: нормативно-правовое поле, состояние и перспективы / Г.Г. Гелету́ха, П. Кучеру́к, Ю. Ма́твеев, Д. Нау́менко, А Стане́в, Л. Мати́юк. Киев-Гюльцов FNR, 2013. 72 с.

87. Організаційно-економічні механізми модернізації теплоенергетики України: тематичний збірник матеріалів / заг. ред. чл.-кор. НАНУ Б.І. Баска. Київ: Калита, 2015. Гелету́ха Г.Г., Же́lezна Т.А., Драгне́в С.В. Ефективність застосування поточних організаційних заходів виконавчої влади з енергоефективності, енергозбереження та зменшення споживання природного газу. с. 179-187.

88. Гелету́ха Г.Г., Же́lezна Т.А., Башто́вий А.І. Проблеми та перспективи розвитку когенерації в Україні. // Теплофізика та теплоенергетика: Том 41 № 1 (2019), с. 59-66. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2019.8>

89. Гелету́ха Г.Г., Же́lezна Т.А., Башто́вий А.І. Проблеми та перспективи довгострокового планування у секторі тепlopостачання України. // Теплофізика та Теплоенергетика: Том 41 № 2 (2019), с. 72-77. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2019.10>

90. Установка для швидкого піролізу біомаси: пат. [на винахід](#) Україна № 116598; заявл. 20.12.2016; опубл. 10.04.2018, бюл. № 7. Гелету́ха Г.Г.; Зу́бенко В.І.; Анто́щук Т.О.; Епі́к О.В.

ABSTRACT

Geletukha G.G. Scientific and Technical Principles of Energy Production from Biofuels. - Manuscript.

Thesis for obtaining the doctor of sciences degree in technical sciences on the specialty 05.14.08 - transformation of renewable energy sources. - Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

The thesis is devoted to the development of scientific and technical principles of production and consumption of biofuels, in particular to the improvement of technologies of collection, combustion and anaerobic fermentation of agricultural residues.

The introduction shows the relevance of this area of research and substantiates the choice of the thesis topic, formulates the purpose and objectives of the study, scientific novelty and practical significance of the results, the connection with scientific programs, topics, plans, personal contribution, status of publications and approbation of the thesis results, provides information on their implementation and indicates the structure of work.

The first section provides a comprehensive analysis of the current state of development of technologies for the production and consumption of biofuels. The comparison of bioenergy development in the EU, the world and in Ukraine is analyzed and performed. Today in Ukraine the development of these technologies lags far behind the EU and the world. A review of methodological approaches for assessing the energy potential of biomass, a review of the experience of legislative regulation and state support of bioenergy, a review of technologies for combustion and anaerobic digestion of biomass. It is concluded that to date in Ukraine the regulatory framework and theoretical principles and methodological apparatus, methods and means of using biofuels, in particular, solid biofuels and biogas and biomethane from agricultural raw materials are insufficiently developed.

Based on the analysis, the key tasks are identified and the current scientific and technical problem is formulated, which is the need to develop scientific principles and a set of technologies for production and consumption of biofuels, in particular, solid biofuels and biogas and biomethane from agricultural raw materials. The main objectives of the study to solve the problem are identified.

The second section is devoted to the development of strategic principles for the development of bioenergy in Ukraine. In particular, a method for estimating the energy potential of biomass has been developed, which specifies the percentage of theoretical potential of cereal straw and other residues of agricultural crops that can be used for energy production, and takes into account new current and forecast

parameters of this potential. Based on the developed methodology, the energy potentials of biomass of a number of regions and Ukraine as a whole were assessed.

The third section is devoted to the development of scientific principles of production and consumption of biofuels. Scientific principles of harvesting and energy use of corn residues have been developed for the conditions of Ukraine, which are based on the analysis of possible technologies of corn harvesting on the basis of various agricultural machines, taking into account available equipment and field test results in the USA and the EU. The analysis of energy efficiency (according to the indicators of total reduced energy consumption and energy conversion factor) and reduction of greenhouse gas emissions when using corn in the form of bales, pellets and briquettes for heat production. Scientific bases of power generating capacities on biomass, biogas and biomethane for balancing of power system of Ukraine are developed.

The fourth section is devoted to experimental research and development of technologies and equipment for the production and consumption of biofuels. The technology of wood waste combustion in boilers with a retort type combustion device has been developed, which has allowed to expand the scope of technology for wood fuel with humidity up to 50%, the fuel may have a heterogeneous fractional composition, and its maximum particle size is determined by screw feeder capacity. Straw combustion technology in periodic combustion boilers has been developed, in which by stable optimization and elimination of incomplete combustion indicators of the current thermal capacity of the boiler, reduction of CO emissions.

The technology of burning small straw bales in retort-cigar type boilers has been developed, which includes a tray-type loading device, in which continuous burning of whole small straw bales is organized, their stable combustion together with moderate emissions of harmful substances is ensured. The technology of anaerobic fermentation of agricultural waste and residues (straw, corn stalks, sunflower husks) was developed.

The fifth section is devoted to the feasibility study of technologies for the production and consumption of biofuels. Feasibility studies of a number of new and promising bioenergy technologies for Ukraine have been completed: procurement of corn maize; production of pellets and briquettes from corn; anaerobic fermentation of agricultural waste and residues; production and use of biomethane.

The results of the study were implemented at the enterprises of the country and in the educational process of higher educational institutions, in particular:

- The technology of wood waste incineration in boilers with a retort-type furnace device has been introduced at the boiler-manufacturing plant of Volyn-Kalvis LLC.
- Technologies for burning straw in periodic boilers and burning small bales of straw in retort-cigar type boilers have been introduced in Krieger Boiler Plant LLC.

- The results of experimental studies of anaerobic digestion of agricultural waste and residues (straw, corn stalks, sunflower husks) are implemented in PJSC "MHP Eco Energy".

- Methodology for assessing the energy potential of biomass of Ukraine and feasibility study of corn by-products, production of pellets and briquettes from corn by-products, anaerobic fermentation of agricultural waste and residues, production and use of biomethane introduced in the educational process of the Department of Economic Theory Faculty of Agrarian Management of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine.

- The developed draft laws were submitted to the State Agency for Energy Efficiency and the Committee on Energy and Housing of the Verkhovna Rada of Ukraine.

Key words: biofuels, biomass, biomass combustion, anaerobic digestion, energy efficiency, harmful emissions.

List of applicant's publications

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Biological resources and technologies of biofuel production: Monograph / YB Blum, GG Geletukha, IP Grigoryuk, KV Dmytruk, VO Dubrovin, AI Yemets, GM Zabarny, GM Kaletnik, MD Melnychuk, VG Mironenko, DB Rakhmetov, AA Sibirnyi, SP Tsygankov. Kyiv: Agrar Media Group, 2010. 408 p.

2. The latest technologies of bioenergy conversion: Monograph / YB Blum, GG Geletukha, IP Grigoryuk, VO Dubrovin, AI Yemets, GM Zabarny, GM Kaletnik, MD Melnichuk, VG Mironenko, DB Rakhmetov, SP Tsigankov. Kyiv: Agrar Media Group, 2010. 326 p.

3. Promoting sustainable use of underutilized lands for bioenergy production through a web-based platform for Europe / G. Geletukha, C. Khawaja, R. Janssen, D. Rutz and others // Proceedings of the 27th European Biomass Conference and Exhibition, 27- 30 May 2019, Lisbon, Portugal. p. 1921 - 1924, DOI: 10.5071 / 27thEUBCE2019-ICO.12.3. ISSN 2282-5819. Indexed in Scopus.

4. Fostering sustainable feedstock production for advanced biofuels on underutilized land in Europe / Georgiy Geletukha, Rita Mergner, Rainer Janssen, Dominik Rutz and others // Proceedings of the 25th European Biomass Conference and Exhibition, 12-15 June 2017, Stockholm, Sweden, p . 125-130. DOI: 10.5071 / 25thEUBCE2017-1CO.5.5. ISSN 2282-5819. Indexed in Scopus.

5. Development of ecologically friendly technology for gasification of municipal solid wastes / Slenkin M., Geletukha G. // In: Sheffield J.W., Sheffield Ç. (eds) Assessment of Hydrogen Energy for Sustainable Development. NATO Science for

Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht, 2007. p. 243-247. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6442-5_20 Indexed in Scopus.

6. Energy potential of biomass in Ukraine / Geletukha GG, Martsenyuk ZA // Heat Transfer Research: Volume 29 № 6 (1998), pp. 433-437 (ISSN: 1064-2285) <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27751211> Indexed in Scopus.

7. Producer gas cleaning from tars in a vortex bubbling device / Aznar MR, Borisov II, Geletukha GG, Corella J., Khalatov AA. and others // Heat Transfer Research: Volume 30 № 1 (1999), pp. 50-58 (ISSN: 1064-2285). Indexed in Scopus.

8. Water boiling at tubular surfaces formed by cavities / Khalatov AA, Kovalenko GV, Geletukha GG // Heat Transfer Research: Volume 29 № 1 (1998), pp. 8-13 (ISSN: 1064-2285). Indexed in Scopus.

9. Heat transfer from a horizontal cylinder with cavities under water pool boiling conditions / Khalatov AA, Kovalenko GV, Geletukha GG // Heat Transfer Research: Volume 29 № 4 (1998), pp. 275-280 (ISSN: 1064-2285). Indexed in Scopus.

10. Heat exchange during cooling of the producer gas in vortex bubbling unit / Borisov II, Khalatov AA, Geletukha GG, Kobzar 'SG, Shevtsov SV. // Xinxing Jianzhu Cailiao // New Building Materials, January 1998. Indexed in Scopus.

11. Geletukha George. Analysis of the concept of green energy transition of Ukraine until 2050 // Bioenergy: 2020, № 1 (15), p. 38-39.

12. G.G. Geletukha, T.A. Zheliezna, S.V. Drahnev, A.I. Bashtovyi. Potential and prospects of energy use of agrobiomass in Ukraine. // Thermophysics and Thermal Power Engineering: Volume 42 № 1 (2020), p. 42-51. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2020.5>

13. Geletukha GG, T.A. Zheliezna, A.I. Bashtovyi. Roadmap for the development of bioenergy in Ukraine until 2050 // Thermophysics and thermal energy, 2020. - Vol. 42, №2. - P. 60-67. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2020.6>

14. Geletukha, G. Analysis of the production of pellets and briquettes from by-products of corn for grain in Ukraine. // Thermophysics and thermal energy, 2020. - Vol. 42, №2. - P. 83-91. <http://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/399>

15. Geletukha, G. Application of CHP on Biomass for Balance of the Energy Sustum of Ukraine. // Thermophysics and thermal energy, 2020. - Vol. 42, №3. - P. 47-55. <http://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/405>

16. G.G. Geletukha, T.A. Zheliezna, S.V. Drahnev, A.I. Bashtovyi. Analysis of the possibilities of production and consumption of fuel briquettes from biomass of agricultural origin in Ukraine. Part 2. // Thermophysics and Thermal Power Engineering: Volume 41 № 1 (2019), p. 67-73. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2019.9>

17. G.G. Geletukha, T.A. Zheliezna, S.V. Drahnev, A.I. Bashtovyi. Analysis of barriers to agrobiomass energy production in Ukraine. Part 1. // Thermophysics and

Thermal Power Engineering: Volume 41 № 3 (2019), p. 77-84.
<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2019.11>

18. Geletukha GG, Zhelezna TA, Dragnev SV, Bashtovy AI. Analysis of barriers to agrobiomass energy production in Ukraine. Part 2 // Thermophysics and thermal power engineering. 2019, vol. 41, № 4, p. 44-50.
<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2019.6>

19. Geletukha GG, Zhelezna TA, Dragnev SV, Bashtovy AI. Analysis of wood fuel procurement opportunities in the forests of Ukraine // Industrial Heat Engineering. 2018, vol. 40, № 1, p. 61-67. <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2018.09>

20. Geletukha GG, Zhelezna TA, Dragnev SV, Bashtovy AI. Prospects for the use of biomass from pruning and removal of perennial agricultural plantations for energy production in Ukraine // Industrial Heat Engineering. 2018, vol. 40, № 1, p. 68-74. <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2018.10>

21. Geletukha GG, Zhelezna TA, Bashtovy AI, Geletukha GI. Problems and prospects of bioenergy development in Ukraine // Industrial heat engineering. 2018, vol. 40, № 2, p. 41-48. <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2018.06>

22. Geletukha GG, Zhelezna TA, Dragnev SV, Bashtovy AI, Rogovsky IL. Substantiation of standard projects of production and consumption of fuel briquettes from agrobiomass in Ukraine // Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: machinery and energy of agro-industrial complex. 2018, issue 282, p. 173-181. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2018_282_16

23. Geletukha GG, Zhelezna TA, Dragnev SV, Bashtovy AI. Analysis of the possibilities of production and consumption of fuel briquettes from biomass of agricultural origin in Ukraine. Part 1. // Industrial heating. 2018, vol. 40, № 4, p. 62-68 <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.09>

24. Geletukha GG, Zhelezna TA, Bashtovy AI. Energy and ecological analysis of technologies for electricity production from solid biomass. Part 1 // Industrial heat engineering. 2017, vol. 39, № 1, p. 58-64. <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2017.09>

25. Geletukha GG, Zhelezna TA. State and prospects of bioenergy development in Ukraine // Industrial heat engineering. 2017, vol. 39, № 2, p. 60-64. <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2017.09>

26. Geletukha GG, Zhelezna TA, Bashtovy AI. Energy and ecological analysis of technologies for electricity production from solid biomass. Part 2 // Industrial heat engineering. 2017, vol. 39, № 3, p. 73-77. <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2017.11>

27. Dragnev SV, Zhelezna TA, Geletukha GG. Possibilities of harvesting by-products of corn for grain for energy use in Ukraine. Part 1 // Bioenergy / Bioenergy. 2016, №1 (7). with. 18-22.

28. Dragnev SV, Zhelezna TA, Geletukha GG. Possibilities of procurement of by-products of corn for grain for energy use in Ukraine. Part 2 // Bioenergy / Bioenergy. - 2016, №2 (8). with. 16-20.

29. Geletukha GG, Zhelezna TA, Bashtovy AI. Analysis of energy strategies of the EU and the world and the role of renewable energy sources in them. Part 1 // Industrial heat engineering. 2016, vol. 38, № 2, p. 56-64. <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2016.07>

30. Geletukha GG, Zhelezna TA, Bashtovy AI. Analysis of energy strategies of the EU and the world and the role of renewable energy sources in them. Part 2 // Industrial heat engineering. 2016, vol. 38, № 3, p. 57-66. <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2016.08>

31. Zhelezna TA, Bashtovy AI, Geletukha GG. Analysis of the possibility of obtaining wood fuel from additional sources in Ukraine // Industrial Heat Engineering. 2016, vol. 38, № 4, p. 71-77. <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2016.08>

32. Geletukha GG, Zheleznaya TA, Drozdova OI. Energy and ecological analysis of biomass energy production technologies. Part 2 // Industrial heat engineering. 2015, vol. 37, № 1, p. 53-62. <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2015.07>

33. Geletukha GG, Zheleznaya TA, Kucheruk PP, Oleynik EN, Triboy AV. Bioenergy in Ukraine: current status and development prospects. Part 1 // Industrial heat engineering. 2015, vol. 37, № 2, p. 68-76. <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2015.08>

34. Geletukha GG, Zheleznaya TA, Kucheruk PP, Oleynik EN, Triboy AV. Bioenergy in Ukraine: current status and development prospects. Part 2 // Industrial heat engineering. 2015, vol. 37, № 3, p. 65-73. <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2015.08>

35. Geletukha GG, Zheleznaya TA, Triboy AV. Prospects for growing and using energy crops in Ukraine. Part 1. // Industrial heat engineering. 2015, vol. 37, № 4, p. 53-60. <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2015.06>

36. Geletukha GG, Zheleznaya TA, Triboy AV. Prospects for growing and using energy crops in Ukraine. Part 2. // Industrial heat engineering. 2015, vol. 37, № 5, p. 58-67. <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2015.07>

37. Geletukha GG, Zhelezna TA. Bioenergy in Ukraine: state of development, barriers and ways to overcome // Bioenergy. 2014, № 1 (3), p. 16-19.

38. Geletukha GG, Kramar VG. Methods of preliminary technical and economic assessment and selection of steam turbines for CHP projects on biomass in municipal heat supply. Part 1 // Industrial heat engineering 2014. vol. 36, №1. with. 66-73.

39. Geletukha GG, Kramar VG. Methods of preliminary technical and economic assessment and selection of steam turbines for CHP projects on biomass in municipal heat supply. Part 2 // Industrial heat engineering 2014. vol. 36, №2. with. 78-85.

40. Geletukha GG, Zheleznaya TA, Triboy AV. Prospects for the use of agricultural waste for energy production in Ukraine. Part 1 // Industrial heat engineering. 2014, v. 36, № 4, p.36-42.
41. Geletukha GG, Zheleznaya TA, Triboy AV. Prospects for the use of agricultural waste for energy production in Ukraine. Part 2 // Industrial heat engineering. 2014, v. 36, № 5, pp.73-80.
42. Geletukha GG, Zheleznaya TA, Drozdova OI. Energy and ecological analysis of biomass energy production technologies. Part 1 // Industrial heat engineering. 2014, vol. 36, № 6, pp.78-88.
43. Geletukha GG, Zheleznaya TA. The place of bioenergy in the project of the updated Energy Strategy of Ukraine until 2030 // Industrial Heat Engineering. 2013, v. 35, № 2, p.64-70.
44. Geletukha GG, Zheleznaya TA, Drozdova OI. Comprehensive analysis of technologies for energy production from solid biomass in Ukraine. Part 1. Straw // Industrial heat engineering. 2013, v. 35, № 3, p.56-63.
45. Geletukha GG, Zheleznaya TA, Drozdova OI. Comprehensive analysis of technologies for energy production from solid biomass in Ukraine. Part 2. Wood // Industrial heat engineering. 2013, v. 35, № 4, p.56-62.
46. Geletukha GG, Zheleznaya TA. Barriers to the development of bioenergy in Ukraine. Part 1 // Industrial heat engineering. 2013, v. 35, № 4, p.63-71.
47. Geletukha GG, Zheleznaya TA. Barriers to the development of bioenergy in Ukraine. Part 2 // Industrial heat engineering. 2013, v. 35, № 5, pp.43-47.
48. Geletukha GG, Zheleznaya TA, Oleynik EN. Prospects for the production of thermal energy from biomass in Ukraine // Industrial Heat Engineering. 2013, v. 35, № 5, pp.48-57.
49. Geletukha GG, Zheleznaya TA, Oleynik EN, Geletukha AI. Prospects for the production of electricity from biomass in Ukraine // Industrial Heat Engineering 2013, vol. 35, № 6, p.67-75.
50. Geletukha GG, Kucheruk PP, Matveev YB, Kutsy DV, Geletukha AI. Prospects for the production and use of biogas in Ukraine // Industrial Heat Engineering 2013, vol. 35, № 6, p.76-82.
51. Geletukha GG, Zheleznaya TA, Drozdova OI. Comprehensive analysis of energy production technologies from biomass // Industrial Heat Engineering. 2012, vol. 34, №1, pp.87-95.
52. Geletukha GG, Zheleznaya TA, Drozdova OI. Analysis of mechanisms for stimulating the production of thermal energy from biomass in the European Union // Industrial Heat Engineering. 2012, v. 34, №3.- P. 67-72.

53. Geletukha GG, Matveev Yu.B., Kucheruk PP, Khodakovskaya TV, Geletukha AI. Analysis of the need to apply in Ukraine a "green" tariff for electricity generated from biogas // *Industrial Heat Engineering*. 2012, T.34, №4, - P.67-74.

54. Geletukha GG, Zheleznaya TA, Drozdova OI. Renewable energy sources in Ukraine: incentives and barriers // *Industrial Heat Engineering*. 2012, vol. 34, №5. Pp. 58-63.

55. Geletukha GG, Zhelezna TA, Zhovmir MM, Matveev YB, Drozdova OI. Assessment of biomass energy potential in Ukraine. Part 2. Energy crops, liquid biofuels, biogas // *Industrial Heat Engineering*. 2011, v. 33, № 1, p.57-64.

56. Kucheruk PP, Matveev YB, Khodakivska TV, Geletukha GG. Research of efficiency of joint fermentation of pig manure and corn silage // *Mechanization, greening and conversion of bio raw materials in animal husbandry*. 2011, №1 (8) p. 92-100.

57. Geletukha GG, Zhelezna TA, Drozdova OI. Analysis of mechanisms to stimulate the development of "green" electricity in the European Union // *Industrial Heat Engineering*. 2011, v. 33, № 5, pp.35-41.

58. Geletukha GG, Zhovmir MM, Oliynyk EM, Radchenko SV. Biomass as a fuel raw material // *Industrial heat engineering*. 2011-, vol. 33, №5. with. 76-84.

59. Geletukha GG, Zhelezna TA. Current state and prospects of bioenergy development in Ukraine. Part 2 // *Industrial Heat Engineering*. 2010. T. 32, № 4. p. 94-100. <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/60593/12-Geletukha.pdf?sequence=1>

60. Geletukha GG, Zhovmir MM, Oliynyk EM, Radchenko SV. Features of thermal tests of hot water boilers with periodic combustion of whole bales of straw // *Industrial Heat Engineering*. 2010, vol. 32, №6. with. 45-51.

61. Geletukha GG, Zhelezna TA, M.M. Zhovmir, Yu.B. Matveev, OI Drozdova. Assessment of biomass energy potential in Ukraine. Part 1. Agricultural waste and wood biomass // *Industrial Heat Engineering*. 2010. T. 32, № 6. s. 58-65.

62. Geletukha GG, Zhelezna TA, Matveev YB, Zhovmir MM. The use of local fuels for energy production in Ukraine // *Industrial Heat Engineering*. 2006, vol. 28, № 2, p. 85-93.

63. Geletukha GG, Zhelezna TA, Zhovmir MM. Energy production from local fuels in Ukraine // *Scientific Bulletin of the National Agrarian University*. 2006, issue 95. s. 118-127.

64. Geletukha GG, Zheleznaya TA, Zhovmir NM, Matveev Yu.B. The current state and prospects for the development of bioenergy in Ukraine // *Industrial Heat Engineering*. 2005, vol. 27, № 1, p. 78-85.

65. Geletukha GG, Zheleznaya TA, Tishaev SV, Kobzar SG. Development of bioenergy technologies in Ukraine // Ecotechnologies and resource saving. 2002. № 3, p. 3-11.

Scientific works that certify the approbation of the dissertation results:

66. Bioenergy in Ukraine: State of the art and prospects for the development. / Geletukha G., Zheliezna T. // Proceedings of the 18th European Biomass Conference and Exhibition, 3-7 May 2010, Lyon, France. - P. 2106-2108. URL: https://euea-energyagency.org/wp-content/uploads/2012/08/OC12_4_Geletukha_Paper_18_BM_Conf_Lyon_2010a.pdf

67. A Review and Harmonization of Biomass Resources Assessments / Geletukha G., Edward Smeets, APC Faaijs and others. // Proceedings of the 17th European Biomass Conference & Exhibition "From Research to Industry and Markets", Hamburg, Germany, 29 June-03 July 2009, P. 364-374.

68. Analysis of the Present State and Prospects for Bioenergy Development in Ukraine / Geletukha, G., Zheleyezna, T., Matveev, Y., Zhovmir, M. // Proceedings of the 16th European Biomass Conference and Exhibition «From Research to Industry and Markets », 2-6 June 2008, Valencia, Spain, p. 2570-2573.

69. Status and prospects of biogas energy use in Ukraine / G.Geletukha, P.Kucheruk, Yu.Matveev. // Proceedings of the International Conference "Progress in Biogas. Biogas production from agricultural biomass and organic residues ", 18-21 September 2007, Stuttgart, Germany, p.29-34. URL: <https://www.osti.gov/etdweb/biblio/21085528>

70. Production of Liquid Biofuels in Ukraine: Present Status and Prospects / T. Zhelyezna, G. Geletukha, O. Morozova // Proceedings of the 15th European Biomass conference and Exhibition from research to market deployment. 7-11 May 2007, Berlin, Germany, p. 2628-2630.

71. Experimental investigation of baled straw burning / Sergii Chaplygin, Mykola Zhovmir, Georgiy Geletukha, Yevgen Oliynik. // Book of proceedings 3rd International Bioenergy Conference and Exhibition BIOENERGY 2007, 3-7 September 2007, Jyvaskyla, Finland, p. 535-539.

72. Energy Efficiency and Pollutants Emission at Whole Straw Bales Combustion / M. Zhovmir, G. Geletukha, S. Chaplygin, Ye. Oliynik // Proceedings of the 15th European Biomass Conference and Exhibition From Research to Market Deployment, 7-11 May 2007, Berlin, Germany, p. 2433-2435.

73. Bioenergy Development in Ukraine: Present Status, Perspectives and New Possibilities in the Framework of Kyoto Protocol Mechanisms / Geletukha G., Zhelyezna T., Matveev Yu., Zhovmir N. // Proceedings of the 14th European

Conference "Biomass for Energy Production, Industry and Climate Protection ", October 17-21, 2005, Paris, France, p. 1518-1521.

74. The use of industrial, forest and agricultural waste for energy production in Ukraine / Geletukha GG // Proceedings of the 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE "COOPERATION TO SOLVE THE WASTE PROBLEM", February 9-10, 2005, Kharkiv, Ukraine, p.332-336.

75. Systems of collection and utilization of biogas at landfills of solid household waste in Ukraine: experience and prospects / Geletukha GG, Matveev Yu.B. // Proceedings of the 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE "COOPERATION TO SOLVE THE WASTE PROBLEM", February 9-10, 2005, Kharkiv, Ukraine, p.257-260.

Scientific works that certify the approbation of the dissertation results:

76. Cogeneration systems with heat engines: Reference manual in 3 parts. Part 3: Innovative technologies for cogeneration / Klimenko VN, Mazur AI, Pysmennyi EN, Bagriy PI, Geletukha GG. Kyiv: IPC ALCON NAS of Ukraine, 2016. 528 p.

77. Bioenergy in Ukraine: the current state and prospects of development: a monograph / Georgy Geletukha, Tatiana Zheleznaya, Eugene Oleynik. Lambert Academic Publishing, 2014. 88 p.

78. Energy potential of biomass in Ukraine / compiled by: Lakida PI, Geletukha GG, Vasilyshyn RD, Zhelezna TA, etc., answer. Science. ed. : Ph.D., prof. P.I. Lakida. Kyiv: Publishing Center of NULES of Ukraine, 2011. 28 p.

79. Communal heat energy of Ukraine: state, problems, ways of modernization: collective monograph in 2 volumes / col. authors for the general. ed. A.A. Dolinsky, BI Baska, ET Bazeeva, IA Pirozhenko. Kyiv: Poligraf-Service LLC, 2007. Geletukha GG. Measures to replace natural gas with biomass. volume 2, p. 418-431.

80. Energy efficiency and energy saving: economic, technical and technological and environmental aspects: a collective monograph / col. authors for the general. ed. PM Makarenko, OV Kalinichenko, VI Aranchiy. Poltava State Agrarian Academy, Opole University (Poland). Poltava: PP "Astraya", 2019. 603 p. Geletukha GG, Oliynyk EM, Zubenko VI The role of biomass to achieve global and national goals for reducing greenhouse gas emissions, p. 457-462. Geletukha GG, Antonenko VO, Radchenko SV. Ensuring environmental requirements for energy production from biomass, pp. 463-468. Geletukha GG, Oliynyk EM, Zubenko VI. Energy properties of biomass and economic efficiency of thermal energy production, pp. 469-474.

81. Carrying out of complex research of the market of the boilers working on biomass in Ukraine / G. Geletukha, E. Oliynyk, V. Antonenko, S. Chaplygin, V. Zubenko, S. Radchenko. UN Development Program. Kyiv, 2016. 212 p.

82. Comprehensive analysis of the Ukrainian market of biomass pellets / G. Geletukha, V. Kramar, O. Epik, T. Antoshchuk, V. Titkov. UN Development Program. Kyiv, 2016. 334 p.

83. Preparation and implementation of projects to replace natural gas with biomass in the production of thermal energy in Ukraine: practice. way. / Oliynyk E., Antonenko V., Chaplygin S., Zubenko V., Zhelezna T., Gaidai O., Kramar V., Epik O., ed. G. Geletukha. Kyiv.: Polygraph Plus, 2015. 72 p.

84. Practical manual on the use of biomass in the municipal sector of Ukraine (for representatives of the agro-industrial complex) / G. Geletukha, S. Dragnev, P. Kucheruk, Y. Matveev. UN Development Program. Kyiv, 2017. 70 p.

85. Practical manual on the use of biomass in the municipal sector of Ukraine (for representatives of government agencies and public organizations working in the field of ecology) / G. Geletukha, Y. Matveev, E. Oliynyk, D. Kutsiy. UN Development Program. Kyiv, 2017. 54 p.

86. Development of biogas technologies in Ukraine and Germany: regulatory field, state and prospects / G.G. Geletukha, P. Kucheruk, Yu. Matveev, D. Naumenko, A. Stanev, L. Matiyuk. Kiev-Gultsov FNR, 2013. 72 p.

87. Organizational and economic mechanisms of modernization of heat power engineering of Ukraine: thematic collection of materials / general. ed. Corresponding Member NASU BI Basque. Kyiv: Kalita, 2015. Geletukha GG, Zhelezna TA, Dragnev SV. Effectiveness of application of current organizational measures of the executive power on energy efficiency, energy saving and reduction of natural gas consumption. with. 179-187.

88. G.G. Geletukha, T.A. Zheliezna, A.I. Bashtovyi. Problems and prospects of cogeneration development in Ukraine. // Thermophysics and thermal energy: Volume 41 № 1 (2019), p. 59-66. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2019.8>

89. G.G. Geletukha, T.A. Zheliezna, A.I. Bashtovyi. Problems and prospects of long-term planning in the heat supply sector of Ukraine. // Thermophysics and Thermal Power Engineering: Volume 41 № 2 (2019), p. 72-77. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2019.10>

90. Installation for rapid pyrolysis of biomass: US Pat. for the invention of Ukraine № 116598; declared 20.12.2016; publ. 10.04.2018, bul. № 7. Geletukha GG; Zubenko VI; Antoshchuk TO; Epic OV.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	26
ВСТУП	28
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГІЇ З БІОЛОГІЧНИХ ВИДІВ ПАЛИВА	37
1.1. Розвиток біоенергетики в світі і в Україні	37
1.2. Методологічні підходи для оцінки енергетичного потенціалу біомаси.	47
1.3. Технології спалювання біомаси	51
1.4. Дослідження з анаеробного зброджування ПП АПК (солома, стебла кукурудзи, лушпиння соняшника)	60
1.5. Виробництво та споживання біометану	67
1.6. Формулювання науково-прикладної проблеми та постановка завдань дослідження	73
1.7. Висновки до розділу	75
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ СТРАТЕГІЧНИХ ЗАСАД РОЗВИТКУ БІОЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ	77
2.1. Розроблення методики оцінки енергетичного потенціалу біомаси	77
2.2. Оцінка енергетичного потенціалу біомаси в Україні	90
2.3. Дорожня карта розвитку біоенергетики України до 2050 р.	105
2.4. Висновки до розділу	115
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ НАУКОВИХ ЗАСАД ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГІЇ З БІОЛОГІЧНИХ ВИДІВ ПАЛИВА	117
3.1. Збирання і енергетичне використання поживних решток кукурудзи	117
3.2. Енергетичний та екологічний аналіз життєвого циклу енергетичного використання ПП кукурудзи	131
3.3. Застосування електрогенеруючих потужностей на біомасі, біогазі і біометані для балансування енергетичної системи України	153
3.4. Висновки до розділу	166
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГІЇ З БІОЛОГІЧНИХ ВИДІВ ПАЛИВА	168

4.1. Розроблення технології та експериментальні дослідження процесів спалювання низькоякісних видів біопалива в топках з ретортною подачею і решітками допалювання	168
4.2. Розроблення технології та експериментальні дослідження процесів спалювання соломи в водогрійних котлах періодичної дії	179
4.3. Розроблення технології та експериментальні дослідження процесів спалювання малих тюків соломи в водогрійних котлах ретортно-сигарного типу	203
4.4. Експериментальні дослідження анаеробного зброджування ПП АПК (солома, стебла кукурудзи, лушпиння соняшника)	223
4.5. Висновки до розділу	251
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГІЇ З БІОЛОГІЧНИХ ВИДІВ ПАЛИВА	253
5.1. ТЕО заготівлі ПП кукурудзи	253
5.2. ТЕО виробництва гранул і брикетів з ПП кукурудзи	260
5.3. ТЕО анаеробного зброджування ПП АПК	265
5.4. ТЕО виробництва і використання біометану	276
5.5. Висновки до розділу	288
ВИСНОВКИ	291
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	294
ДОДАТОК А	313
ДОДАТОК Б	325

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Q_p^H - нижча теплота згорання
щ.м³ - щільний метр кубічний

ІНДЕКСИ

e – електричний
с.р. - суха речовина
с.м. - суха маса
т – тепловий

ОСНОВНІ СКОРОЧЕННЯ

АДЕ - альтернативні джерела енергії
АПК - агропромисловий комплекс
БГУ - біогазова установка
БМ - біомаса
БПК - біологічна потреба в кисні
ВДЕ - відновлювані джерела енергії
ВРХ - велика рогата худоба
ГУСВ - Головне управління статистики у Вінницькій області
ДССУ - Державна служба статистики України
e/e - електроенергія
ЄС - Європейський Союз
ЖКГ – житлово-комунальне господарство
ЖЦБ - жом цукрових буряків
ЗПPE - загальне постачання первинної енергії
ЗУ - Закон України
КВВП - коефіцієнт використання встановленої потужності
КГУ - когенераційна установка
КМУ - Кабінет міністрів України
КШ - киплячий шар
МБО - механіко-біологічна обробка
НВДЕ - нетрадиційні та відновлювані джерела енергії
н.е. - нафтовий еквівалент
НКРЕКП – Національна комісія, що здійснює регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг
ОВБСН - обрізка та викорчовування багаторічних сільськогосподарських

насаджень

- ОЕЗ - олійно-екстраційні заводи
- ПВХ - полівінілхлорид
- ПГ - парникові газы
- ПЕК - паливно-енергетичний комплекс
- ПЗЛС - полежахисні лісосмуги
- ПП - побічна продукція
- ПП ХПП - побічні продукти харчової переробної промисловості
- с-г - сільськогосподарський
- СК - силос кукурудзи
- СОР - суха органічна речовина
- ТЕС - теплова електрична станція
- ТЕЦ - теплоелектроцентрально
- ТЕО - техніко-економічне обґрунтування
- ТПВ - тверді побутові відходи
- у.п. - умовне паливо
- ФГ - фермерське господарство
- ХП - харчова промисловість
- ХПК - хімічна потреба в кисні
- ЦКШ - циркулюючий киплячий шар
- ЦТ - централізоване теплопостачання

- CAPEX - капітальні витрати (Capital Investment)
- IRR - внутрішня норма дохідності (Internal Rate of Return)
- NPV - чиста приведена вартість (Net Present Value)
- LCA - аналіз життєвого циклу (Life Cycle Analysis)
- ppm - часток на мільйон
- SPP - простий термін окупності (Simple Payback Period)

ВСТУП

Біомаса є перспективним джерелом відновлюваної енергії як у світі, так і в Україні. Сталий розвиток біоенергетики дає можливість зменшити залежність країни від імпортованих енергоносіїв, забезпечити ефективне використання місцевих ресурсів, розвивати місцеву економіку за рахунок надходження податків та зборів, покращити торговельно-платіжний баланс країни через зменшення обсягів імпорту енергоносіїв. Соціальний вплив очікується завдяки створенню нових робочих місць та зниженню тарифів на теплову енергію. Позитивний екологічний вплив обумовлений як деяким зменшенням шкідливих викидів при спалюванні біопалив в порівнянні зі спалюванням традиційних палив, а також тим, що біомаса є CO₂-нейтральним паливом, оскільки в процесі росту рослини поглинають такий самий обсяг CO₂, який потім виділяється при спалюванні цієї біомаси.

Вагомий внесок в розвиток науково-технічних засад виробництва енергії з біологічних видів палива зробили вітчизняні вчені Блюм Я.Б., Роїк М.В., Рахметов Д.Б., Забарний Г.М., Карп І.М., П'яних К.Є., Кудря С.О., Лакіда П.І., Калетник Г.М., Ткаченко С.Й., Губінський М.В., Дубровін В.О., Мельничук М.Д., Голуб Г.А., Кухарець С.М., Жовмір М.М., Железна Т.А., Драгнев С.В., Матвеев Ю.Б., Кучерук П.П., а також закордонні вчені Andre P.C. Faaij, Ingwald Obernberger, Jens Bo Holm Nielsen, Daniela Thrän, Amon T., Angelidaki I., Batstone D.J., Wolter Elbersen, Manolis Karampinis, Daniel Garcia Galindo, Giulia Laura Cancian, Calliope Panoutsou, Arthur Wellinger, Matt Darr, Shahabaddine Sokhansanj, Anthony F. Turhollow Jr., Hans Hartmann.

Проте цілий ряд науково-технічних задач пов'язаних з технологіями виробництва енергії з біологічних видів палива і надалі потребують свого вирішення. Зокрема, потребують розроблення стратегічні засади розвитку біоенергетики в Україні, включно з методикою оцінювання енергетичного потенціалу біомаси, оцінкою енергетичних потенціалів біомаси ряду областей та України в цілому, розробленням дорожньої карти розвитку біоенергетики України принаймні до 2050 р.

Потребують розроблення наукові засади виробництва енергії з біологічних видів палива. Зокрема, аналіз для умов України можливостей збирання і енергетичного використання пожнивних решток кукурудзи; виконання аналізу енергетичної ефективності та скорочення викидів парникових газів при використанні ПП кукурудзи у вигляді тюків, гранул та брикетів для виробництва теплової енергії; аналіз можливостей застосування електрогенеруючих потужностей на біомасі, біогазі і біометані для

балансування енергетичної системи України; аналіз можливостей виробництва і використання біометану в Україні.

Потребують подальшого розвитку технології і обладнання для виробництва енергії з біологічних видів палива. Зокрема, технологія спалювання відходів деревини в котлах з топковим пристроєм ретортного типу; технологія спалювання соломи в водогрійних котлах періодичної дії; технологія спалювання малих тюків соломи в водогрійних котлах ретортно-сигарного типу; технологія анаеробного зброджування ПП АПК.

Для практичного впровадження технологій виробництва енергії з біологічних видів палива передумовою є виконання техніко-економічних обґрунтувань цих технологій, зокрема: заготівлі ПП кукурудзи; виробництва гранул і брикетів з ПП кукурудзи; анаеробного зброджування ПП АПК; виробництва і використання біометану.

Саме тому, розвиток науково-технічних засад виробництва енергії з біологічних видів палива є актуальним питанням.

Обґрунтування вибору теми досліджень

Використання біомаси для енергетичних потреб в світі в 2017 р. становило **1112** млн т н.е./рік, з яких 86% – тверда біомаса, 7% – рідкі біопалива, 3% – тверді побутові відходи, решта – біогаз та промислові відходи (по 2% кожне). Частка біомаси складає **9,5%** у загальному постачанні первинної енергії і **13%** – у валовому кінцевому споживанні енергії у світі. Валове внутрішнє споживання біомаси в ЄС-28 складає **144** млн т н.е./рік, що еквівалентно **13,6%** загального кінцевого споживання енергії (2017 р.). За окремими секторами внесок біоенергетики наступний: в споживанні теплової енергії – 16,9%; в споживанні електроенергії – 5,6%; у секторі транспорту – 4,6%. Стійкою тенденцією є збільшення обсягів виробництва енергії з агробіомаси.

Обсяг енергії, виробленої з ВДЕ в Україні в 2018 р., у кінцевому енергоспоживанні складав **3582** тис. т н.е., що еквівалентно **7,0%** загального кінцевого споживання енергії, зокрема: в електроенергетиці – 8,9%; у системах опалення – 8,0%; у транспортному секторі – 2,2%. З них найбільший внесок зробила біоенергетика – **77,3%**. Загальне постачання первинної енергії з біопалива та відходів становило **3195** тис. т н.е., що еквівалентно заміщенню **4 млрд м³/рік** природного газу.

З аналітичного огляду сучасної науково-технічної літератури, патентів і нормативних документів, що стосуються технологій виробництва енергії з біологічних видів палива випливає, що сьогодні в Україні розвиток біоенергетичних технологій суттєво відстає від країн ЄС і світу. Це свідчить

про те, що до теперішнього часу недостатньо розроблена відповідна нормативно-правова база та теоретичні засади і методологічний апарат, методи та засоби використання біологічних видів палива, зокрема, твердих видів біопалива та біогазу і біометану, отриманих з аграрної сировини. Вищевикладене дозволяє сформулювати актуальну науково-прикладну проблему, яка полягає у недостатності існуючих закономірностей та наукових результатів для подальшого підвищення ефективності виробництва енергії з біологічних видів палива, для оцінки реального енергетичного потенціалу біомаси в Україні, для дослідження процесів заготівлі біомаси, її перетворення у тверде біопаливо, процесів спалювання та анаеробного зброджування біомаси та їх екологічного впливу на довкілля. Визначено основні завдання дослідження для вирішення поставленої проблеми. Вирішення поставленої в роботі науково-прикладної проблеми дозволить прискорити розвиток технологій для виробництва енергії з біологічних видів палива в Україні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконана у відділі теплофізичних проблем систем теплопостачання Інституту технічної теплофізики НАН України. Основні результати роботи одержано при виконанні наступних науково-дослідних робіт:

Договір з НАН України №43 «Розробка концепції розвитку біоенергетики в Україні», в рамках цільової програми прикладних досліджень НАН України «Біопаливо» у 2007-2009 рр.;

Договір з МОН України № М/79-2008 «Дослідження горіння побічної продукції кукурудзи з метою виробництва енергії»;

Договір з НАЕР № 2/08 «Дослідження та аналіз потенціалу нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії та створення на їх основі Атласу енергетичного потенціалу НВДЕ в Україні», 2008 р.;

Договір з НАН України № Об 7.7 «Оцінка технічних можливостей, енергетичної, економічної та екологічної ефективності використання біомаси на ТЕС, ТЕЦ та когенераційних станціях в Україні» комплексної програми НАН України «Об'єднання» у 2010 - 2012 рр.;

Прикладна робота № 1.7.1.824 «Розробка теплотехнологічних заходів щодо виробництва теплової енергії в котельних комунального господарства з використанням місцевих палив» (2009-2011 рр.);

Прикладна робота № 1.7.1.850 «Дослідження процесів і технологій виробництва теплоти та електроенергії з біомаси». 2012 – 2014 рр., постанова бюро ВФТПЕ НАН України від 06.12.2011 р. протокол № 17, §91, № держреєстрації 0112U005080;

Прикладна робота № 1.7.874 «Дослідження та вдосконалення технологій спалювання та анаеробного зброджування біомаси аграрного походження». 2015-2019 рр., постанова бюро ВФТПЕ НАН України від 30.09.2014 р. протокол № 13, §70, № держреєстрації 0115U000773;

Міжнародний контракт з компанією «RSJ Investments investiční společnost a.s.» (Чехія) № 3003/2018 «Вибір регіону України для можливостей інвестування в біоенергетичний проект».

Науковий керівник усіх цих проєктів – к.т.н. Гелетуха Г.Г.

Мета і завдання дослідження:

Мета дослідження – підвищення ефективності виробництва енергії з біологічних видів палива при спалюванні та анаеробному зброджуванні шляхом розроблення науково-технічних засад процесів заготівлі, обробки аграрної біомаси та виробництва енергії з твердих видів біопалива, біогазу і біометану.

Для досягнення поставленої мета в роботі необхідно вирішити такі завдання:

- розробити науково-технічні засади оцінювання енергетичного потенціалу біомаси, в яких буде уточнено відсоток теоретичного потенціалу побічної продукції (ПП) виробництва сільськогосподарських (с-г) культур, що може бути використаний для виробництва енергії, а також буде враховано нові поточні та прогнозні складові цього потенціалу; на основі розробленої методики оцінити енергетичні потенціали біомаси ряду областей та України в цілому;
- розробити дорожню карту розвитку біоенергетики України до 2050 р., яка враховуватиме динаміку застосування твердих біопалив, біогазу, біометану, рідких біопалив при виробництві теплової та електричної енергії, а також в якості моторних палив;
- визначити для умов України технічні можливості збирання і енергетичного використання ПП виробництва кукурудзи на зерно (надалі – ПП кукурудзи), які базуватимуться на аналізі економічно доцільних технологій заготівлі та виборі технічних засобів для їх виконання, беручи до уваги передовий світовий досвід;
- виконати аналіз енергетичної ефективності та скорочення викидів парникових газів при використанні ПП кукурудзи у вигляді тюків, гранул та брикетів для виробництва теплової енергії;
- проаналізувати можливості застосування електрогенеруючих потужностей на біомасі, біогазі і біометані для балансування енергетичної системи України;

- вдосконалити технологію спалювання відходів деревини в котлах з топковим пристроєм ретортного типу, яка дозволить розширити застосування технології на деревне паливо з підвищеною вологістю;
- вдосконалити технологію спалювання тюків соломи в водогрійних котлах періодичної дії, в якій будуть забезпечені більш стабільні показники поточної теплової потужності котла та зниження емісії CO₂;
- вдосконалити технологію спалювання малих тюків соломи в водогрійних котлах ретортно-сигарного типу, в якій буде організоване безперервне стабільне спалювання тюків соломи та забезпечено зниження викидів шкідливих речовин;
- отримати нові дані щодо показників виходу біогазу при розпаді поживних решток аграрно-промислового комплексу (АПК) в періодичному мезофільному процесі анаеробного зброджування;
- виконати техніко-економічні обґрунтування (ТЕО) ряду нових і перспективних для України біоенергетичних технологій: заготівлі ПП кукурудзи; виробництва гранул і брикетів з ПП кукурудзи; анаеробного зброджування аграрних відходів і залишків; виробництва і використання біометану.

Об'єкт дослідження – процеси виробництва енергії з біологічних видів палива.

Предмет дослідження – науково-технічні засади спалювання і анаеробного зброджування біомаси та закономірності викидів забруднюючих речовин і парникових газів при виробництві енергії з біологічних видів палива.

Методи дослідження – теоретичні та експериментальні методи і методики дослідження спалювання і анаеробного зброджування біомаси, енергетичного потенціалу біомаси, аналізу життєвого циклу, техніко-економічного обґрунтування технологій виробництва енергії з біомаси, які базуються на теорії вимірювань, теплообміну, математичної статистики, методах комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше із застосуванням методології оцінки життєвого циклу розроблено наукові засади виробництва теплової енергії з ПП кукурудзи, які дали можливість встановити, що використання великих тюків ПП кукурудзи забезпечує зниження споживання первинної енергії викопного палива у 10 та більше разів, а використання гранул та брикетів – у понад 5 разів.

2. Вперше запропоновано математичну модель розрахунку енергетичної та екологічної ефективності виробництва і споживання біопалива з поживних решток кукурудзи з врахуванням критеріїв сталості, яка пов'язує коефіцієнт

перетворення невідновлюваної енергії та скорочення викидів парникових газів з відстанню транспортування ПП кукурудзи у вигляді тюків, гранул та брикетів, що дало можливість оцінити енергетичну та екологічну ефективність виробництва теплової енергії з ПП кукурудзи у котлі потужністю 500 кВт.

3. Вперше на основі експериментальних досліджень встановлено закономірності зв'язків інтенсивності горіння та рівня емісії забруднюючих речовин при спалюванні відходів деревини в котлах з топковим пристроєм на основі глибокої реторти з колосниками допалювання від коефіцієнту надлишку повітря та вологості палива, що дозволило вдосконалити технологію спалювання відходів деревини в котлах з топковим пристроєм ретортного типу, використовувати деревне паливо з вологістю до 50%, збільшити інтенсивність горіння в 3-4 рази та зменшити рівень емісії забруднюючих речовин до 50%.

4. Вперше встановлено закономірності зв'язків поточної теплової потужності та рівня емісії забруднюючих речовин при спалюванні тюків соломи в водогрійних котлах періодичної дії від способів подачі та швидкості повертання сопел вторинного дуття, а також від вологості соломи, що дозволило вдосконалити технологію спалювання тюків соломи в водогрійних котлах періодичної дії, досягнути рівномірного вигорання тюка, забезпечити стабільні показники потужності котла, зменшити емісії CO.

5. Вперше встановлено закономірності, які пов'язують потенціал та швидкості виходу біогазу при розпаді пожнивних решток в періодичному мезофільному процесі анаеробного зброджування з видом пожнивних решток, способом їх попередньої обробки та початковою концентрацією органічної речовини в реакторі, що дозволило розширити сировинну базу біогазових установок пожнивними рештками сільськогосподарського виробництва.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Оцінено енергетичний потенціал біомаси в Україні в 2018 та в 2050 рр. та енергетичний потенціал біомаси ряду областей в 2014-2016 рр.

2. Розроблено дорожню карту розвитку біоенергетики України до 2050 р., яка буде використана при розробці Національного плану дій з відновлюваної енергетики до 2030 року і оновленні Енергетичної стратегії України.

3. Визначено можливості збирання і енергетичного використання пожнивних решток кукурудзи.

4. Визначено можливості застосування електрогенеруючих потужностей на біомасі, біогазі і біометані для балансування енергетичної системи України.

5. Розроблено, виготовлено та досліджено експериментальний котел ретортного типу потужністю 100 кВт для спалювання деревного палива вологістю до 50%.

6. Розроблено, виготовлено та досліджено дослідно-промислові зразки соломоспалювальних котлів потужністю 100, 250 та 350 кВт, в яких забезпечено стабільні показники поточної теплової потужності котла та зменшення емісії CO.

7. Отримала подальший розвиток технологія спалювання малих тюків соломи в водогрійних котлах ретортно-сигарного типу, в яких організовано безперервне стабільне спалювання малих тюків соломи та забезпечено помірні викиди шкідливих речовин.

8. Проведено експериментальні дослідження та отримано нові дані щодо показників виходу біогазу при анаеробному зброджуванні поживних решток АПК, які є науковим підґрунтям для подальшого розвитку технологій виробництва біогазу з лігноцелюлозної агросировини.

9. Виконано ТЕО ряду біоенергетичних технологій : заготівлі ПП кукурудзи; виробництва гранул і брикетів з ПП кукурудзи; анаеробного зброджування ПП АПК; виробництва і використання біометану.

10. Внесено пропозиції, що були враховані, до законів України «Про альтернативні джерела енергії» та «Про теплопостачання». Розроблено проєкти законів України щодо впровадження системи електронної торгівлі біопаливом; створення конкурентного ринку теплової енергії; запровадження підтримки вирощування енергетичних культур; відміни податку на викиди CO₂ для біоенергетичних установок; підтримки виробництва та споживання біометану.

Результати дослідження впроваджено на підприємствах країни та у навчальному процесі вищих навчальних закладів, зокрема:

- Технологію спалювання відходів деревини в котлах з топковим пристроєм ретортного типу впроваджено у ТОВ «Волинь-Кальвіс».

- Технології спалювання соломи в водогрійних котлах періодичної дії та спалювання малих тюків соломи в водогрійних котлах ретортно-сигарного типу впроваджено у ТОВ «Котлозавод «Крігер».

- Результати експериментальних досліджень анаеробного зброджування аграрних відходів і залишків (солома, стебла кукурудзи, лушпиння соняшника) впроваджено у ПрАТ «МХП Еко Енерджи».

- Методику оцінки енергетичного потенціалу біомаси України та ТЕО заготівлі побічної продукції кукурудзи, виробництва гранул і брикетів з побічної продукції кукурудзи, анаеробного зброджування аграрних відходів і залишків, виробництва і використання біометану впроваджено у навчальному

процесі кафедри економічної теорії факультету аграрного менеджменту Національного університету біоресурсів і природокористування України.

- Розроблені проекти законів передано в Держенергоефективності та комітет ПЕК і ЖКГ Верховної Ради України.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати, які виносяться на захист, отримані автором особисто на основі узагальнення результатів дослідження. В дисертації не використовувались ідеї та розробки, що належать співавторам у спільно опублікованих наукових працях.

Роботи [11,14,15,74] написані здобувачем одноосібно. У роботах написаних у співавторстві здобувачу належить аналіз стану проблеми та вибір напряму досліджень [12,13,16,17,18,19,21,25,27,28,29,30,33,34,35,36,37,40,41, 43,46,47,48, 49,50,52,53,54,57,58,59,64,65], обґрунтування ключових наукових положень [5,6,55,56,60,61,62,63], постановка завдань і обґрунтування ключових технічних рішень [22,23,44,45,51], обґрунтування методів та розроблення методики дослідження [3,4,7,8,9,10,20,24,26,31,32,38,39,42], підготовка і написання окремого підрозділу монографії/ посібника [1,2,76,77,78,79,80,81, 82,83,84,85,86, 87].

Апробація результатів дисертації.

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на профільних наукових конференціях: щорічні Міжнародні конференції «Проблеми промислової теплотехніки» та «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» 2003-2019 рр., Київ, Україна; щорічні Міжнародні конференції «Енергія з біомаси» 2004-2019 рр., Київ, Україна; XIV Європейська конференція «Біомаса для виробництва енергії, промисловості та захисту клімату», 17-21 жовтня, 2005 р, Париж, Франція; II Міжнародна конференція "Співробітництво для вирішення проблеми відходів", 9-10 лютого 2005 р., Харків, Україна; 3rd International Bioenergy Conference and Exhibition Bioenergy 2007, 3-7 September 2007, Jyvaskyla, Finland; 15th European Biomass Conference and Exhibition From Research to Market Deployment, 7-11 May 2007, Berlin, Germany; International Conference "Progress in Biogas – Biogas production from agricultural biomass and organic residues", 18-21 September 2007, Stuttgart, Germany; 16th European Biomass Conference and Exhibition From Research to Industry and Markets, 2-6 June 2008, Valencia, Spain; 17th European Biomass Conference & Exhibition "From Research to Industry and Markets", 29 June-03 July 2009 Hamburg, Germany; 18th European Biomass Conference and Exhibition, 3-7 May 2010, Lyon, France; Наукова конференція «Біологічні ресурси і новітні біотехнології виробництва біопалив» 9-11 вересня 2014 р., Київ, Україна; 4th Bioenergy Week 21-24 June

2016, Budapest, Hungary, Український форум з альтернативної енергетики, 3 листопада 2016 року, Київ, Україна; Другий Німецько-Український ВЕА форум. Біоенергетика, енергоефективність, агробізнес. 7 листопада 2016 р., Харків, Україна; Конференція Hard Talk «Нові можливості для розвитку сталої енергетики в Україні», 15 - 16 грудня 2016 року, Київ, Україна; 5th Central European Biomass Conference, 18 - 20 January 2017, Graz, Austria; IV Харківський міжнародний бізнес-форум. 21.06.2017 р., м. Харків, Україна; Kyiv Smart City Forum 2017, 3 листопада 2017 р. Київ, Україна; 2017 AEBIOM Conference, 21-22 листопада 2017, Брюссель, Бельгія; Ukraine Renewable Energy & Power Infrastructure Investors Conference, 28 березня 2018, Київ, Україна; «EU4Energy Vienna Policy Forum: Bioenergy for Heat», 24 April 2018, Vienna, Austria; Конференція «Агроенергетика 2018», 14 червня 2018, Київ, Україна; Конференція «AgroPower: Біогаз», 21 червня 2018, Київ, Україна; Sustainable Energy Forum SEFF-2018, 16 жовтня 2018, Київ, Україна; «Sweden Ukraine Bioenergy Cooperation Forum 2018», 23 жовтня 2018, Стокгольм, Швеція; «Ukrainian Renewable Energy Forum'18» 19-21 листопада 2018, Київ, Україна; «AgTech and Green Energy Forum», 10-11 December 2018, Baku, Azerbaijan; 2nd Renewable Energy & Power Infrastructure Investors Conference RENPOWER Ukraine 2019, 31 січня 2019, Київ, Україна; Конференція AgroPower.БІОГАЗ, 7 лютого 2019 р., Київ, Україна; «Reducing Open Agricultural Burning in Ukraine: Soil, Air Quality, and Public Health Paths for European Integration», 7 березня 2019 р., Київ, Україна; Конференція «Покращення ефективності систем централізованого теплопостачання в Центральній та Східній Європі», 23 - 25 квітня 2019 року, м. Київ, Україна; Sustainable Energy Forum SEF 2019, 16 October 2019, Kyiv, Ukraine; X Міжнародний інвестиційний форум з відновлюваної енергетики, 28 листопада, 2019, Київ, Україна.

За результатами роботи зроблено 32 доповіді на міжнародних конференціях за кордоном і 100 доповідей на конференціях в Україні.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 90 наукових праць, серед яких: 5 монографій, 1 з яких видана за кордоном, 2 колективні монографії, 6 посібників, 56 статей у фахових періодичних виданнях, зокрема 8 публікацій в іноземних виданнях, що включені до міжнародної наукометричної бази Scopus, 9 публікацій в збірниках матеріалів міжнародних конференцій, 1 патент України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із анотації, вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел з 257 найменувань, 2 додатків та включає 332 сторінки основного тексту, 158 рисунків і 69 таблиць.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГІЇ З БІОЛОГІЧНИХ ВИДІВ ПАЛИВА

1.1. Розвиток біоенергетики в світі і в Україні

Біомаса є перспективним джерелом відновлюваної енергії як у світі, так і в Україні. Протягом останніх років в Україні спостерігається поступове зростання кількості об'єктів і встановленої потужності для виробництва теплової та електричної енергії з біомаси. Сталий розвиток біоенергетики дає можливість зменшити залежність країни від дорогих імпортованих енергоносіїв та забезпечити ефективне використання місцевого ресурсного потенціалу. Перехід на використання біомаси для енергетичних потреб сприятиме розвитку місцевої економіки регіонів за рахунок надходження податків та зборів, а на державному рівні призведе до покращення торговельно-платіжного балансу країни через зменшення обсягів імпорту енергоносіїв. Соціальний вплив очікується завдяки створенню нових робочих місць, зниженню тарифів на теплову енергію та покращення надійності тепlopостачання. Велика кількість успішних проєктів, що вже впроваджені, економічна доцільність, державна підтримка та сприяння розвитку біоенергетики стимулюють інвесторів та фінансові організації до реалізації нових біоенергетичних проєктів в Україні.

Біоенергетика відіграє важливу роль у скороченні викидів парникових газів, що є особливо актуальним у зв'язку з проблемою глобального потепління та зміни клімату. Позитивний екологічний вплив обумовлений тим, що біомаса є CO₂-нейтральним паливом, оскільки в процесі росту рослини поглинають такий самий обсяг CO₂, який потім виділяється при спалюванні цієї біомаси.

Визначення біомаси як сировини для енергетичного використання міститься в Законі України (ЗУ) «Про альтернативні види палива» [1]: біомаса – невикопна біологічно відновлювана речовина органічного походження, здатна до біологічного розкладу, у вигляді продуктів, відходів та залишків лісового та сільського господарства (рослинництва і тваринництва), рибного господарства і технологічно пов'язаних з ними галузей промисловості, а також складова промислових або побутових відходів, здатна до біологічного розкладу. На такому визначенні біомаси базується формулювання поняття біологічних видів палива (біопалива): тверде, рідке та газове паливо, виготовлене з біологічно відновлюваної сировини (біомаси), яке може використовуватися як паливо або компонент інших видів палива.

Джерелом біомаси та її похідних продуктів для енергетичного використання можуть бути відходи та побічні продукти (ПП) сільського господарства (рослинництва, тваринництва), харчової та переробної промисловості, відходи домашнього і комунального господарства; деревина лісів та лісонасаджень, відходи їх переробки; продукти водних середовищ; енергетичні культури (верба, тополя, міскантус, просо, сорго та ін.)

Виділяють три групи сільськогосподарської (с-г) біомаси (**Рис. 1.1**):

- первинну, яка є ПП рослинництва (солома, стебла кукурудзи та соняшника, тощо);
- вторинну, отриману при переробці основної с-г продукції (жом, макуха, лушпиння, шкаралупа, костриця і т.п.);
- гній.

До основних фізичних та енергетичних характеристик паливної сировини відносять вологість та зольність, нижчу теплоту згорання, насипну щільність, розмір часток та температуру плавлення золи (**Табл. 1.1**).

Первинна сільськогосподарська біомаса



солома



стебла кукурудзи



стебла соняшника

Вторинна сільськогосподарська біомаса



лушпиння соняшника



лушпиння рису



макуха ріпаку

Рис. 1.1. Деякі види первинної та вторинної с-г біомаси.

Табл. 1.1 Паливні характеристики біомаси.

Показники	Міскан-тус	Верба	Тополя	Солома	Деревна тріска
Вологість при збиранні, %	15-23	40-53	50-55	8-15	35-55
Насипна щільність, кг/м ³	200-220	220-300	220-300	100-180	240-350
Нижча теплота згорання, Q _{pн} , МДж/кг	14-10	10-8		15-13,5	12-8
Елементний склад, %:	-	-	-	-	-
С	38-50				
Н	4,5-6				
Cl	0,04	0,02-0,03	0,03-0,04	0,14-0,97	0,02
N*	0,16-1,37	0,5-1,0	0,77-0,9	0,4-0,6	0,3
S	0,28	0,03-0,34	0,03-0,2	0,05-0,2	0,05
Зольність, %	2,3-3,7	1,5-2	0,5-1,9	2-8	0,5-1,5
Температура плавлення золи, °С	1250-1385	>1500	1160-1500	850-1050	1000-1400

*Вміст залежить від обсягу внесення добрив.

Дослідженню енергетичних культур і властивостей біопалив присвячені роботи Блюма Я.Б. [2, 3] Роїка М.В. [4], Рахметова Д.Б. [5, 6, 7, 8], Каленської С. [9]. У монографії [7] з позиції системного аналізу розглядаються три фази, які проходить біомаса енергетичного призначення: I – вирощування; II – збирання й переробка; III – енергетичне використання. Ці фази обумовлюють якість біопалива. До впливів, пов'язаних з фазою I, можна віднести вибір виду й сорту культурної рослини, стан її стиглості, ґрунтово-кліматичні умови, технологію і технічні засоби вирощування, наявність добрив, засобів захисту рослин і стан атмосферного повітря. Роботи [6, 8, 9, 10, 11, 12, 13] комплексно описують I фазу, а саме, інтродукцію, селекцію, біотехнологію рослинних ресурсів для енергетичного використання та агрономічні підходи для вирощування різноманітних енергетичних культур.

Світовий досвід енергетичного використання біомаси

Біоенергетика сьогодні впевнено відіграє роль одного з важливих секторів світової енергетики, забезпечуючи 70% всього обсягу споживання ВДЕ. За даними 2017 р., використання біомаси для енергетичних потреб становить **1112** млн т н.е./рік, з яких 86% – тверда біомаса, 7% – рідкі біопалива, 3% – тверді побутові відходи, решта – біогаз та промислові відходи (по 2% кожне). Частка біомаси складає **9,5%** у загальному постачанні первинної енергії і **13%** – у валовому кінцевому споживанні енергії у світі (**Рис. 1.2**). За окремими секторами внесок біоенергетики (відсоток) і відповідне споживання біопалив становить (2017 р.) [10]:

- 22% (820 млн т н.е.) у споживанні теплової енергії;
- 2,3% (156 млн т н.е.) у виробництві електроенергії;
- 3% (70 млн т н.е.) у секторі транспорту.

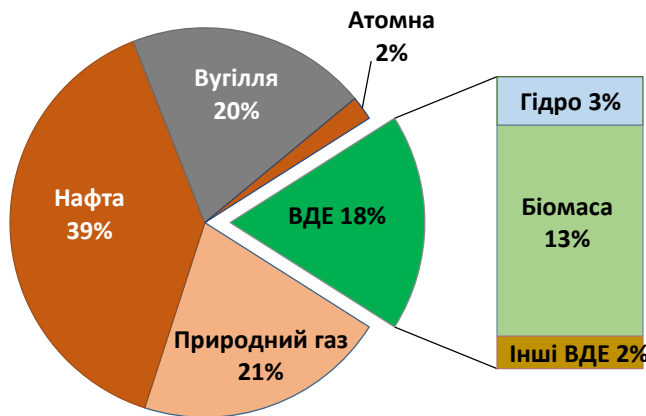


Рис. 1.2. Структура валового кінцевого споживання енергії у світі (2017 р.) [9]

Річна структура виробництва електроенергії з ВДЕ в світі і у ЄС в 2018-2019 рр. представлена на **Рис. 1.3-1.4.**

Загалом: 26,615 ТВт

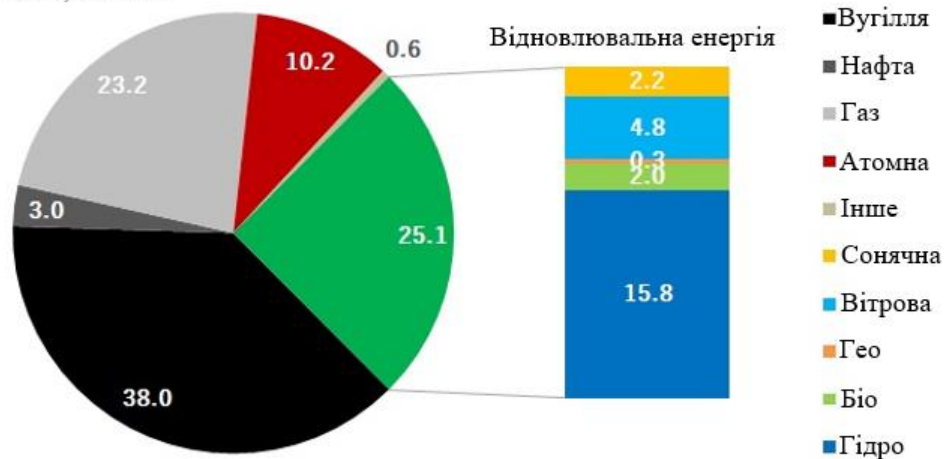


Рис. 1.3. Генерація електроенергії в світі в 2018 р. (%) [11].

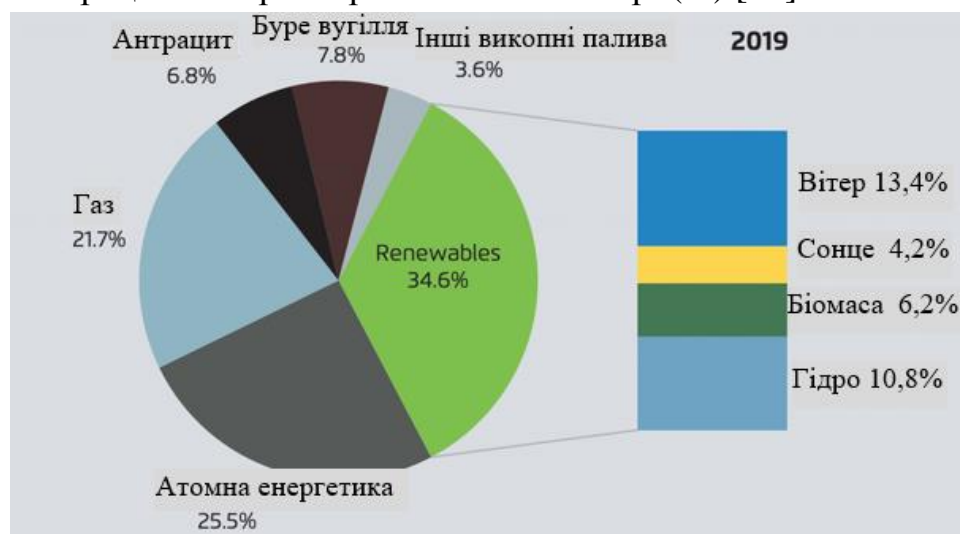


Рис. 1.4. Генерація електроенергії в ЄС в 2019 р. (%) [12].

Наразі основним джерелом виробництва біопалива і енергії з біомаси у світі є деревна біомаса – на частку дров, тріски, гранул та деревного вугілля припадає більше 85% загального обсягу споживання біомаси для енергетичних потреб. Перспективним напрямком розвитку біоенергетики і збільшення обсягів енергетичного використання біомаси вважається залучення с-г залишків до паливно-енергетичного балансу країн. Сьогодні з біомаси аграрного походження виробляється лише 3% загального обсягу біоенергії, але за оцінками фахівців, потенціал біомаси цього виду складає від 356 до 1646 млн т н.е./рік, що може забезпечити 3-14% загального постачання первинної енергії у світі.

Стало збільшуються обсяги виробництва рідких біопалив, біогазу та гранул з біомаси. У 2017 р. у світі було вироблено 138 млрд. л рідких біопалив, 61,7 млрд. м³ біогазу і 33,1 млн т гранул, що, відповідно, у 1,3, 1,6 і 2,3 разів більше показників 2010 р. Серед рідких біопалив превалує біоетанол з кукурудзи та цукрової тростини (62% загального обсягу), основними виробниками якого є США та Бразилія. Більше половини загального обсягу біогазу та гранул з біомаси виробляється в Європі.

ЄС є крупним виробником і споживачем ВДЕ, який успішно рухається у бік виконання цілі 2020 р. по частці ВДЕ у валовому кінцевому енергоспоживанні – 20%. За даними Eurostat, у 2017 році цей показник вже досяг 17,5% [13], з яких більше половини припадає на біомасу. Валове внутрішнє споживання біомаси в ЄС-28 складає **144** млн т н.е./рік, що еквівалентно **13,6%** загального кінцевого споживання енергії (2017 р.). У структурі цієї біомаси майже 70% – тверда біомаса, 11,7% – біогаз, 11,4% – рідкі біопалива, решта – відновлювана частина ТПВ. Наразі основним видом біомаси, з якого виробляється енергія в ЄС, є лісова деревина (69,4% загального обсягу споживання біомаси у 2017 р.), тоді як внесок агробіомаси (с-г залишків та енергетичних культур) є відносно невеликим – 18%, або 26 млн т н.е. (**Рис. 1.5**).



Рис. 1.5. Валове внутрішнє споживання біомаси (2017 р.) та оцінка енергетичного потенціалу біомаси (2050 р.) в ЄС-28 [14].

За окремими секторами внесок біоенергетики (відсоток) і відповідний обсяг споживання біопалив наступний (2017 р.):

- споживання теплової енергії – 16,9% [15] (88,5 млн т н.е., у т.ч. 81 млн т н.е. – тверда біомаса);
- виробництво електроенергії – 5,6% [16] (47,2 млн т н.е., у т.ч. 25 млн т н.е. – тверда біомаса, 12,6 млн т н.е. – біогаз);
- використання у секторі транспорту – 4,6% [17] (14,9 млн т н.е., у т.ч. 12 млн т н.е. – біодизель, 2,8 млн т н.е. – біоетанол).

Стійкою тенденцією є збільшення обсягів виробництва енергії з агробіомаси, що підтримується на загальноєвропейському рівні. У довгостроковій перспективі енергетичний потенціал біомаси ЄС становитиме від 169 до 737 млн т н.е./рік, причому основною складовою потенціалу буде агробіомаса, до якої відносять с-г залишки та енергетичні культури (**Рис. 1.5**). Найбільш ймовірним вважається досягнення середнього рівня потенціалу – 406 млн т н.е./рік, що становить близько 24% загального споживання енергії в ЄС-28 у 2017 році.

На **Рис. 1.6** приведена частка ВДЕ в системах опалення та охолодження ЄС в 2018 р. В середньому по ЄС частка ВДЕ становила 21% від енергії для опалення та охолодження. Ця частка постійно зростає, наприклад, у 2014 році вона становила 12%. Серед лідерів – Швеція, Латвія, Фінляндія, та Естонія, які мають цей показник понад 50%. Показник України – 8%. Відновлюване тепло в Європі на більш ніж 80% виробляється з біомаси та біогазу. Усі інші ВДЕ (теплові насоси, сонячна тепла енергія, тепло з побутових відходів) складають рештку.

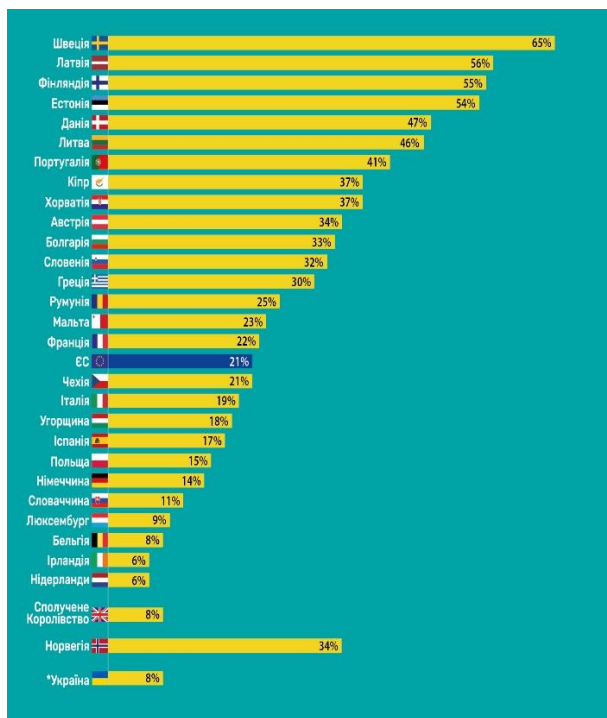


Рис. 1.6. Частка ВДЕ в системах опалення та охолодження ЄС.

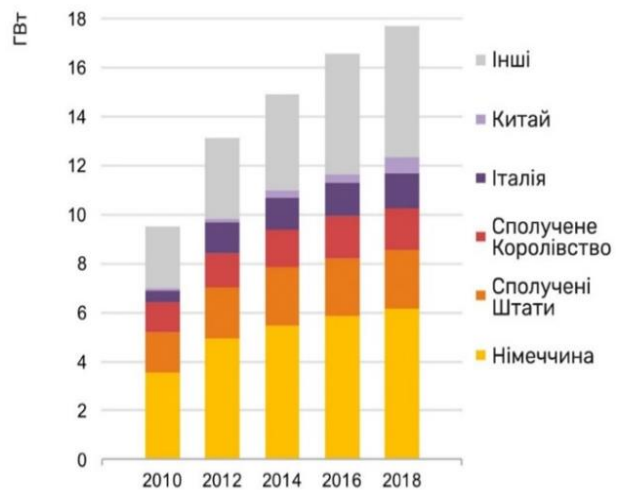


Рис. 1.7. Встановлена електрична потужність біогазових установок в світі [18]

Згідно RED II Директиви 2018/2001 Європейського Парламенту та Ради, ЄС планує збільшення частки ВДЕ у теплопостачанні та охолодженні в середньому на 1,3% за рік до 2030 р. Понад 75% цього зростання має відбутися в системах централізованого теплопостачання (ЦТ). Тобто, в 2030 році середня частка ВДЕ в системах опалення і охолодження має становити вже понад 36%.

Біогазові технології для виробництва електроенергії динамічно розвиваються в світі і їх сумарна встановлена електрична потужність в 2018 р. склала біля 18 ГВт (**Рис. 1.7**). Випереджаючими темпами в світі розвивається виробництво і споживання біометану – біогазу, доведеного до якості природного газу. В 2019 світове виробництво біометану перевищило 5 млрд м³/рік з середнім темпом зростання 13%/рік.

Нова версія Директиви ЄС щодо сприяння використанню ВДЕ (Директива ЄС 2018/2001, або Директива RED II [19]) вийшла у 2018 р. Основні обов'язкові цілі, поставлені Директивою до 2030 р., наступні: щонайменше 32% ВДЕ у валовому кінцевому споживанні енергії ЄС і 14% ВДЕ у секторі транспорту. При цьому ВДЕ на транспорті включають рідкі біопалива (у т.ч. другого покоління), біогаз, електроенергію з ВДЕ, а також відновлювані рідкі та газоподібні палива небіологічного походження.

Біоенергетика в паливно-енергетичному комплексі України

В Україні спостерігається стала тенденція збільшення обсягів виробництва енергії з біомаси. За даними Енергетичного балансу за 2018 рік [20], виробництво біопалива та відходів становить **3726** тис. т н.е., а загальне постачання первинної енергії з них – **3195** тис. т н.е. Частка біопалива у ЗППЕ складає **3,4%**, частка всіх ВДЕ – **4,6%** (2018 р.) (**Рис. 1.8**). З урахуванням даних енергетичних балансів за 2010-2018 рр., ріст сектору біоенергетики становить в середньому **39%** на рік за показником «виробництво біопалива та відходів» і **31%** на рік – за показником «загальне постачання первинної енергії з біопалива та відходів» (**Рис. 1.9**).

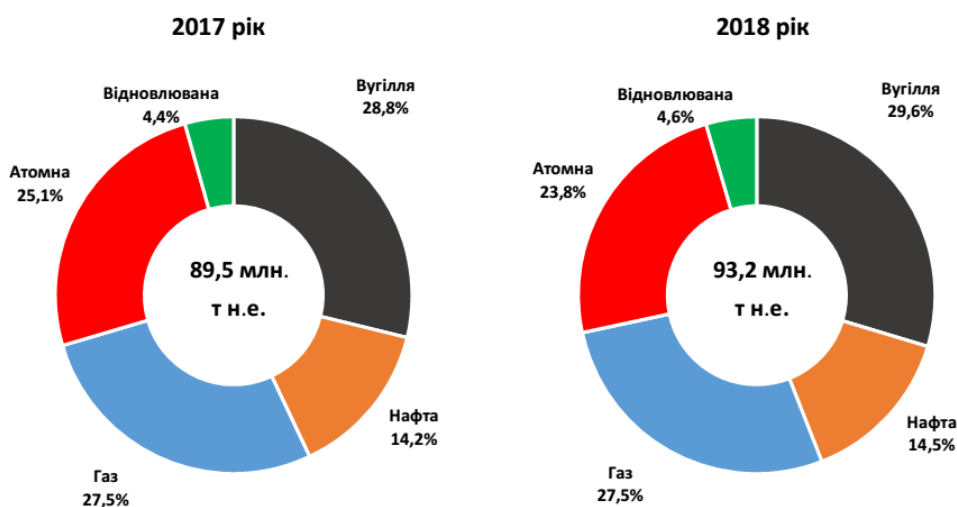


Рис. 1.8. Загальне постачання первинної енергії в Україні [21]

Цілі по розвитку біоенергетики до 2020 р. зазначено у Національному плані дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 р [21]. Згідно НПДВЕ, споживання біомаси у системах опалення та охолодження має становити 5000 тис. т н.е. у 2020 році. Порівняння цієї цілі з прогнозом при існуючому тренді розвитку сектору свідчить про те, що показник «виробництво біопалива та відходів» близький до досягнення величини 5000 тис. т н.е. у 2020 році (див. **Рис. 1.9**).

За даними Держстату [22], у 2018 р. 29,6% генеруючих підприємств (установок) з виробництва електроенергії та теплоенергії працювали на біопаливі (у 2017 р. – 27,1%). Зазначеними об'єктами генерації у 2018 р. відпущено електричної енергії 287,5 млн кВт·год, що складає 0,2% від загальних обсягів (у 2017 р. також 0,2%), теплової енергії – 7636,7 тис. Гкал (7,8% проти 6,9% у 2017 р.).

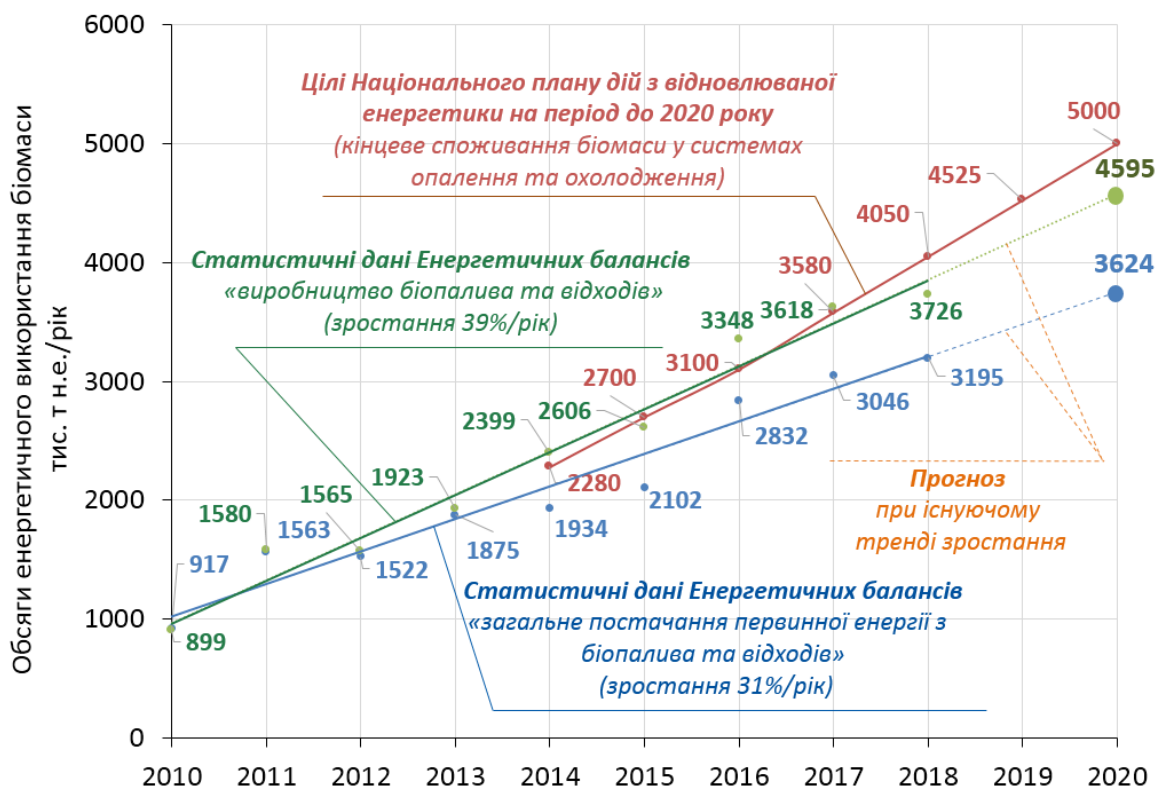


Рис. 1.9. Динаміка розвитку біоенергетики в Україні: статистичні дані енергетичних балансів, цілі НПДВЕ та прогноз до 2020 р.

В 2018 р. частка енергії, вироблена з відновлюваних джерел, у кінцевому енергоспоживанні склала 7,0%, зокрема: в електроенергетиці – 8,9%; у системах опалення – 8,0%; у транспортному секторі – 2,2% (Рис. 1.10).

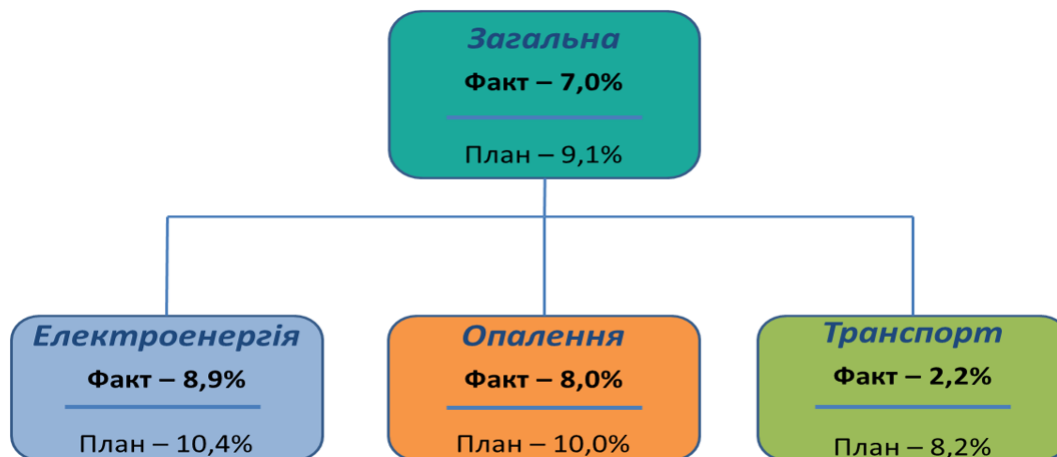


Рис. 1.10. Частка енергії з ВДЕ у кінцевому споживанні енергії України в 2018 р.

Встановлена потужність, вироблена електроенергія та розподіл виплат за зеленим тарифом за видами генерації з ВДЕ в 2019 р. представлені в Табл. 1.2.

Табл. 1.2. Показники генерації електроенергії за видами ВДЕ в Україні в 2019 р. [23]

	ВЕС	Біомаса	Біогаз	СЕС	мГЕС	Всього
Встановлена потужність						
на початок 2019 р., МВт _е	532,9	52,8	45,8	1367,2	110,1	2 109
на кінець 2019 р., МВт _е	1169,9	83,9	86,1	4924,6	113,9	6 378
Вироблено е/е, млн кВт·год	2021,6	162,3	247,4	2932,3	241,5	5 605
Розподіл виробленої е/е, %	36%	3%	4%	52%	4%	100%
Базовий "зелений" тариф у IV кв. 2019, коп/кВт·год	280,84	341,76	341,76	414,57	320,96	
Рівень виплат за «зеленим» тарифом, млн грн	5 677	554	845	2156	775	20 010
Розподіл виплат за "зеленим" тарифом, %	28%	3%	4%	61%	4%	100%

Порівняння структури генерації електроенергії з ВДЕ в Україні з подібною структурою в світі і ЄС показує нетипово велику частку генерації сонячної електроенергії в Україні (**Табл. 1.3**). Так, в світі, ЄС і окремих країнах частка сонячної електроенергії складає 18-24% від виробництва відновлюваної електроенергії (без гідроенергетики), а в Україні практично втричі більше – **54%**. За вироблену електроенергію з сонця сплачується **61%** всіх витрат за зеленим тарифом.

Табл. 1.3. Структура виробництва відновлюваної електроенергії *

	Світ (2018) [11]		ЄС (2019) [12]		Німеччина (2019) [24]		Україна (2019) [25]	
	% від загальної виробітки	%	% від загальної виробітки	%	% від загальної виробітки	%	% від загальної виробітки	%
сонце	2,2	24	4,2	18	7,7	21	1,9	54
вітер	4,8	53	13,4	56	20,9	58	1,3	37
біомаса	2	22	6,2	26	7,4	21	0,3	9
ВСЬОГО	9	100	20,1	100	36	100	3,5	100

* аналіз виконано без гідроенергетики, щоб уникнути впливу великої гідроенергетики.

На думку автора, очевидна проблема перестимулювання і безконтрольного будівництва об'єктів сонячної енергетики в Україні. Порівняння структури генерації електроенергії з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в Україні з подібною структурою в світі і ЄС також показує нетипово низьку частку електроенергії з біомаси і біогазу в Україні. Так, в світі, ЄС і окремих країнах частка електроенергії з біомаси і біогазу складає

21-26% від виробництва відновлюваної електроенергії (без гідроенергетики), а в Україні ця частка є практично в 2,5 рази меншою – **9%**. За вироблену електроенергію з біогазу і біомаси сплачується всього **7%** всіх витрат за зеленим тарифом.

Питанням енергетичного використання біомаси присвячені роботи Долінського А.А. [26], Забарного Г.М. [27], Клименко В.М. [28, 29, 30], Карпа І.М. [31, 32], П'яних К.Є. [33, 34], Калетника Г.М. [35, 36], Роїка М.В. [37, 38], Губінського М.В. [39], Симборського А.І. [40], Дубровіна В.О. [41, 42], Мельничука М.Д. [43, 44], Гавриша В.І. [45], Жовміра М.М., Железної Т.А., Драгнева С., Матвєєва Ю.Б., Кучерука П.П.

Концептуальні науково-методичні та організаційно-економічні основи розвитку виробництва та використання твердих, рідких і газоподібних біопалив розглянуті у роботах [30, 31, 32, 33, 34, 35, 38, 39, 40, 41, 42, 43]. У статтях [36, 37] представлені результати моделювання та експериментальні дослідження спалювання деревини та лушпиння соняшнику, біомаси яка найбільше використовується для енергетичних потреб в Україні. Технологічні процеси та технічне забезпечення виробництва твердих біопалив, біодизелю, біоетанолу та біогазу висвітлені у роботах [45, 46, 47]. Можливості для впровадження біоенергетики у аграрному секторі та на сільських територіях описані у роботах [44, 48]. Передумови для об'єднання підприємств у регіональні кластери із замкнутим технологічним циклом виробництва біопалива за схемою “виробництво біосировини – переробка біосировини – виробництво біопалива – реалізація біопалива” розглянуто у роботі [39]. Для досягнення зобов'язань щодо частки енергії з ВДЕ в кінцевому споживанні енергії України необхідно розвивати біоенергетику на базі повнішого використання наявних обсягів біомаси. Для цього потрібно визначити перспективні напрямки та обґрунтувати засади для широкого впровадження типових біоенергетичних проєктів.

1.2. Методологічні підходи для оцінки енергетичного потенціалу біомаси.

Оцінка потенціалу біомаси для енергетичних потреб – базовий елемент для сталої енергетичної політики, зокрема, енергетичних програм та планів сталого енергетичного розвитку, та важливий етап передпроектних досліджень. Незважаючи на зростаючу роль біоенергетики і, зокрема, біопалив у світовому паливно-енергетичному балансі, в Україні спостерігається брак достовірної та детальної інформації про споживання і постачання біомаси, відсутня стандартизована система для вимірювання та обліку її ресурсів. Тому виникає потреба у систематизації підходів оцінки

потенціалу біомаси для виробництва енергії та обґрунтуванні методики, адаптованої до сучасних умов господарювання в Україні.

Вагомий вклад в дослідження потенціалу енергетичного використання біомаси зробили вітчизняні вчені Кудря С.О., Забарний Г.М., Ключ С.В., Дубровін В.О., Голуб Г.А., Кухарець С.М., Ярош Я.Д., Гальчінська Ю.М., Зібцев С.В., Лакида П.І., Василюшин О.М., Ладика В.І., Железна Т.А., Матвеев Ю.Б., Драгнев С.В., Жовмір М.М. та інші, а також закордонні вчені Бьотчер Х., Богатирьова Е.Н., E.M.W. Smeets, D. Lemp, M. Dees, Tévécia Ronzon, Stephan Piotrowski, Nicolae Scarlat, Viorel Blujdea, Milan Martinov, Jean-François Dallemand, Niclas Scott Bentsen, Claus Felby, Bo Jellesmark Thorsen, JI GAO, Camia A., Robert N., Jonsson R., Pilli R., García-Condado S., López-Lozano R., van der Velde M., Ronzon T., Gurría P., M'Barek R., Tamosiunas S., Fiore G., Araujo R., Hoepffner N., Marelli L., Giuntoli J, K.N. Kontogiannopoulos, S.T. Mitrouli, S.I. Patsios, K.C. Plakas та інші.

Для України з огляду на обмежене вирощування аквакультури можна виділити чотири типи біомаси для енергетичного використання: лісова біомаса; енергетичні рослини; залишки і відходи сільського господарства; органічні відходи [46]. У результаті проведених досліджень встановлено, що в Україні на 2008 рік теоретичний і технічний потенціали лісової біомаси становили 312,24 і 89,08 ПДж, с-г відходів – 1259,29 і 501,43 ПДж відповідно.

З цих видів найбільший невикористаний потенціал, наявний у ПП АПК, складають пожнивні рештки (солома, кукурудзиння, стебла соняшнику, тощо), та вторинні залишки, що отримують при переробці основної с-г продукції (жом, лушпиння) та гній [26, 47, 48, 49].

В Україні стрімко розвивається рослинництво, що сприяє зростанню обсягів післяжнивних решток, частина з яких може бути вилучена з полів, як ПП, для енергетичного використання. Так, за даними Державної служби статистики України [50] у 2018 р. валовий збір зернових та зернобобових культур зріс на 31%, а соняшнику на 117% порівняно з 2008 р. Тому потрібно актуалізувати оцінку потенціалу біомаси відповідно до існуючих тенденцій рослинництва.

Широке залучення цього ресурсу біомаси для виробництва теплової та електричної енергії також перспективне і для країн ЄС. Згідно досліджень Об'єднаного дослідницького центру Генерального директорату Європейської комісії щорічно в ЄС в секторах, пов'язаних із землею, виробляється біомаси в кількості 1466 млн т с.м. Зокрема, сільське господарство виробляє 956 млн т с.м. та лісове господарство 510 млн т с.м. У сільському господарстві 46% біомаси формується рослинними рештками, з яких заготовляють лише четверту частину [51].

За оцінками [52], доступний річний потенціал біомаси для енергетичного використання у 2017 р. (Рис. 1.5) становив 144 млн т н.е. У 2050 р. цей потенціал може збільшитися до 169-737 млн т н.е., з яких від 124 до 444 млн т н.е. буде сформовано с-г біомасою.

Для гармонізації оцінок ресурсів біомаси в Європі та сусідніх країнах у 2008-2010 рр. був реалізований проект «Біоенергетика в Європі» (BEE – Biomass Energy Europe), який фінансувався в рамках сьомої рамкової програми Європейської Комісії [53]. У ньому виділено п'ять типів потенціалів біомаси: теоретичний потенціал; технічний потенціал; економічний потенціал; потенціал реалізації та сталий потенціал реалізації. Потенціал реалізації враховує обмеження, накладені соціально-політичними умовами, точна оцінка яких у вітчизняних реаліях проблематична. З огляду на достовірність вхідної інформації найбільш дієвим способом визначення енергетичного потенціалу біомаси є використання статистичного аналізу, вхідними даними для якого є припущення щодо врожайності з гектару. Біоенергетичний потенціал ПП та відходів сільського і лісового господарства розраховується на основі прогнозу виходу основної продукції, помножене на коефіцієнт залишків або відходів та на коефіцієнт, що враховує обсяги залишків та відходів, які можуть бути зібрані на практиці. Для оцінок на різних рівнях доцільно застосовувати теоретичний, технічний та економічний потенціали біомаси, який базується на вітчизняних даних.

Частково таку можливість надала методика узагальненої оцінки технічно-досяжного енергетичного потенціалу біомаси [54], яка дозволяє з єдиних позицій виконувати оцінку технічно-досяжного енергетичного потенціалу біомаси для виробництва газоподібних біопалив (біогаз із гною та посліду, стічних вод, полігонів твердих побутових відходів), рідких моторних біопалив (біоетанол, біодизель) та твердих біопалив (солома зернових, технічних і круп'яних культур, лушпиння соняшнику, дрова, відходи рубки та переробки деревини, енергетичні культури) як на рівні держави, так і на обласному та районному рівнях. Проте ця методика має недоліки, пов'язані із використанням постійних значень коефіцієнтів, що, зокрема, не враховують вологість біомаси і зміни співвідношення ПП до основної продукції при зростанні врожаїв, та відсутністю методології для оцінки економічного потенціалу біомаси. Також у методиці прийнято коефіцієнт енергетичного використання соломи 0,25, що є дуже консервативним підходом з огляду на аналіз рекомендацій фахівців, висвітлених у роботі [55]. В цій роботі для України в цілому запропоновано використовувати до 30% теоретичного потенціалу соломи зернових колосових культур й до 40% теоретичного потенціалу ПП кукурудзи та соняшника. За дослідженнями [56] після 2008 р.

для соломи пшениці, ячменю і жита в цілому в Україні розрахункове значення коефіцієнту енергетичного використання $K_{en} \geq 0,5$, а солома ріпаку, сої, стебла кукурудзи, соняшнику і лущиння соняшнику можуть бути використані в енергетичних цілях у повному обсязі, тобто для цих культур $K_{en} = 1,0$.

У статті [57] запропоновано класифікацію рослинних відходів для виробництва енергії та проаналізовано теплотехнічні характеристики різних видів цієї біомаси. У монографії [58] зазначено, що біологічний вихід нетоварної частини урожаю зернових культур (уся солома до кореневої шийки і полова) враховується за показником утворення урожаю зерна на відповідний коефіцієнт, який для озимої пшениці і вівса дорівнює 1,5; озимого жита – 2,0; ярової пшениці і вівса – 1,3; ячменю – 1,2; гречки і гороху – 1,5; сої – 1,2. Залежно від висоти зрізу 10-20% маси соломи складає стерня. Окремі значення коефіцієнтів виходу ПП рослинництва для енергетичного використання були уточнені у роботах [59, 60, 61, 62, 63, 64, 65]. У статті [66] для врахування зміни виходу ПП від урожайності основної запропоновані рівняння лінійної регресії для основних с-г культур, але вплив вологості біомаси не було враховано.

У статті [67] представлені коефіцієнти для оцінки потенціалу с-г та лісогосподарських залишків для виробництва енергії у Китаї для сировини різної вологості, а також наведені коефіцієнти збирання для різних видів біомаси, що дозволяють виконати уточнену оцінку технічно-досяжного потенціалу біомаси.

Оцінка залежності виходу ПП від урожайності основної продукції проведена у роботах закордонних вчених [68, 69, 70]. Зведені підходи, описані у статті [71], дозволяють оцінити потенціал біомаси з різноманітних с-г культур не тільки в ЄС, а і в інших країнах світу. Але представлена методологія не враховує економічні обмеження.

Дослідження характеристик та обсягів ПП АПК, які можуть бути використані для економіки замкнутого циклу, проведені у рамках проєкту ЄС Agrosycle [72, 73]. Можливості для збільшення обсягів ПП у країнах ЄС та Україні проаналізовані у звіті [74]. Але ці звіти не представляють цілісної методології для оцінки потенціалу біомаси.

Досвід заготівлі та енергетичного використання пожнивних решток кукурудзи.

Теоретичні та практичні аспекти заготівлі та енергетичного використання пожнивних решток кукурудзи на зерно досліджували: S. Sokhansanj, A. Turhollow, David Ertl, Matt Darr, Peter A. Vadas, Matthew F.

Digman, Caroline Shneider, Hans Hartmann, Monika Fleschhut, Stefan Thurner, L. Kocsis та інші.

Інженерні аспекти збирання пожнивних решток кукурудзи розглянуті у роботі [75], зокрема, визначено вихід кукурудзиння з одиниці площі поля, співвідношення і вологість різних складових цієї біомаси, описані методи її збирання та проведено оцінку витрат на заготівлю. Але у висновках відзначається, що технічних даних щодо заготівлі пожнивних решток кукурудзи недостатньо, особливо бракує інформації стосовно їх біоенергетичного використання.

Дослідження заготівлі побічної продукції кукурудзи в умовах Угорщини та Німеччини описані у роботах [76, 77, 78, 79]. Але, представлені технології заготівлі кукурудзиння у тюках на базі прес-підбирачів Claas Rollant 66 і Claas Quadrant 2200 RC та у подрібненому вигляді не отримали широкого розповсюдження.

Аналіз 8 сценаріїв заготівлі кукурудзиння в умовах США та оцінка витрат розглянуто у роботі [80]. Різноманітні дослідження заготівлі пожнивних решток кукурудзи були проведені у США на базі Університету Штату Айова. Системний аналіз різних аспектів сталої заготівлі кукурудзиння, логістики та зберігання представлено у інформаційних звітах [81, 82]. У той же час, ці дослідження враховують специфічні умови Штату Айова, які відрізняються від вітчизняних умов, а тому виникає необхідність у адаптації та обґрунтуванні наукових основ для раціональних технологій заготівлі кукурудзиння та його переробки у тверді біопалива.

Дослідженню паливних властивостей ПП кукурудзи присвячена робота [83]. Наведено результати дослідження паливних властивостей подрібнених пожнивних залишків кукурудзи: розподіл часток за розміром, насипна щільності шару в залежності від середнього розміру часток, щільність окремих частинок, вологість, вихід летючих речовин, вміст золи, склад робочої маси палива, нижча теплота згоряння. Визначено середні співвідношення маси стебла, листя і стрижнів качанів до маси зерна кукурудзи.

1.3. Технології спалювання біомаси

Незважаючи на те, що пряме спалювання БМ являє собою найстарішу і найбільш розвинену технологію отримання енергії з БМ, до сих пір залишаються можливості для її подальшого розвитку з точки зору збільшення ККД і поліпшення екологічних характеристик. Основними технологіями спалювання деревної БМ, що використовуються в даний час, є: спалювання у вихровій (циклонній) топці, спалювання сировини шляхом розпилення в пальнику, спалювання на решітці, спалювання із завантаженням сировини

розподільним стокером, спалювання в обертовій печі, спалювання в киплячому шарі, спалювання в циркулюючому киплячому шарі. Більш детально розглянемо тільки технології, які досліджувалися в роботі.

Однією з найбільш поширених є технологія спалювання в реторті з нижньою подачею сировини (**Рис. 1.11**). Паливо через реторту шнеком проштовхується на нерухому решітку (існують також аналогічні конструкції з решіткою, що обертається). Первинне повітря подається під решітку через розташовані на бічній поверхні реторти отвори. Решітка охолоджується первинним повітрям. Вторинне повітря подається через ряд отворів, що розташовані над вершиною конусоподібної гірки палива. Для досягнення правильного співвідношення витрат підведення первинного і вторинного повітря регулюється окремо.

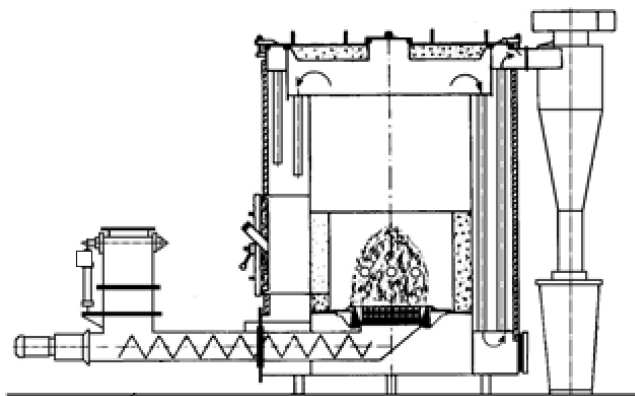


Рис. 1.11. Котел з ретортою з нижньою подачею сировини.

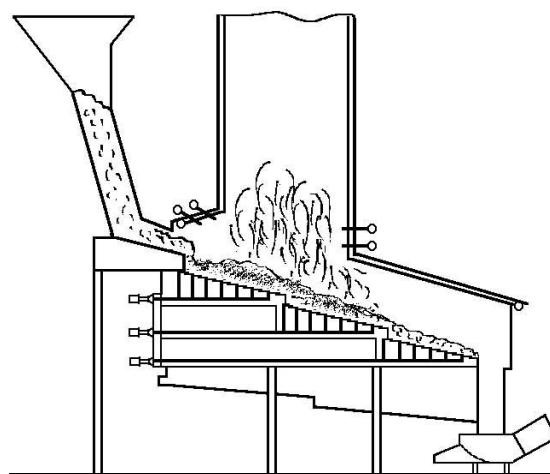


Рис. 1.12. Схема похило-перештовхувальної решітки.

Топки з подачею сировини знизу можуть використовуватися тільки на установках невеликої потужності (до 6 МВт_т) для спалювання малозольної БМ (деревна тріска, тирса) вологістю до 40%. Для високозольної БМ (кора, солома) потрібна більш ефективна система видалення золи. Крім того, частинки спеченої золи, що покривають поверхню шару палива, можуть викликати нестабільність процесу в топках з подачею сировини знизу [84].

Технологія спалювання на рухомій решітці застосовується, як правило, для БМ з високими вологістю (до 60%) і зольністю та різним фракційним складом. Добре сконструйована решітка з регулюванням повинна забезпечувати рівномірний розподіл палива і шару тліючого вугілля по всій поверхні. Це важливо для забезпечення рівномірного підведення первинного повітря до всіх областей решітки. Нерівномірне підведення повітря може стати причиною шлакування, утворення прогарів, великої кількості летючої золи і

збільшення кількості надлишкового кисню, необхідного для повного згоряння [85].

Використання рухомих решіток і системи контролю за шаром тліючого вугілля за допомогою датчиків інфрачервоного випромінювання, застосування для різних зон решітки повітродувок первинного повітря з регульованою частотою, як правило, вирішує названі проблеми. Секційна подача первинного повітря необхідна для підстроювання витрати відповідно до потреб зон сушіння, газифікації та горіння. Використання окремо регульованої системи подачі первинного повітря дозволяє успішно спалювати БМ на решітці і при частковому навантаженні (навіть до 25% від номінального), а також підтримувати відновлювану атмосферу в зоні підведення первинного повітря, що необхідно для забезпечення низької емісії NO_x [84].

Одним із способів покращення процесу горіння на решітці є поділ об'єму топки на первинну і вторинну камери згоряння. Геометрія вторинної камери згоряння і системи підведення вторинного повітря повинна забезпечувати якомога більш повне перемішування ПС і повітря. Чим краще перемішування, тим менша кількість надлишкового кисню необхідна для повного згоряння палива і тим вище ККД установки.

На **Рис. 1.12** показана схема похило-перештовхувальної решітки. Як правило, вона розділена на кілька секцій, кожна з яких пов'язана зі своїм поршнем. Поршень рухає в горизонтальному напрямку розташовані у вигляді сходинок рухомі колосники. Зворотно-поступальний рух рухомих колосників та чергування рухомих і нерухомих колосників забезпечує поступове переміщення сировини з верхньої частини решітки в нижню - до збірника золи. Похило-перештовхувальна решітка дозволяє спалювати високозольну БМ вологістю до 60%. До недоліків слід віднести те, що рухома решітка ускладнює конструкцію котла і вимагає певного обслуговування, а її завантажувальна здатність відносно невелика [86].

Котли з періодичним спалюванням тюків соломи

Відомі технології періодичного спалювання цілих тюків соломи можна розділити на наступні групи:

- спалювання на глухій черені з ручним регулюванням подачі повітря;
- спалювання на колосниковій решітці з ручним регулюванням подачі повітря;
- спалювання з термостатичним регулюванням подачі повітря;
- спалювання з програмним регулюванням подачі повітря;
- спалювання з перемиканням зони введення дуття;
- спалювання з керованою зміною орієнтації струменів дуття;

– спалювання з самоподачею тюків у зону горіння.

Спалювання цілих тюків з ручним регулюванням подачі повітря

Польське підприємство MetalERG виробляє котли серії Biowat (**Рис. 1.13**), що призначені для побутового використання й сконструйовані для спалювання малих призматичних тюків соломи з ручним завантаженням [87]. Конструкція проста й складається з топкової камери, обмурованої шамотною цеглою, та конвективного газоходу на виході. Горіння тюка соломи відбувається на глухій черені. Повітря у топку надходить через засувку на дверцятах під дією тяги, що створюється димовою трубою. Температура води на виході з котла регулюється клапаном димових газів, що підтримує температуру води не вище 95°C. Видалення золи з топкової камери відбувається один раз на день.



Рис. 1.13. Котел серії Biowat для спалювання малих тюків соломи

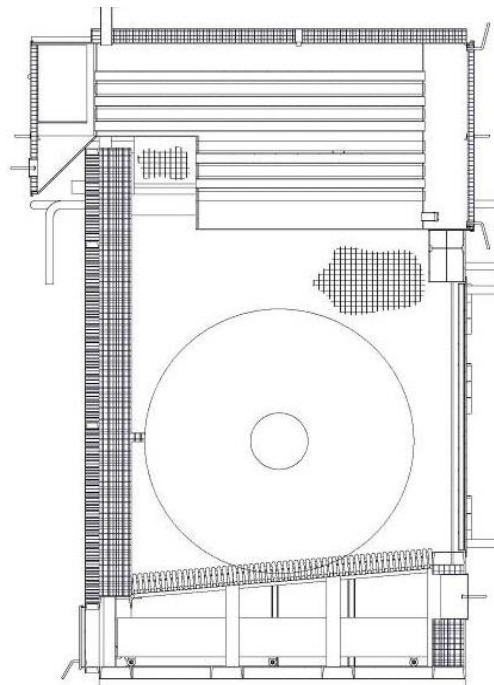


Рис. 1.14. Схема водогрійного котла для спалювання тюків соломи Інституту проблем хіміко-енергетичних технологій

Спалювання на решітці з ручним регулюванням подачі повітря

Інститут проблем хіміко-енергетичних технологій [88] розробив конструкцію котла періодичної дії для спалювання циліндричних тюків соломи діаметром до 2 м та довжиною до 1,9 м. Котел складається з топкової камери викладеної шамотною цеглою. Над топкою розміщеній димогарний теплообмінник з розташованими всередині нього двома пучками труб (**Рис. 1.14**). На стелі топки встановлені екрани, що входять в циркуляційний

контур котла. Котел може експлуатуватися з природною чи примусовою циркуляцією води. В нижній частині топки вмонтована двосхила колосникова решітка, на якій відбувається спалювання тюка соломи.

Спалювання з термостатичним регулюванням подачі повітря

Компанія Passat Energi A/S виробляє котли для спалювання малих тюків соломи або метрових дров (Рис. 1.15) [89]. Подача повітря та видалення димових газів відбувається за рахунок природної тяги димової труби. Подача повітря здійснюється через лючки у дверцятах, причому потік первинного повітря направляється на тюк, а потік вторинного повітря над тюком для забезпечення вигорання летючих. Інтенсивність дуття регулює термостат шляхом прикривання лючків первинного і вторинного повітря, підтримуючи температури гарячої води на виході – не вище 95°C.



Рис. 1.15. Котел Passat серії
FK/NO

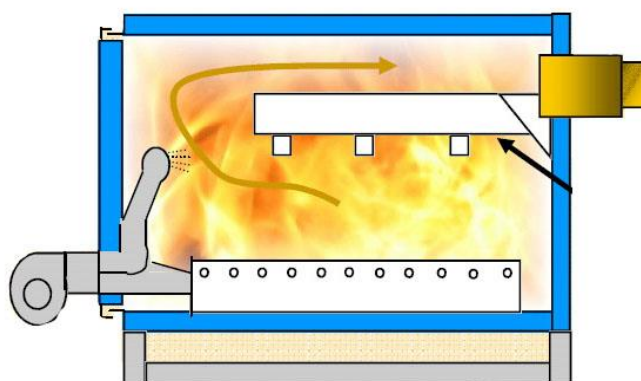


Рис. 1.16. Котли FARM 2000 серії
ECONOMY

Спалювання на решітці з програмним регулюванням подачі повітря

Компанія Teisen Products Limited (Великобританія) виробляє котли періодичної дії Farm 2000 для спалювання малих тюків соломи [90]. Котли призначені для роботи під тиском до 2,5 бар і максимальною температурою води на виході 115°C. Котли економного класу (Рис. 1.16) не мають конвективного пучка, а лише топкову камеру, що оточена водяною сорочкою. Спалювання відбувається на решітці, крізь яку подається первинне повітря, та провалюється зола. Вторинне повітря через систему сопел вдувається перед поворотним газоходом назустріч потоку димових газів.

Спалювання з перемиканням зони введення дуття

Серія котлів HBR фірми Maskinfabrikken REKA A/S призначена для спалювання круглих та великих призматичних тюків соломи [91]. Особливістю цих котлів є розгалужена система подачі первинного і вторинного повітря (Рис. 1.17) і наявність цегляного фундаменту з зольним ящиком та решіткою. Спалювання тюків відбувається на провальній решітці,

через яку просипається зола та підводиться повітря для горіння. Особливістю конструкції котла є те, що подача повітря здійснюється потужними струменями направленими на тюк соломи. Спалювання розпочинають зі спрямування повітря на верх тюка через верхні канали та сопла. По мірі вигорання тюка оператор перемикає подачу повітря на нижні сопла направляючи струмені повітря на нижні шари соломи. Таким чином подача повітря на соломку у зоні горіння підвищує інтенсивність горіння й знижує емісію шкідливих газів.

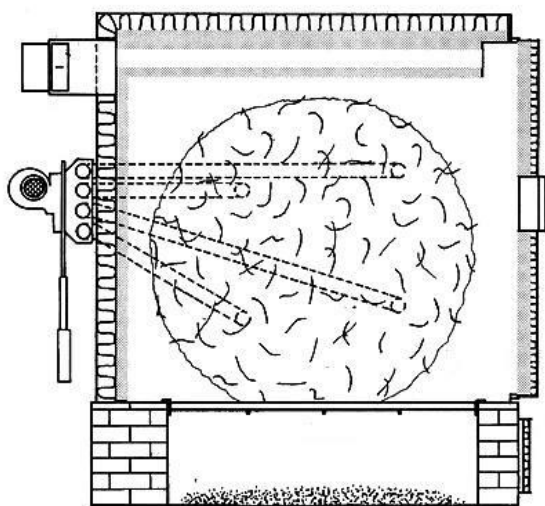


Рис. 1.17. Система розгалуженої подачі повітря в котлах НВР компанії Reka.



Рис. 1.18. Теплогенератори виробництва ВАТ „ПТЕМ” для спалювання великих тюків соломи.

Спалювання з керованою зміною орієнтації струменів дуття

ВАТ „Південтеплоенергомонтаж” [92] виробляє водогрійні теплогенератори періодичної дії серії RAU-2 (**Рис. 1.18**) за ліцензією компанії Passat Energi A/S (Данія). Теплогенератори призначені для роботи при атмосферному тиску теплоносія та його температурі за теплогенератором до 80°C. Плаваюча топкова камера циліндричної форми $\varnothing 1,6$ і довжиною 2,8 м призначена для спалювання циліндричних та призматичних тюків соломи. У теплогенераторах великої потужності топка вміщує кілька великих тюків. Подача повітря здійснюється одним або кількома вентиляторами (залежно від потужності) через направляючі соплові апарати. У соплі встановлено поворотний розсікач, який ділить потік повітря на первинне та вторинне. Потік вторинного дуття завжди спрямований у верхню частину топкового об'єму, а

потік первинного повітря направляється на тюк соломи

Спалювання з самоподачею тюків у зону горіння

Котли компанії Skeltek (Данія) мають I-подібне компонування топкового об'єму і конвективних поверхонь теплообміну [93]. Горіння відбувається тільки в нижній частині топки, куди подається надлишкове повітря, а верхня частина об'єму служить місцем для розміщення тюків. По мірі вигорання соломи (Рис. 1.19) подача тюків палива в зону горіння топки відбувається "автоматично" під їх власною вагою.

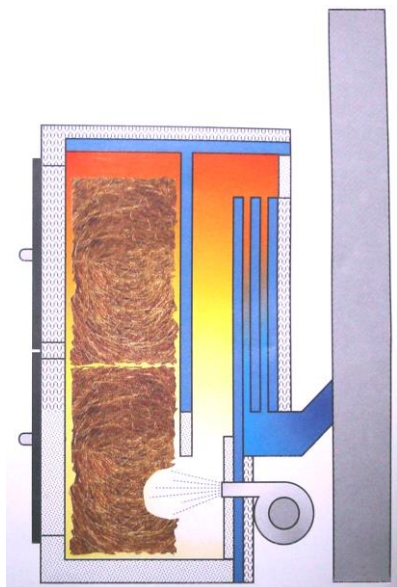


Рис. 1.19. Схема котла Skeltek серії RM з самоподачею тюків

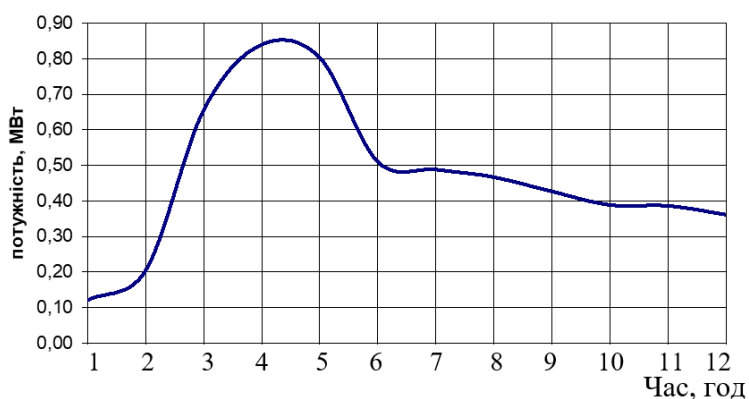


Рис. 1.20. Зміна теплової потужності котла з періодичної дії за цикл спалювання.

За даними ІТТФ НАНУ, для котлів періодичної дії характерна нестабільність теплової потужності протягом циклу спалювання одного завантаження соломи. На Рис. 1.20 наведено графік зміни теплової потужності від запалювання до завершення вигорання для котла RAU-2-1210 номінальною потужністю 980 кВт.

З наведених даних видно, що розрахункова теплова потужність котла досягається лише протягом короткого періоду – до 20-25% тривалості циклу, а потужність середня за цикл становить 35% від номінальної. Якщо врахувати тривалість операцій видалення золи та завантаження свіжих тюків, то середня потужність є ще меншою. У зв'язку з цим, в зарубіжній практиці *при виборі котла періодичної дії рекомендується приймати його потужність у три рази більшою за розрахункове теплове навантаження приєднаної системи опалення*. Враховуючи те, що питома вартість соломоспалювальних котлів значно вища за відповідний показник газових котлів, цей фактор має істотний

негативний вплив на економічну ефективність використання соломи як палива.

Технологічним питанням спалювання соломи в літературі найбільше уваги приділено в роботах Жовміра М.М. [94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101]. Питанням впровадження соломоспалювальних котлів присвячені роботи Баштового А.І. [102, 103]. Зокрема, надано оцінку кількості котлів у сільській місцевості по областях України, які можуть бути заміщені соломоспалювальними котлами, і величини заміщення у цьому разі традиційних паливно-енергетичних ресурсів.

Питанням виробництва композиційних палив на основі торфу і рослинної біомаси присвячені роботи Снежкіна Ю.Ф. [104, 105], Корінчука Д.М. [106, 107], Процишина Б.М. [108], Мальованого М.С. [109], Бать Р.Я. [110]. Зокрема, в цих роботах розроблено технологію виготовлення з торфу та рослинної біомаси композиційного твердого палива (ТП) з заданими енергетичними та механічними якісними показниками для використання в теплоенергетичних установках. Висвітлено результати теплофізичних досліджень зразків композиційних палив на основі соломи з використанням як домішки та зв'язуючого подрібненого вугілля та відходів нафтопереробки. Наведено схему мобільної установки для вироблення штучного палива.

Питанням виробництва брикетів з біомаси присвячені роботи Трошина А.Г. [111], Удовиченко Г.А. [112], Побединский В.М. [113], Мальований М.С. [114]. В роботах розглянуто передовий досвід із виробництва альтернативних видів палива. Визначено основні параметри і режими роботи технологічних ліній із виробництва паливних брикетів. Наведено фізико-механічні та хімічні властивості соняшникової лузги і брикетів. Проаналізовано дослідження технічних засобів і публікацій з виробництва паливних брикетів із лузги соняшnikового насіння та соломи. Представлено останні розробки технологічного обладнання з виробництва альтернативних видів палива. Досліджено особливості формування паливних гранул із використанням деревних відходів і в'язучого органічного походження. Запропоновано установку для гранулювання. Досліджено технічні характеристики одержаних гранул.

Аналіз життєвого циклу (LCA) збирання і енергетичного використання пожнивних решток кукурудзи.

У роботі [115] авторів Снежкін Ю.Ф. та ін. вивчається вплив зміни у витратах енергії під час технологічного циклу попередньої підготовки біомасової сировини (подрібнення, сушіння, гранулювання та ін.) на

відношення між затраченою та отриманою енергією. Недоліком дослідження є те, що витрати енергії під час сировинного циклу збору біомаси та її транспортування не були враховані під час розрахунку енергетичної ефективності використання різних видів біомаси як палива для виробництва теплової енергії.

Енергетичну ефективність використання сировини сільськогосподарського походження розглянуто в роботі Клюса С.В. [116]. Автором виконано розрахунок коефіцієнту енергетичної ефективності для різних варіантів вирощування зернових культур з метою виробництва енергії. При розрахунку коефіцієнту енергетичної ефективності враховано енергетичний еквівалент технічних засобів, енергію палива та енергетичний еквівалент насіння та добрива. В даному дослідженні увагу акцентовано на витратах енергії, що використовується під час вирощування основної продукції та на варіантах розподілення витрат енергії між основною та побічною продукцією рослинництва. В роботі, під час розрахунку коефіцієнту енергетичної ефективності не враховано витрати енергії під час технологічного циклу підготовки біомасової сировини до виробництва енергії (перевезення, збір, завантаження, зберігання та попередня підготовка біомаси).

Попри наявність робіт українських вчених, які стосуються різних аспектів та стадій життєвого циклу використання біомаси для виробництва енергії загальною особливістю є відсутність комплексного підходу до такого аналізу з врахуванням як енергетичних так і екологічних показників, та відсутність врахування критеріїв сталого розвитку. Розширений комплексний підхід спостерігається у роботі [117], де автором виконано аналіз енергетичної та екологічної ефективності використання лісосічних відходів та соломи зернових культур для виробництва теплової енергії в умовах України. В даній роботі буде продовжено використання запропонованої методики оцінки життєвого циклу для аналізу іншого виду сільськогосподарської сировини, який володіє найбільшим потенціалом в умовах України, а саме побічної продукції вирощування кукурудзи на зерно.

В роботах Yan Zhao, Peter C. Flynn, Thea Whitman, A. Kendall, L. Luo, Van Der Voet, Nalladurai Kaliyan, Ashish Manandhar та інших виконується аналіз життєвого циклу використання пожнивних решток кукурудзи для отримання різних видів кінцевого продукту: під прямого спалювання даного типу біомаси для виробництва теплової та електричної енергії до отримання біоетанолу другого покоління. Оцінка життєвого циклу виконується за різними показниками, проте ключовими у всіх дослідженнях є скорочення викидів парникових газів та енергетичні коефіцієнти.

В роботі [118] проводиться аналіз життєвого циклу використання ПП кукурудзи для виробництва біоетанолу з акцентом на дослідженні різних варіант транспортування сировини до місця використання: у вигляді тюків та гранул. Робиться висновок, що перевезення у вигляді тюків для потужності установки з виробництва біоетанолу в 114 млн л/рік має менший вплив на оточуюче середовище за викидами парникових газів. Найбільш чутливими показниками є розмір установки, об'ємна щільність сировини та енергія, що витрачається на гранулювання.

Результати дослідження викидів парникових газів та загального споживання енергії протягом життєвого циклу використання ПП для виробництва біоетанолу другого покоління в Китаї [119] вказують на чутливість показників ефективності до розподілення витрат між основною та побічною продукцією. 51-55% від загальних викидів парникових газів при роботі установки потужністю 1 МДж припадають на процес енергетичного перетворення сировини у біопаливо.

Аналіз життєвого циклу заготівлі пожнивних решток кукурудзи для виробництва біопалива також виконано в роботі [120] для умов трьох регіонів Канади, де найбільше вирощується кукурудза на зерно. У якості показників впливу впровадження технології також розглядаються викиди парникових газів та енергетична ефективність. Авторами розглядаються лише етапи сировинного циклу використання пожнивних решток кукурудзи, проте з врахуванням ресурсів, витрачених на виробництво добрив та гербіцидів. Увага приділяється кількості пожнивних решток, що збираються з поля (у процентному співвідношенні), схемі збору сировини з поля (однопрохідна, двопрохідна) та методу розподілення витрат між основною та побічною продукцією (за масою, за цінністю, системно). Зі збільшенням кількості сировини, що забирається з поля збільшується вплив на оточуюче середовище, тому важливим є досягнення компромісу між даними показниками.

1.4. Дослідження з анаеробного зброджування ПП АПК (солома, стебла кукурудзи, лушпиння соняшника)

Розробці наукових засад та експериментальним дослідженням ефективності анаеробного зброджування пожнивних решток присвячені роботи вітчизняних вчених Голуба Г. А. [121], Кучерука П. П. [122, 123], Фльонца І. В. [124], та закордонних вчених Mancini G. [125], Li Y. [126], Memon M. J. [127], Shrestha S. [128], Dahadha, S., [129], Kong X. [130], Li P. [131], Croce S. [132] та ряду інших.

Так, в роботі [121] досліджувався вплив на величину питомого виходу біогазу додавання до гранул з пшеничної соломи меляси та сухого жому. В

роботах [122, 123] досліджувались показники виходу біогазу (питомий вихід та швидкість виходу біогазу/метану) при періодичному анаеробному зброджуванні гранул соломи пшениці, сої та ріпаку. Проаналізовано вплив механічного подрібнення, а також екструзії соломи пшениці на потенціал та швидкість утворення біогазу. В роботі [124] досліджено залежність виходу біогазу від попередньої обробки соломи розчином $\text{Ca}(\text{OH})_2$ різної концентрації, способу додавання розчину гашеного вапна до соломи (до, під час, після екструзії). В роботі [125] досліджувався вплив трьох різних методів хімічної попередньої обробки на вихід біогазу із соломи пшениці. В роботі [126] досліджувався вплив попередньої обробки соломи пшениці аміаком на вихід біогазу. В роботі [127] солому пшениці попередньо обробляли гідроксидом калію (KOH), щоб збільшити її здатність до біологічного розщеплення з виробництвом біогазу. В роботі [130] досліджувався вплив обробки соломи пшениці лігноцелюлолітичним мікробним консорціумом ТС-5 на вихід метану. З досліджень різних авторів видно, що переважна більшість методів попередньої обробки лігноцелюлозної агробіомаси, як то солома пшениці, в різній мірі дозволяє збільшити питомий вихід біогазу за рахунок підвищення біодоступності целюлози при руйнуванні лігноцелюлозних комплексів, збільшення питомої поверхні контакту та пористості матеріалу, зниження кристалічності целюлози, тощо. Втім більшість досліджень сконцентровані на солі пшениці, в меншій мірі на поживних рештках кукурудзи та соняшника, і не дають повної інформації про кінетику розпаду органічної речовини гранульованої форми соломи в залежності від її концентрації в реакторі.

Солома зернових, стебла кукурудзи, стебла та кошики соняшнику, а також інша стебло-листяна біомаса, яка утворюється як побічний продукт разом з цільовою аграрною продукцією, останнім часом все більше розглядається як сировина для виробництва біогазу. Аналіз досліджень різних авторів показав, що головною задачею, яку необхідно вирішити задля ефективного перетворення поживних решток на біогаз, є найбільш повне руйнування лігноцелюлозних комплексів (ЛЦК) з вивільненням цукрів та інших поживних речовин, доступних для метаболізму метанутворюючих бактерій та архей.

Солома пшениці, наприклад, містить в своєму складі 30...45% целюлози, 20...25% геміцелюлози, 15...20% лігніну та лише 1,5% жирів і 4,7% білків [133]. Таким чином, основний потенціал виробництва біогазу з соломи пов'язаний із вмістом (гемі-)целюлози. Целюлоза та геміцелюлоза в рослинній тканині щільно огорнуті лігніном, тому важкодоступні для бактерій (**Рис. 1.21**).

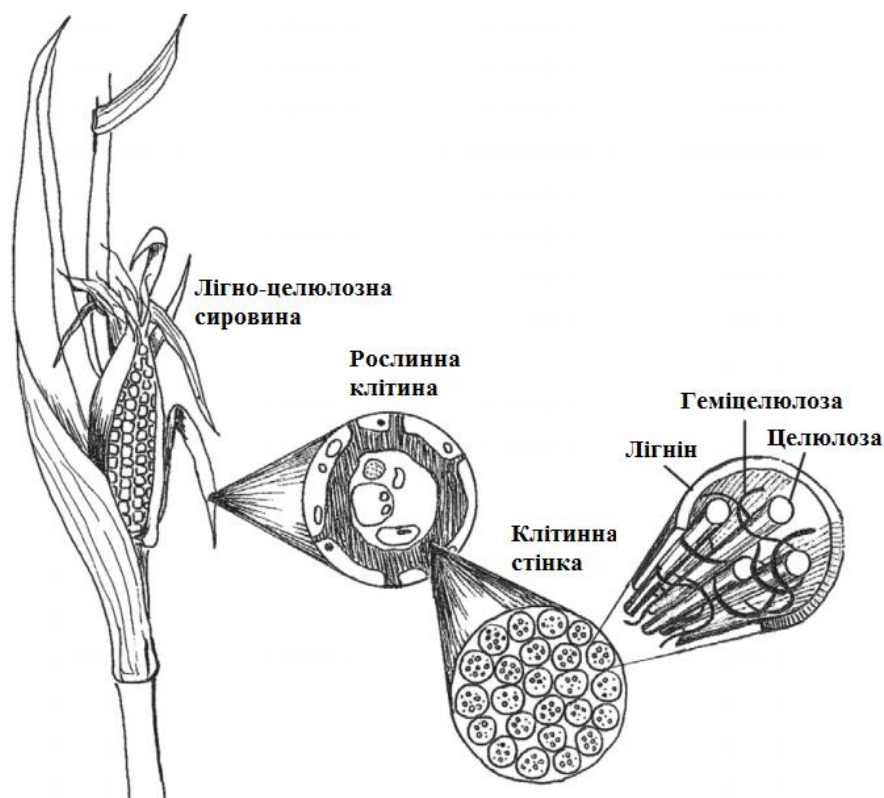


Рис. 1.21. Структура рослинних тканин

Гідроліз лігноцелюлозних комплексів є лімітуючою стадією при анаеробному зброджуванні [134, 135] і тому визначає швидкість розпаду органічної речовини, а відтак і швидкість виходу біогазу. Руйнування ЛЦК відкриває доступ бактеріям до (гемі-)целюлози, що дозволяє збільшувати як потенціал так і швидкість виходу біогазу. Ряд досліджень показали вплив різних методів попередньої обробки лігноцелюлозної агробіомаси на показники виходу біогазу (**Табл. 1.4**).

Табл. 1.4. Вихід CH_4 в залежності від способу обробки [122].

Тип соломи	Спосіб попередньої обробки	Вихід CH_4 , мл/гСОР	Посилання
Солома пшениці	Без обробки	189	[136]
- // -	Подрібнення (до розміру 0,5-1,0 мм)	275	[136]
- // -	Паро-вибуховий (15 хв при 180 °С, 1 кг соломи + 3 кг води)	331	[136]
- // -	Екструзія	245*	[124]
- // -	Екструзія з одночасним внесенням $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з розрахунку 150 кгСаО/т соломи	399*	[124]
- // -	Екструзія	224*	[121]

Тип соломи	Спосіб попередньої обробки	Вихід CH ₄ , мл/гСОР	Посилання
- // -	Екструзія, з додаванням 5% жому по масі	242*	[121]
Солома вівсяна	Вапнування	287	[137]
- // -	Паро-вибуховий	197	[137]
- // -	Обробка кислотою + паро-вибуховий	201	[137]
Солома рисова	Без обробки (частки 3-5 мм)	240	[138]
- // -	З додаванням фосфату, 155 мгР/л	250	[138]
Стебла кукурудзи	Без обробки	78	[139]
- // -	Витримування 20 діб в розчині з 8% NaOH + 5% аміаку + 4% карбонату (сечовини)	240	[139]
- // -	Без обробки	100	[140]
- // -	Обробка кислотами: 2% H ₂ SO ₄ → 2% HCl → 4% CH ₃ COOH → 3% H ₂ O ₂ →	176 163 145 217	[140]
- // -	Обробка лугом: 8% NaOH → 8% CaOH ₂ → NH ₃ ·H ₂ O →	164 207 168	[140]
Солома ріпакова	Без обробки	267	[141]
- // -	Обробка лугом NaOH (при 38 ⁰ С, 18 год)	316	[141]
- // -	Пророщування грибів (7 діб при 18 ⁰ С, з внесенням розчину: 1% КН ₂ РО ₄ , 1% NH ₄ Cl, 0.2 % карбонату, 1 % NaHCO ₃)	222	[141]

*– мл біогазу на 1 г СР.

З наведених в Табл. 1.4 даних видно, що різні методи попередньої обробки переважно призводять до збільшення виходу біогазу з поживних решток. Так, наприклад, розглянуті методи обробки соломи пшениці дозволили збільшити питомий вихід CH₄ на 1 г СОР соломи на 45-75%, стебел кукурудзи – на 45-207%. При цьому, пророщування грибів на ріпаковій соломі, навпаки, призводило до зменшення виходу біогазу на 17%, що може пояснюватись втратою органічного вуглецю на приріст маси грибів. Більшість запропонованих методів передбачають використання реагентів, що підвищує ресурсозалежність технології виробництва біогазу та впливають на склад

утворюваного дигестату, а тому можуть мати обмежене застосування на практиці.

Одним з перспективних та доступних в промисловому масштабі методів попередньої обробки поживних решток є екструзія, що вже використовується, як правило, для виробництва товарних гранул для спалювання в котлах. На даний час відомо про результати досліджень утворення біогазу з гранульованої рослинної сировини, хоча їх можна вважати досить обмеженими. Так, наприклад, в роботі [124] проводились дослідження на предмет інтенсивності метанового бродіння гранул з соломи пшениці в залежності від обробки розчином $\text{Ca}(\text{OH})_2$ різної концентрації (50, 100 та 150 кг CaO /т соломи) та способу замочування в розчині $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (перед екструзією, під час екструзії, після екструзії). Результати досліджень показали, що найбільший вихід біогазу отримано з гранул екструдованої соломи пшениці, які оброблялись розчином гашеного вапна $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (з розрахунку 150 кг CaO /т соломи пшениці) під час екструзії – 399 м³/т, що на 63 % більше від виходу біогазу, який отримано з контрольної проби (необроблена солома). Вихід біогазу з гранул соломи пшениці, яка оброблялася розчином $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з розрахунку 50 кг CaO /т соломи до екструзії, порівняно з іншими концентраціями, є найнижчим. Оптимальною концентрацією розчину $\text{Ca}(\text{OH})_2$ для впровадження у виробництво автори роботи вважають 100 кг CaO /т соломи.

Ще одну роботу було присвячено дослідженню виходу біогазу із суміші гранул з пшеничної соломи, меляси і сухого жому [121]. При періодичному метановому бродінні протягом 41 доби за температури 37,5⁰С з гранул соломи пшениці отримано 224 м³/тСР біогазу, а при додаванні до гранул 5% (від маси гранул соломи) жому та меляси – 242 м³/тСР та 244 м³/тСР біогазу відповідно.

Для оцінки можливості використання сировини для виробництва біогазу важливим є аналіз компонентного складу. Найбільш важливими є показники вмісту біогенних елементів C:N:P:S , а також ряду інших макро- та мікроелементів $\text{K, Ca, Fe, Ni, Co, Mn, Mo, Cu, W, Se, Zn}$, що входять в склад клітинної маси бактерій, є каталізаторами позаклітинних ензимних реакцій або ж відіграють важливу роль в трансформації хімічних сполук в процесі метанового бродіння.

На **Рис. 1.22** наведено порівняння співвідношення C:N , оцінених на основі даних про вміст вуглецю та азоту в деяких видах поживних решток [142].

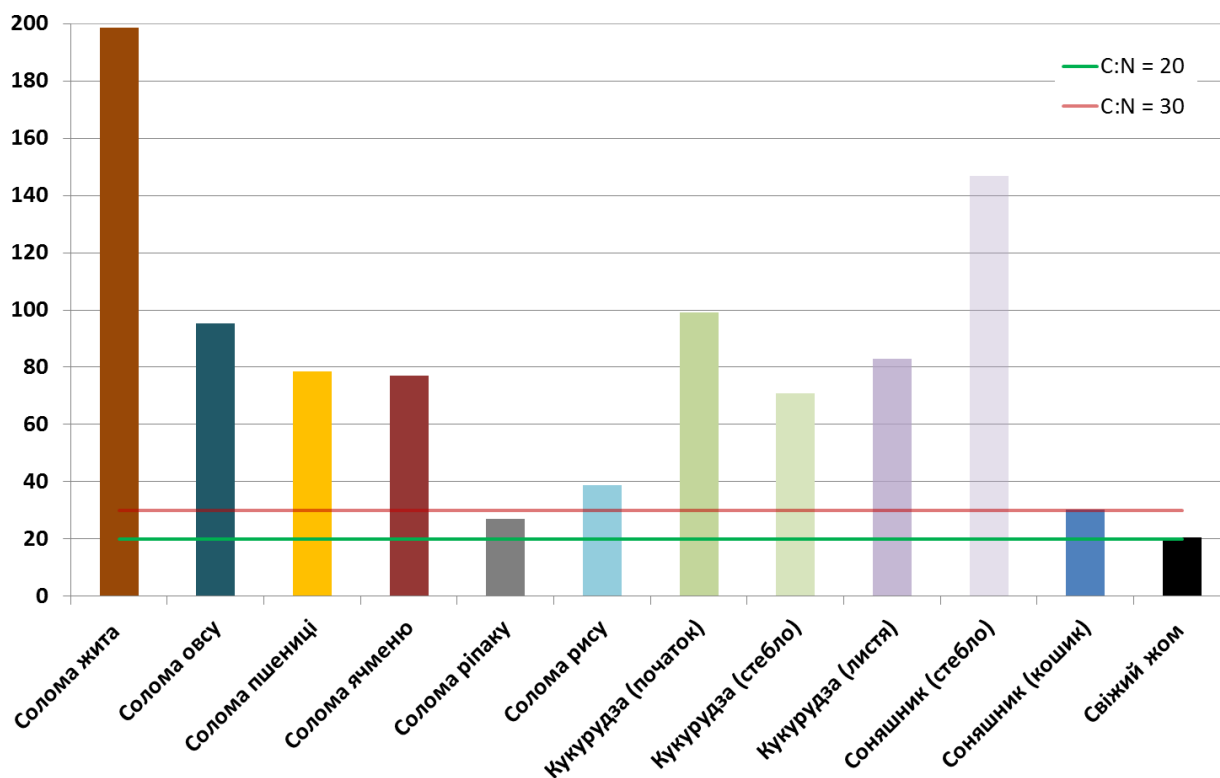


Рис. 1.22. Співвідношення C:N у побічній рослинній продукції.

Як видно, в більшості випадків поживні рештки характеризуються відносно високим співвідношенням C:N, не оптимальним для процесу метанового бродіння (C:N=20...30). Це вказує на необхідність коригування співвідношення C:N за рахунок додавання інших видів сировини, з високим вмістом азоту (наприклад, гною свиней чи пташиного посліду).

У випадку монозброджування поживних решток високе значення показника C:N може призвести до дефіциту азоту, а відтак обмеження росту популяції бактерій. Для нормального росту популяцій бактерій рекомендоване співвідношення C:N:P:S складає 600:15:5:1 [143]. В соломі пшениці, наприклад, співвідношення C:N:P:S складає 570,5:4,6:1,2:1,0. Це свідчить про незбалансованість вмісту макро-нутрієнтів, зокрема про дефіцит азоту, сірки та фосфору.

В **Табл. 1.5** наведено рекомендовані діапазони концентрацій мікроелементів, необхідні для нормального протікання процесу метанового бродіння в біореакторах.

Табл. 1.5. Рекомендовані діапазони концентрацій мікроелементів в біореакторах метанового бродіння [144].

Мікроелемент	Оптимальна концентрація, мг/кгСР	
	від	до
Fe	750	5000
Ni	4	30
Co	0,4	1
Mo	0,05	16
W	0.1	30
Mn	100	1500
Cu	10	80
Se	0,05	4
Zn	30	400

Аналіз даних про вміст окремих хімічних елементів в соломі пшениці, соломі та стрижнях кукурудзи [145] показав, що левову частку в них складає кремній – від 24 до 32% до маси зольного залишку (**Рис. 1.23**).

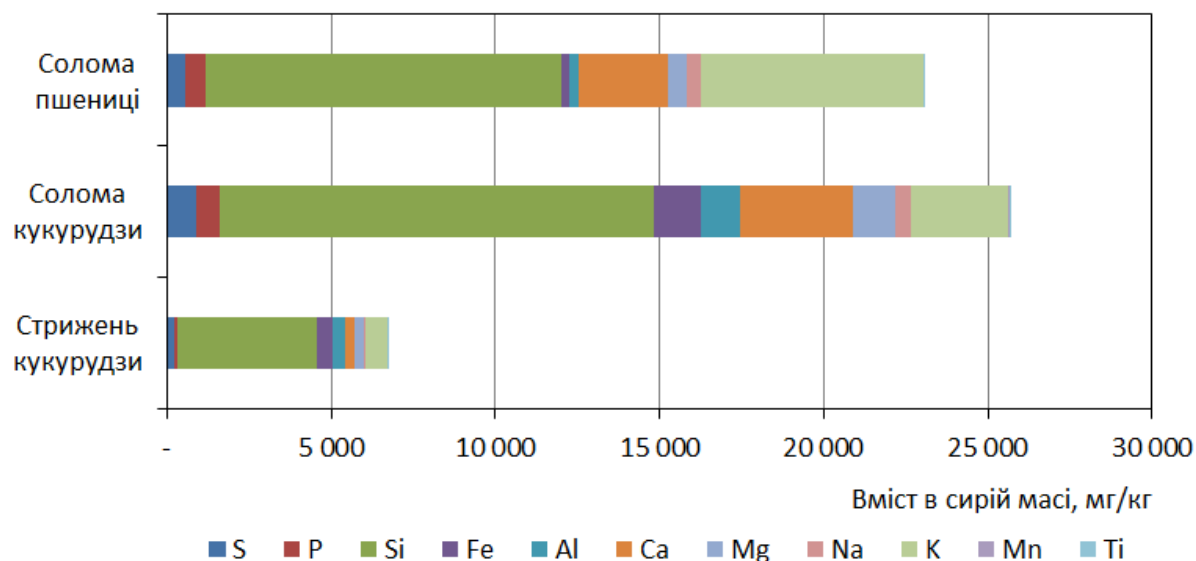


Рис. 1.23. Вміст деяких елементів в соломі пшениці, соломі та стрижнях кукурудзи

В перерахунку на «сиру» масу вміст кремнію в соломі пшениці складе 10,82 г/кг, в соломі кукурудзи – 13,22 г/кг, в стрижнях кукурудзи – 4,28 г/кг. При цьому, з наведених даних випливає, що відсутні такі важливі мікроелементи як *Ni*, *Co*, *Mo*, *Cu*, *W*, *Se*, *Zn*. Окрім того, в соломі пшениці не виявлено такого важливого елемента як *Mn*. В перерахунку на суху речовину концентрація *Fe* в соломі пшениці (при вмісті СР 10%) складе 2360 мг/кгСР, що відповідає рекомендованому діапазону, наведеному в **Табл. 1.5**. В роботі

[146] показано, що при зброджуванні соломи в дефіциті будуть *Fe, Ni, Co, Mo, W, Mn, Cu, Se* та *Zn*, що підтверджує наведені вище дані (за виключенням вмісту *Fe*).

Таким чином, ефективне зброджування поживних решток вимагає застосування ефективного методу попередньої обробки, що дозволяє зруйнувати ЛЦК, а також збалансовування елементарного складу органічної речовини, в т.ч. з використанням інших видів сировини.

1.5. Виробництво та споживання біометану

Біометаном вважається біогаз, що за своїми фізико-технічними характеристиками відповідає стандартам на природний газ, призначений для подачі до газотранспортної та газорозподільної системи або для використання в якості моторного палива. Біогаз складається переважно з CH_4 та CO_2 (сумарно до 98-99%) та домішок (0-2%). В залежності від виду сировини та технології, що застосовується, склад біогазу може значно відрізнятися, що багато в чому визначає технологію його очистки при виробництві біометану.

Існує три основні причини, згідно яких необхідно очищувати біогаз:

1. Забезпечення відповідності вимогам до властивостей палива, яке застосовується в різного типу обладнанні (двигуни, котли, паливні елементи);
2. Збільшення калорійності газового палива;
3. Стандартизація газових палив.

Методи очистки біогазу від домішок залежать від способів його подальшої утилізації. Найбільш суворі вимоги до очистки біогазу висуваються у випадку його подачі в мережу природного газу та при прямому використанні в якості моторного палива.

Усі практичні аспекти функціонування ринку природного газу охоплені рядом постанов (підзаконних актів) НКРЕКП, включно з Постановою 2493 «Про затвердження кодексу газотранспортної системи» (zareєстрована Міністерством юстиції № 1378/27823, 06.11.2015). У документі позначається, що всі суб'єкти газового ринку мають рівні права доступу та підключення, забезпечуючи збереження цілісності, безпечну та стабільну роботу газотранспортної системи. Постачальник також забезпечує необхідні параметри для будь-якого газу, що транспортується в системі. Природний газ, що подається в газотранспортну систему, повинен відповідати таким вимогам (Табл. 1.6):

Табл. 1.6. Вимоги до природного газу, що подається в газотранспортну систему

Вміст метану (C ₁), мол. %	≥ 90
Вміст етану (C ₂), мол. %	≤ 7
Вміст пропану (C ₃), мол. %	≤ 3
Вміст бутану (C ₄), мол. %	≤ 2
Вміст пентану та інших більш важких вуглеводнів (C ₅ +), мол. %	≤ 1
Вміст азоту (N ₂), мол. %	≤ 5
Вміст вуглецю (CO ₂), мол. %	≤ 2
Вміст кисню (O ₂), мол. %	≤ 0,02
Вища теплота згоряння (25°C/20°C), МДж/нм ³ (кВт·год/нм ³)	36,2-38,30 (10,06-10,64)
Вища теплота згоряння (25 °C/0 °C), МДж/нм ³ (кВт·год/м ³)	38,85-41,10 (10,80-11,42)
Нижча теплота згоряння (25 °C/20 °C), МДж/нм ³ (кВт·год/нм ³)	32,66-34,54 (9,07-9,59)
Температура точки роси за вологою °C при абсолютному тиску газу 3,92 Мпа	≤ -8
Температура точки роси за вуглеводнями при температурі газу не нижче 0 °C	≤ 0°C
Вміст механічних домішок:	відсутні
Вміст сірководню, г/нм ³	≤ 0,006
Вміст меркаптанової сірки, г/нм ³	≤ 0,02

Оскільки сучасні комерційні технології збагачення та очищення біогазу можуть забезпечити вміст CH₄ в межах 95-98%, вищезазначені критерії можуть бути виконані, отже, для виробництва біометану та заміщення природного газу біометаном в Україні не існує жодних технологічних бар'єрів.

Основні способи виробництва біометану

Існують три основних способи виробництва біометану:

1. Мікробіологічна ферментація органічного матеріалу з низьким вмістом лігноцелюлозних комплексів (ЛЦК), в основному з сировини та ПП АПК, органічної фракції ТПВ, стічних вод та осадів в контрольованих реакторах з отриманням біогазу та наступної його очистки від домішок з підвищенням

вмісту метану та доведенням до якості природного газу. Варіантом способу є збір біогазу на полігонах та звалищах ТПВ з наступною його очисткою від домішок та доведенням до якості природного газу.

2. Газифікація біомаси (з високим вмістом ЛЦК, переважно деревини), з отриманням синтез-газу (суміші водню, окису вуглецю та метану) з подальшою його метанізацією, очищенням та доведенням до якості природного газу.
3. Отримання водню з відновлюваної електроенергії з допомогою електролізу (процес P2G) з наступною його метанізацією.

Технологія газифікації та метанізації знаходиться на стадії досліджень та пілотних проектів. Шляхом об'єднання виробництва біометану після мікробіологічної ферментації з виробництвом водню з допомогою електролізу можна отримати вигоди від зменшення викидів вуглецю, оскільки CO₂, який залишається після збагачення біогазу, може бути використаний у процесі метанізації водню. Таким чином можна значно підвищити загальну ефективність обох процесів, а також кількість виробленого біометану.

Методи збагачення біогазу до біометану.

Головним цільовим компонентом видалення при збагаченні біогазу до якості БМ є вуглекислий газ. Технологія його видалення є визначальною в загальній схемі очистки. Додатковими етапами очистки можуть бути попереднє видалення або доочистка від домішок, переважно H₂S, вологи, силоксанів, а також можлива корекція складу БМ по температурі точки роси та теплотворній здатності в залежності від вимог стандарту, що застосовується. Важливим компонентом схеми є очищення відхідних газів при скиданні в атмосферу.

В основі технологій, що застосовуються для збагачення біогазу, лежать сорбційні, фільтраційні та криогенні методи. Існують 6 основних комерційних технологій збагачення біогазу:

- Адсорбція при змінному тиску (АЗТ).
- Абсорбція водою (водяний скруббер) (АВ).
- Фізична абсорбція органічними сорбентами (ФА)
- Хімічна абсорбція органічними сорбентами (ХА)
- Мембранна сепарація (МС)
- Криогенна сепарація (КС)

Адсорбція при змінному тиску (АЗТ). Сутність методу АЗТ полягає в сорбції молекул CO₂ на поверхні матеріалів при підвищеному тиску. В якості сорбуючих матеріалів зазвичай застосовують активоване вугілля або

молекулярні сита. В процесі видаляються також O_2 та N_2 . Регенерація матеріалів відбувається шляхом десорбції при пониженому тиску. При застосуванні даного методу вологу та H_2S видаляють на попередньому етапі.

Абсорбція водою (водяний скруббер). Розчинність CH_4 в воді в 25 та 74 рази менше розчинності CO_2 та H_2S відповідно ($P=101.325$ Па, $T=20^\circ C$) [147, 148, 149]. Ця фізична здатність покладена в основу методу розділення газів шляхом абсорбції в водяному скруббері при підвищеному тиску (до 5-10 бар). Десорбція CO_2 та H_2S з води відбувається при пониженні тиску до атмосферного або шляхом вакуумування. Для інтенсифікації десорбції застосовують віддувку газів повітрям. Для попередження біологічного обростання системи водозабору на очисній лінії, рекомендується видаляти H_2S на попередній стадії. Пари води видаляють після станції збагачення. Особливістю даної технології є необхідність контролю вмісту O_2 в БМ, який попадає в нього з водою після віддувки повітрям.

Фізична абсорбція органічними сорбентами (фізико-органічний скруббер). Деякі органічні речовини здатні поглинати CO_2 та H_2S більш активно, ніж вода. В якості такого сорбенту зазвичай використовують поліетиленгліколь (наприклад, торгових марок Selexol[®] та Genosorb[®]). Основні процеси в даному випадку відбуваються по аналогії з технологією водяного скрубера. Сірководень рекомендується видаляти на попередньому етапі, оскільки при регенерації органічного сорбенту необхідна значна кількість енергії на його видалення.

Хімічна абсорбція органічними сорбентами (хімічний скруббер). Інші органічні речовини здатні до селективного хімічного зв'язування CO_2 при низькому тиску. В технології хімічного скрубера використовують речовини групи амінів (моноетаноламін, діметилетаноламін). Даний метод відрізняється високою ступенем видалення CO_2 при незначних втратах CH_4 . Регенерація сорбенту відбувається шляхом зворотної хімічної реакції, яка зазвичай ініціюється нагріванням та/або вакуумуванням. Сірководень видаляють на попередній стадії. Після збагачення, біометан осушують та стискають.

Мембранна сепарація. Мембранна сепарація буває двох основних типів: «газ-мембрана-газ» («сухі» мембрани) та «рідина-мембрана-газ» («мокрі» мембрани). Принцип «сухих» мембран базується на створенні різниці тисків по обидва боки від мембрани, при цьому молекули газів (CO_2 та H_2S) проходять скрізь пори мембрани, а молекули CH_4 залишаються. «Сухі» мембрани працюють при високому (>20 бар) або середньому (8-10 бар) тиску. У випадку «мокрих» мембран використовують абсорбенти (аміни), поглинаючи CO_2 , що дифундує через мембрану. Процес відбувається при низькому надлишковому тиску, близькому до атмосферного. Перед

збагаченням біогаз стискають та осушують. Після розділення необхідна доочистка від H_2S .

Кріогенна сепарація. Температури кипіння метану $-161,5^\circ\text{C}$, а вуглекислого газу $-78,5^\circ\text{C}$. При пониженні температури в умовах надлишкового тиску CO_2 переходить в рідкий стан, в той час коли метан знаходиться ще в газоподібному стані. При цьому CO_2 можна відносно легко відділити від метану. Виділений таким способом CO_2 є достатньо чистим та може бути товарним продуктом. На попередніх етапах з біогазу видаляють вологу та сірководень.

Видалення сірководню (H_2S). Для видалення H_2S застосовують біологічні, хімічні та фізико-хімічні методи. При біохімічній десульфуризації в біогаз потрапляє надлишкова кількість O_2 та N_2 , які необхідно враховувати при виборі подальшої технології його збагачення. У зв'язку з цим інші методи, такі як каталітичні перетворення в сірку на поверхні активованого вугілля, або реакція обміну с оксидом/гідроксидом заліза з утворенням FeS , в ряді випадків є більш бажаними.

Видалення кисню (O_2) та азоту (N_2). В технологіях збагачення біогазу, таких як АЗТ та мембрана сепарація, кисень та азот до певної міри видаляються разом з CO_2 .

Видалення води. Біогаз на виході з реактора або тіла полігону ТПВ має відносну вологість 100%. Маса парів води в ньому залежить від температури і складає 40 г/м^3 при 35°C . Типовим способом видалення вологи з біогазу є конденсація парів при низьких температурах. Для підвищення температури точки роси, перед охолодженням додаткового підвищують тиск біогазу.

У випадку використання біометану як моторного палива, температура точки роси повинна бути нижче -40°C при тиску 4 бар. В цьому випадку додатково застосовують адсорбцію парів води на поверхні сушильного агенту (силікагель або оксид алюмінію). Адсорбцію проводять при надлишковому тиску, після чого регенерують сушильний агент при зниженні тиску. Іншим способом пониження точки роси може бути абсорбція води в гліколі або гігроскопічних солях. Десорбція води відбувається при підвищенні тиску. Солі ж необхідно замінювати.

Видалення силоксанів. Для видалення силоксанів можна використовувати активоване вугілля. Вугілля регенерації не піддається, а тому необхідна його повна заміна. Іншим методом є абсорбція в рідкому розчині гідрокарбонатів. В Табл. 1.7 наведена порівняльна характеристика розглянутих технологій збагачення біогазу по показникам споживання енергетичних та матеріальних ресурсів, а також основним параметрам процесу.

Табл. 1.7. Порівняльна характеристика технологій збагачення біогазу [150]

		АЗТ	ВС	ФА	ХА	МС	КС
Споживання е/е	кВт·год / нм ³ БГ	0,2- 0,25	0,2- 0,3	0,23- 0,33	0,06- 0,15	0,18- 0,25	0,18- 0,33
Споживання тепла	кВт·год / нм ³ БГ	0	0	~ 0,3	0,5-0,8	0	0
Температура теплоносія	°С	-	-	55-80	110- 160	-	-
Необхідний тиск в системі	бар	4-7	5-10	4-7	0,1-4	5-10	
Втрати метану	%	1-5	0,5-2	1-4	0,1	2-8	
Необхідність очистки відхідних газів (вимоги стандартів EEG та GasNZV)		так	так	так	ні	так	так
Тонка доочистка біогазу від сірководню		так	ні	ні	так	реко м	так
Потреба в воді		ні	так	ні	так	ні	ні
Потреба в хімічних реагентах		ні	ні	так	так	ні	ні

Позначення: АЗТ – адсорбція при змінному тиску, ВС – водяний скруббер, ФА – фізична абсорбція, ХА – хімічна абсорбція, МС – мембранна сепарація, КС – криогенна сепарація.

Порівняльна енергетична ефективність різних технологій збагачення біогазу

Аналіз показує, що коефіцієнт корисного використання палива складає від 60% до 66% для різних технологій збагачення (**Рис. 1.24**). При цьому, більш ефективними є технології водяного скрубера, АЗТ та мембранної сепарації. Хімічний скруббер, внаслідок додаткового споживання тепла на технологічний процес регенерації сорбенту, енергетично менш ефективний.

У випадку виробництва енергії із незбагаченого біогазу в КГУ, загальна енергетична ефективність, при відсутності споживання тепла (типовий випадок на практиці), обмежена електричним ККД газопоршневого двигуна та не перевищує 35-40% (ефект когенерації відсутній).

Отримання біометану потребує додаткових капіталовкладень на збагачення біогазу, але дозволяє більш ефективно використати його енергетичні можливості шляхом подачі його в газотранспортну мережу і

доставки до споживача, у якого можна реалізувати когенераційну технологію в повному обсязі. Тому цей шлях використання біогазу (через збагачення і подачу його в ГТС) слід вважати перспективним.

Нові можливості виробництва біометану в Україні пов'язані з виробництвом електроенергії та тепла з використанням газотранспортної мережі, включно з виробництвом електроенергії в години пікового споживання; використанням біометану в якості моторного палива для комунального та с-г транспорту; а також фізичним або віртуальним експортом біометану в ЄС.

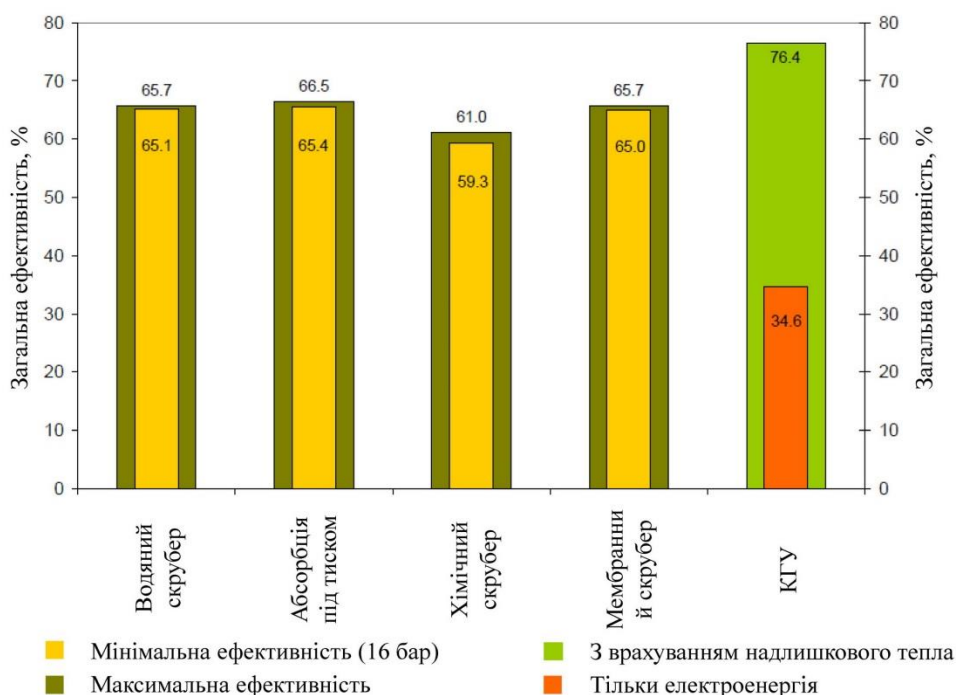


Рис. 1.24. Енергетична ефективність виробництва біометану та виробництва електричної та теплової енергії в КГУ [151].

1.6. Формулювання науково-прикладної проблеми та постановка завдань дослідження

З аналітичного огляду сучасної науково-технічної літератури, патентів і нормативних документів, що стосуються технологій виробництва енергії з біологічних видів палива впливає, що сьогодні в Україні розвиток біоенергетичних технологій суттєво відстає від країн ЄС і світу. Це свідчить про те, що до теперішнього часу недостатньо розроблена відповідна нормативно-правова база та теоретичні засади і методологічний апарат, методи та засоби використання біологічних видів палива, зокрема, твердих видів біопалива та біогазу і біометану, отриманих з аграрної сировини. Вищевикладене дозволяє сформулювати *актуальну науково-технічну проблему*, яка полягає у відсутності інформації про реальний енергетичний

потенціал біомаси в Україні, у недостатності дослідження процесів заготівлі біомаси, її перетворення у тверде біопаливо, процесів спалювання та анаеробного зброджування біомаси та їх екологічного впливу на довкілля, у наявності ряду законодавчих перешкод для успішного впровадження біоенергетичних технологій в Україні.

Для вирішення поставленої науково-технічної проблеми в роботі сформульовані такі завдання:

- розробити науково-технічні засади оцінювання енергетичного потенціалу біомаси, в якій буде уточнено відсоток теоретичного потенціалу побічної продукції (ПП) виробництва с-г культур, що може бути використаний для виробництва енергії, а також буде враховано нові поточні та прогнозні складові цього потенціалу; на основі розробленої методики оцінити енергетичні потенціали біомаси ряду областей та України в цілому;

- розробити дорожню карту розвитку біоенергетики України до 2050 р., яка враховуватиме динаміку застосування твердих біопалив, біогазу, біометану, рідких біопалив при виробництві теплової та електричної енергії, а також в якості моторних палив;

- визначити для умов України технічні можливості збирання і енергетичного використання ПП виробництва кукурудзи на зерно (надалі – ПП кукурудзи), які базуватимуться на аналізі економічно доцільних технологій заготівлі та виборі технічних засобів для їх виконання, беручи до уваги передовий світовий досвід;

- виконати аналіз енергетичної ефективності та скорочення викидів парникових газів при використанні ПП кукурудзи у вигляді тюків, гранул та брикетів для виробництва теплової енергії;

- проаналізувати можливості застосування електрогенеруючих потужностей на біомасі, біогазі і біометані для балансування енергетичної системи України;

- вдосконалити технологію спалювання відходів деревини в котлах з топковим пристроєм ретортного типу, яка дозволить розширити застосування технології на деревне паливо з підвищеною вологістю;

- вдосконалити технологію спалювання тюків соломи в водогрійних котлах періодичної дії, в якій будуть забезпечені більш стабільні показники поточної теплової потужності котла та зниження емісії CO₂;

- вдосконалити технологію спалювання малих тюків соломи в водогрійних котлах ретортно-сигарного типу, в якій буде організоване безперервне стабільне спалювання тюків соломи та забезпечено зниження викидів шкідливих речовин;

- отримати нові дані щодо показників виходу біогазу при розпаді поживних решток АПК в періодичному мезофільному процесі анаеробного зброджування;
- виконати техніко-економічні обґрунтування (ТЕО) ряду нових і перспективних для України біоенергетичних технологій: заготівлі ПП кукурудзи; виробництва гранул і брикетів з ПП кукурудзи; анаеробного зброджування аграрних відходів і залишків; виробництва і використання біометану.

1.7. Висновки до розділу

1. Проаналізовано стан і тенденції розвитку технологій виробництва енергії з біомаси в світі. Використання біомаси для енергетичних потреб в світі в 2017 р. становило **1112** млн т н.е./рік, з яких 86% – тверда біомаса, 7% – рідкі біопалива, 3% – тверді побутові відходи, решта – біогаз та промислові відходи (по 2% кожне). Частка біомаси складає **9,5%** у загальному постачанні первинної енергії і **13%** – у валовому кінцевому споживанні енергії у світі.

Валове внутрішнє споживання біомаси в ЄС-28 складає **144** млн т н.е./рік, що еквівалентно **13,6%** загального кінцевого споживання енергії (2017 р.). За окремими секторами внесок біоенергетики наступний: в споживанні теплової енергії – 16,9%; в споживанні електроенергії – 5,6%; у секторі транспорту – 4,6%. Стійкою тенденцією є збільшення обсягів виробництва енергії з агробіомаси.

2. Проаналізовано стан і тенденції розвитку технологій виробництва енергії з біомаси в Україні. Обсяг енергії, виробленої з ВДЕ в Україні в 2018 р., у кінцевому енергоспоживанні складав **3582** тис. т н.е., що еквівалентно **7,0%** загального кінцевого споживання енергії, зокрема: в електроенергетиці - 8,9%; у системах опалення - 8,0%; у транспортному секторі - 2,2%. З них найбільший внесок зробила біоенергетика – **77,3%**. Загальне постачання первинної енергії з біопалива та відходів становило **3195** тис. т н.е., що еквівалентно заміщенню **4 млрд м³/рік** природного газу. Зростання сектору за 2010-2018 рр. становить в середньому **31%** на рік.

3. Виконано порівняння розвитку біоенергетики в ЄС, світі і Україні. На сьогодні в Україні розвиток біоенергетичних технологій суттєво відстає від країн ЄС і світу. Порівняння структури генерації електроенергії з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в Україні з подібною структурою в світі і ЄС також показує нетипово низьку частку електроенергії з біомаси і біогазу в Україні. Так, в світі, ЄС і окремих країнах частка електроенергії з біомаси і біогазу складає **21-26%** від виробництва відновлюваної електроенергії (без гідроенергетики), а в Україні ця частка є практично в 2,5 рази меншою – **9%**.

За вироблену електроенергію з біогазу і біомаси сплачується всього **7%** всіх витрат за зеленим тарифом. Це свідчить про те, що до теперішнього часу недостатньо розроблена відповідна нормативно-правова база та теоретичні засади і методологічний апарат, методи та засоби використання біологічних видів палива, зокрема, твердих видів біопалива та біогазу і біометану отриманих з аграрної сировини.

4. На основі проведеного аналізу визначено основні методичні, технологічні та організаційні проблеми, вирішення яких необхідне для широкої і успішної реалізації біоенергетичних проєктів в Україні. Сформульовано актуальну науково-прикладну проблему, яка полягає у недостатності існуючих закономірностей та наукових результатів для подальшого підвищення ефективності виробництва енергії з біологічних видів палива, для оцінки реального енергетичного потенціалу біомаси в Україні, для дослідження процесів заготівлі біомаси, її перетворення у тверде біопаливо, процесів спалювання та анаеробного зброджування біомаси та їх екологічного впливу на довкілля. Визначено основні завдання дослідження для вирішення означеної проблеми.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ СТРАТЕГІЧНИХ ЗАСАД РОЗВИТКУ БІОЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ

2.1. Розроблення методики оцінки енергетичного потенціалу біомаси

Методика оцінювання ресурсів біомаси, придатної для енергетичного використання, включає оцінку теоретичного, технічно досяжного (технічного) та економічно доцільного (економічного) потенціалу біомаси, придатної для енергетичного використання.

Теоретичний потенціал – загальний максимальний обсяг наземної біомаси, теоретично доступної для виробництва енергії у фундаментальних біофізичних межах. Коли мова іде про біомасу с-г та енергетичних культур та лісів, теоретичний потенціал являє собою максимальну продуктивність при теоретично оптимальному менеджменті з урахуванням обмежень, що впливають з температури, сонячної радіації та опадів. У випадку відходів та залишків різного виду теоретичний потенціал дорівнює максимально утвореному обсягу цих відходів та залишків.

Технічний потенціал – частка теоретичного потенціалу, доступна за певних технічно-структурних умов та поточних технологічних можливостей. Крім того, беруться до уваги просторові обмеження, викликані конкуренцією між різними користувачами землі, а також деякі екологічні та інші нетехнічні обмеження.

Економічний потенціал – частка технічного потенціалу, що задовольняє критеріям економічної доцільності за даних умов.

Одним з найважливіших питань є те, яку частку потенціалу рослинних залишків сільського господарства можна використовувати для виробництва енергії, беручи до уваги, в першу чергу, потреби рослинництва й тваринництва. Для отримання відповіді на це питання розглянемо існуючі дослідження по цій проблемі та практичний досвід інших країн.

В ЄС та взагалі у світі найбільший досвід з енергетичного використання соломи має Данія. В цій країні в середньому з 5,5-6 млн т утвореної соломи близько 1,5 млн т (27%) утилізується як паливо, 1 млн т (18%) використовується як корм для худоби, 0,7 млн т (13%) іде на підстилку для худоби, і вільний залишок становить порядку 2,3 млн т (42%) (дані приблизно однакові протягом багатьох років). Численні дослідження, проведені в країні, показали, що наявний і очікуваний в майбутньому об'єм соломи набагато перевищує потреби всіх існуючих напрямів споживання [152].

Всебічне дослідження щодо можливості сталого застосування соломи на енергетичні цілі було виконано в Німеччині Регіональним інститутом сільського господарства Тюрінгії (TLL), Німецьким дослідницьким центром з

питань біомаси (DBFZ) і Центром Гельмгольца з екологічних досліджень (UFZ) [153, 154]. За його результатами, з 30 млн т/рік соломи зернових, що утворюється в Німеччині, 4,8 млн т/рік (16%) утилізується на потреби тваринництва, а 8-13 млн т/рік (~30%) можуть бути використані на енергетичні цілі з урахуванням критеріїв сталості (в дослідженні оброблено дані 1999-2007 рр.). Одним з висновків авторів дослідження по Німеччині є те, що солома як паливо в країні є «недовикористаною». Аналогічні дослідження для Греції та Швеції показали, що для енергетики можна брати 15% й 60% утвореної соломи, відповідно, тоді як решта має залишитися на полі для підтримки родючості ґрунту [155, 156].

Для Євросоюзу в цілому було проведено до десятка досліджень по питанню енергетичного застосування рослинних залишків. За їх результатами, на енергетичні потреби можна використовувати 25-50% врожаю соломи й ПП кукурудзи, 30-50% відходів виробництва соняшника, а решта біомаси має залишитися на полях [157, 158, 159, 160, 161, 162].

Система нульової обробки ґрунту, також відома як No-Till, – сучасна система землеробства, при якій ґрунт не обробляється, а його поверхня вкривається спеціально подрібненими залишками рослин – мульчею. Оскільки верхній шар ґрунту не розрихлюється, така система землеробства запобігає водній і вітровій ерозії ґрунту, а також значно краще зберігає воду. Дослідження, виконані для умов США показали, що для виробництва енергії можна використовувати 30-60% загального обсягу соломи та ПП кукурудзи. При застосуванні технології обробки ґрунту No-Till частка ПП кукурудзи, доступна для потреб енергетики, може зрости до 60-80% [163, 164, 165, 166, 167, 168, 169].

Існує ряд наукових досліджень, виконаних українськими фахівцями, щодо можливості й доцільності використання соломи та іншої ПП АПК для виробництва енергії. Так, в роботі [170] розроблено комп'ютерну імітаційну модель функціонування аграрного підприємства, яке застосовує частину соломи на виробництво гранул/брикетів і на пряме спалювання для отримання теплової енергії. Ця модель дає змогу встановити індивідуально для кожного підприємства, яку саме частку соломи можна виділити на енергетичні потреби з дотриманням бездефіцитного балансу гумусу. Для розглянутого в дослідженні підприємства картопле-зерно-тваринницького напрямку ця частка складає 38%.

В аналогічному дослідженні [171] розглянуто аграрне підприємство іншого типу (цукрово-зерно-тваринницького напрямку). Визначено, що в даному випадку частка соломи, яка може бути використана для виробництва енергії без завдання шкоди родючості ґрунтів, становить 86%. Узагальнюючи,

можна сказати, що обсяг соломи та іншої ПП АПК, доступний для енергетичного використання, залежить від особливостей і умов господарської діяльності конкретного агропідприємства. Згідно [172] він може коливатися від 30% до 100% загального об'єму відходів. Подальший розвиток такого підходу можна знайти в дослідженні [173].

В роботі [174] розроблено модель та отримана залежність для розрахунку граничного обсягу соломи, яку можна використати на теплові потреби агропідприємства. Обсяг такої соломи залежить від річного дефіциту гумусу (кг/га). Запропонована залежність враховує показники, що характеризують с-г виробництво України упродовж останніх років. В роботі зазначено, що за загального дефіциту гумусу у більше ніж 67 кг/га, використання соломи на теплові потреби неможливе через недотримання умови позитивного балансу гумусу. Граничний обсяг соломи, яку можна використовувати на теплові потреби, за нульового балансу гумусу становить близько 40%. Згідно розробленої моделі, виконано розрахунок потенціалу соломи, доступної для енергетичних потреб в Житомирській області за даними 2005-2011 рр. Для області в цілому частка доступної соломи становить близько 30%, тоді як для окремих районів вона коливається від 0 до 49%.

Відносно ПП кукурудзи і соняшника, в розглянутих дослідженнях знайдено лише загальні (якісні) рекомендації. Так, в дослідженні [175] зроблено висновок, що частину врожаю зерна та листостеблову масу кукурудзи можна використовувати на енергетичні потреби.

Результати розгляду практичного досвіду країн Європи й досліджень, проведених українськими та зарубіжними фахівцями, зведено в **Табл. 2.1**.

Табл. 2.1. Частка ПП сільського господарства, доступна для виробництва енергії.

Країна / регіон	Вид рослинних залишків*	Частка теоретичного потенціалу, доступна на енергетичні потреби
Німеччина [153, 154]	солома	30%
Греція [155]	солома	15%
	К, С	60%
Швеція [156]	солома, К	60%
Польща [176]	солома	20%
Естонія [177]	солома	15-65%
ЄС-15 + Норвегія і Швейцарія [158]	солома	50%
	К	25%
ЄС-27 [157]	солома, К, С, І	30%

Країна / регіон	Вид рослинних залишків*	Частка теоретичного потенціалу, доступна на енергетичні потреби
ЄС-27 [159]	солома	45%
	К, С	40-50%
ЄС [160]	солома, К	25%
ЄС [161]	солома, К, С	30%
ЄС [162]	солома	50%
США [167]	Солома	40%
США [169]	солома, К	30-40%
США [163]	К	30-60%
		76-82% (при No-Till)
США [164]	солома	40-50%
	К	40%
		35-70% (при No-Till)
США [165]	солома	60%
	К	60-70% (при No-Till)
США [166]	К	30-70% (при No-Till)
США [168]	К	30-40%
Україна [170]	солома	38% (підприємства картопле-зерно-тваринницького напрямку)
Україна [172]	солома	40%
Україна [171]	солома	86% (підприємства цукрово-зерно-тваринницького напрямку)
Україна [178]	солома	20%
Україна [179]	солома	≥ 50% (після 2008 р.)
	К, С	100%

* К – ПП кукурудзи, С – відходи виробництва соняшника, І – інші рослинні відходи.

Відчуження (тобто вилучення з поля) до 30% соломи зернових колосових культур, означає, що солома забирається з поля один раз на три роки, а інші два роки вона залишається на полі і використовується як органічне добриво [180]. Відчуження до 40% ПП кукурудзи та соняшника означає, що, по-перше, ці рослинні відходи забираються з поля один раз на 2-3 роки; по-друге, для кожної культури збирається лише частина рослинних решток, наприклад стрижні кукурудзи або обмолочені кошики соняшника, а все інше

залишається у полі. При підготовці конкретних біоенергетичних проєктів, для кожного агрогосподарства можливий відсоток вилучення рослинних решток необхідно ретельно уточнювати, беручи до уваги повний спектр місцевих умов, таких як врожайність культур, рівень розвитку місцевого тваринництва, стан ґрунту, обсяг внесення мінеральних та органічних добрив та ін. В результаті, в реальних умовах частка потенціалу агробіомаси, доступної для енергетики, може коливатися від 0 до 100%.

Дане питання було всебічно обговорено на міжнародному семінарі «Агровідходи для біоенергетики. Проблеми та рішення» (27.09.2018, Київ). Найбільш важливі погляди, представлені на семінарі, наступні:

- Обсяг можливого відчуження нетоварної частини врожаю с-г культур напряду залежить від рівня внесення добрив на гектар посівної площі. При внесенні мінеральних добрив з нормою NPK(45) можна забирати з полів до 30% нетоварної частини врожаю культур, при NPK(90) – до 40%, а при внесенні 9 т гною на гектар та $N_{45}P_{68}K_{36}$ – до 70% (Рис. 2.1).

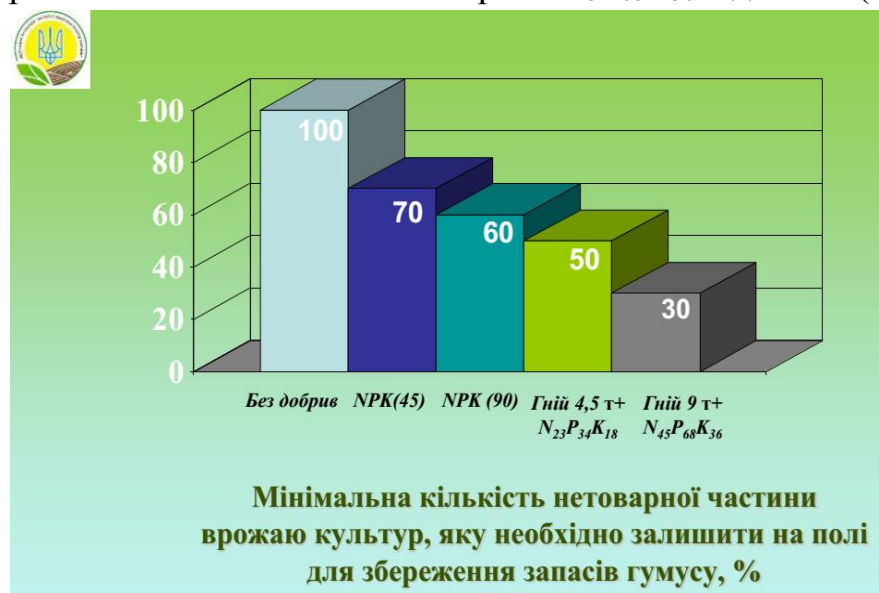


Рис. 2.1. Залежність між обсягом внесення добрив та обсягом рослинних залишків, які мають залишитися на полі [181].

- Обсяг сталої заготівлі соломи та інших рослинних відходів для потреб енергетики може складати від 0% до 100% в залежності від врожайності культури, місцевих ґрунтових та кліматичних умов. Краще відчужувати з поля кукурудзиння, ніж солону зернових. Необхідно повертати на поля золу від спалювання рослинних решток, а також вносити органічні добрива, такі як зброджений субстрат з БГУ, гній та інші [182].
- Моделювання абсолютної зміни органічного вуглецю ґрунту при видаленні різних часток рослинних решток з поля для умов Європи протягом 2015-2030 рр. показало, що максимальний відсоток

відчуження рослинних решток може складати 50% [183].

Вихідною точкою для оцінки енергетичного потенціалу первинних с-г залишків (таких як солома зернових та ріпаку, стебла кукурудзи та соняшника та ін.) є статистичні дані по валовому збору с-г культур. Коефіцієнт відходів – це відношення сухої маси наземних залишків до маси зібраного з польовою вологістю врожаю. Наприклад, для зернових колосових культур наземні залишки – це солома, а врожай – зерно.

Методичні основи оцінювання економічного потенціалу первинних с-г залишків ґрунтуються на наступних положеннях:

- Питання про частку соломи, стебел та інших пожнивних решток, що можуть бути використані для виробництва енергії або біопалива, необхідно вирішувати індивідуально для кожного господарства. При цьому мають бути враховані всі важливі агроекономічні фактори.
- Для України в цілому загальна рекомендація автора – використовувати до **30%** теоретичного потенціалу соломи зернових колосових культур і до **40%** теоретичного потенціалу соломи ріпаку, а також ПП кукурудзи та соняшника (Табл. 2.2).

Табл. 2.2. Оцінка економічного потенціалу первинних с-г залишків (2018 р.).

Вид біомаси	Врожай с-г культур, млн т	Загальний обсяг ПП (теоретичний потенціал), млн т	Частка ПП на енергетику	Потенціал, доступний для енергетики (економічний)			
				млн т	W, %	Q _{нр} , МДж/кг	млн т н.е.
Солома зернових (без кукурудзи)	34,3	32,8	30%	9,8	20	14,3	3,36
Солома ріпаку	2,75	4,95	40%	1,98	20	14,3	0,68
ПП кукурудзи: всього, у т.ч.	35,8	46,5	40%	18,6	50	8,0	3,56
стебла (з листям)		35,1		14,0			2,68
стрижні		6,5		2,6			0,50
ПП соняшника: всього, у т.ч.	14,2	26,9	40%	10,8	60	6,0	1,54
стебла (з листям)		18,4		7,4			1,05
кошики		8,5		3,4			0,49
ВСЬОГО	87,05	111,15		41,18			9,14

Потенціал вторинних с-г залишків (наприклад, лушпиння соняшника) розраховується за допомогою коефіцієнтів відходів, технічної доступності та енергетичного використання. В цьому випадку коефіцієнт відходів – це відношення обсягу утворених залишків (лушпиння) до обсягу переробленого врожаю культури (насіння соняшника). Коефіцієнт технічної доступності являє собою відношення обсягу надходження продукції (насіння соняшника) на переробні підприємства, де і утворюються відходи, до загального обсягу виробництва цих культур.

Методичні основи оцінювання потенціалу енергетичних культур ґрунтується на тому, що в Україні щорічно є незадіяними **3-5** млн га с-г земель (Табл. 2.3). Частину цих земель (до **2** млн га) можливо залучити до вирощування енергетичних культур. При цьому передбачається, що **1** млн га задіяно під енергокультури для отримання твердого біопалива (для умов України найбільш придатними є верба, тополя, міскантус), і ще **1** млн га – під кукурудзу на силос для подальшого виробництва біогазу (Табл. 2.4, 2.5).

Табл. 2.3. Оцінка площі незадіяних с-г земель в Україні, тис. га.

Рік	2010	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Рілля	32476	32518	32525	32531	32541	32543	32544	32697
Вся посівна площа	26952	27801	28329	27239	26902	27026	27585	27699
Площа чистих парів	1465	1247	981	830	612	247	471	458
Вільна площа ріллі*, тис. га	4059	3470	3215	4462	5027	5270	4488	4540

* Розраховується як різниця між площею ріллі і сумою всієї посівної площі та площі чистих парів.

Табл. 2.4. Оцінка енергетичного потенціалу енергетичних культур.

Показники	Верба	Міскантус	Тополя	Всього
Площа, тис. га (S)	500	300	200	1000
Врожайність, т с.р./га·рік (Y)	12,0	12,0	9,5	
Нижча теплота згорання, МДж/кг (Q)	18,0	17,0	18,5	
Потенціал, тис. т с.р./рік ($P_t = S \times Y$)	6000	3600	1900	11510
Потенціал, тис. т н.е./рік ($P_{ktoe} = P_t \times Q / Q_{н.е.}$, де $Q_{н.е.} = 41,9$ МДж/кг)	2580	1462	840	4882

Табл. 2.5. Оцінка потенціалу кукурудзи для виробництва біогазу.

Показники	Силос кукурудзи (біогаз)
Площа, тис. га (S)	1000
Врожайність, т/га·рік (Y)	30,0
Вихід метану CH ₄ , м ³ /т (Y _C)	100
Теплота згорання метану CH ₄ , МДж/м ³ (Q)	35,9
Потенціал, млн м ³ CH ₄ /рік (Pt=S×Y×Y _C)	3000
Потенціал біогазу, тис. т н.е./рік (P _{ktoe} =Pt×Q/Q _{н.е.} , де Q _{н.е.} = 41,9 МДж/кг)	2570

Деревну біомасу для потреб енергетики умовно можна поділити на таку, що походить з «традиційних» джерел (паливна деревина, порубкові залишки, відходи деревообробки) та з «додаткових» джерел (сухостій, деревина із захисних лісосмуг, відходи від обрізки та викорчовування багаторічних с-г насаджень). Оцінка енергетичного потенціалу деревної біомаси виконується на основі доступних статистичних даних та експертних підходів до визначення складових потенціалу (Табл. 2.6).

Табл. 2.6. Енергетичний потенціал деревної біомаси.

Складові потенціалу деревної біомаси	Підходи до оцінки потенціалу
Паливна деревина	Щорічні статистичні дані (до 2018 р. статистика надавала дані по обсягу дров для опалення).
Порубкові залишки	14% від об'єму заготівлі круглого лісу (до 2018 р. ~ 20% порубкових решток мало залишитися в лісі).
Відходи деревообробки	Статистичні дані (щорічні).
Сухостій	Береться запас сухою в лісах зі середньоквадратичною похибкою 10-15% згідно даних НУБіП та експертним припущенням, що лише 25% загального потенціалу сухою є технічно досяжним та економічно доцільним для утилізації протягом 10 років.
Деревина із захисних лісосмуг	У відповідності до площі полезахисних лісосмуг (ПЗЛС) та лісосмуг вздовж автомобільних доріг та залізниць, з оцінкою загального запасу деревини (вихід 150 щ.м ³ /га) та необхідності їх реконструкції протягом 10-20 років.
Відходи від обрізки та викорчовування багаторічних с-г насаджень	Виходячи із площі насаджень, утворення відходів у т/га згідно літературних даних чи польових вимірювань (є відповідна методика проведення вимірювань). Обрізка: 2,5-3 т/га; викорчовування: 30 т/га (протягом 5 років).

Полезахисні лісові смуги – це штучні насадження, які розмежують масиви рілли, виконуючи кліматорегулювальні, ґрунтозахисні та водоохоронні функції. Внаслідок низки об’єктивних факторів, ці насадження протягом багатьох років не отримують належного догляду і поступово втрачають свої захисні властивості. Полезахисні лісові смуги нагально потребують реконструкції (санітарні рубки, рубки догляду) і відновлення (насадження нових плантацій). Це ж стосується захисних лісосмуг, розташованих вздовж автомобільних доріг та залізниць. Завдяки виконанню таких робіт можна додатково отримувати до 0,5 млн т н.е./рік деревного палива. Ця оцінка ґрунтується на даних щодо площі полезахисних та інших лісосмуг та можливого обсягу утворення деревних відходів при їх реконструкції (Табл. 2.7).

Табл. 2.7. Оцінка потенціалу деревного палива із захисних лісосмуг.

Джерело деревного палива	Площа, тис. га	Загальний ресурс, млн м ³ *	Термін реконструкції лісосмуг, років	Потенціал деревного палива, тис. т н.е./рік
Полезахисні лісосмуги	422,2	63,3	20	446,3
Лісосмуги вздовж автодоріг	44,9	6,8	10	23,7
Лісосмуги вздовж залізниць	19,8	3,0	10	15,7
ВСЬОГО	486,9	73,1		485,7

* Оцінка з урахуванням виходу паливної (неділової) деревини – 150 щ.м³/га.

Іншим джерелом деревної біомаси є сухостій, який являє собою засохлі дерева і кущі, що стоять на корені. Причина утворення сухоостою – різкі кліматичні коливання температури, вологи, «нижня пожежа» (вигорання сухої трави, при якому дерева ще не займаються, але суттєво пошкоджуються), термічне, хімічне, механічне чи інше суттєве пошкодження кореневищ, кори чи листяного покриву дерев, а також їх старіння, всихання. Фахівці лісового господарства не заперечують, що сухостій зі звичайних лісів майже повністю може бути утилізований для потреб енергетики. Але обов’язково треба залишати на місці кілька великих дерев на гектар для збереження біорізноманіття.

Третім видом деревної біомаси із «додаткових» джерел є відходи від обрізки та викорчовування багаторічних с-г насаджень: фруктові сади та виноградники.

Оцінка потенціалу рідких біопалив (біоетанолу та біодизелю першого покоління), а також біогазу (біогаз з ПП АПК; біогаз зі стічних вод,

промислових та комунальних; біогаз з полігонів твердих побутових відходів) ґрунтується на визначенні доступних обсягів відповідних видів сировини та питомих показників виходу певних видів біопалива з них (Табл. 2.8, 2.9).

Вважається, що біодизель виробляється з насіння ріпаку, а біоетанол – з зерна кукурудзи як традиційних с-г культур. Прийнято сценарій, при якому для отримання біопалив можна використати 50% врожаю ріпаку і 10% врожаю кукурудзи. Додатковою сировиною для виробництва біоетанолу є меляса з цукрових буряків.

Табл. 2.8. Складові енергетичного потенціалу рідких біопалив

	Біодизель	Біоетанол
Сировина	Традиційна с-г олійна культура – ріпак.	Традиційна: зерно кукурудзи, зернові культури, меляса з цукрових буряків. Альтернативна: сироп з цукрових буряків, цукрового сорго, цикорію, топінамбур.
Методика оцінки *	Статистичні дані по виробництву ріпаку . Вихід біодизелю: 315 кг/т ріпаку. Коефіцієнт технічної доступності – 1,0 ; коефіцієнт енергетичного використання – 0,5 . $Q_{\text{біодизелю}} = 37,5$ МДж/кг.	Статистичні дані по виробництву кукурудзи на зерно (К) та цукрового буряку (ЦБ) . Коефіцієнт виходу меляси 0,045 т/т ЦБ. Вихід біоетанолу з 1 центнеру сировини: меляса – 30 л/ц, кукурудза – 40 л/ц. Коефіцієнт технічної доступності: для К – 1,0 , для ЦБ – 0,9 . Коефіцієнт енергетичного використання: для К – 0,1 , для ЦБ – 1,0 . $Q_{\text{біоетанолу}} = 27,0$ МДж/кг.

* Всі цифри – літературні дані, експертні оцінки.

Оцінка потенціалу виробництва біогазу в агропромисловому комплексі (АПК) охоплює усі основні види відходів та ПП, що утворюється в промисловому тваринництві (ВРХ, в т.ч. корови, свині, птиця усіх видів, вівці та кози) та в основних галузях харчової переробної промисловості. Потенціал виробництва біогазу з відходів життєдіяльності тварин, що утримуються в господарствах населення, не розглядається з огляду на низьку імовірність поширення побутових БГУ в Україні в осяжній перспективі.

Оцінка потенціалу виробництва біогазу зі стічних вод охоплює господарсько-побутові та виробничі стічні води від усіх галузей промисловості. Базовий підхід до оцінки потенціалу полягає у визначенні маси органічних забруднень, виражених через показники ХПК або БПК, що

потрапляють в осади/мули, утворені в результаті очистки стічних вод, і які організовано збираються і відводяться в межах очисних споруд.

Базовий підхід до оцінки потенціалу отримання біогазу з ТПВ полягає у визначенні кількості метану, що утворюється на полігонах та звалищах з урахуванням кількості та морфологічного складу відходів, а також особливостей фізичного стану полігонів і сміттєзвалищ та їх експлуатаційних практик.

Табл. 2.9. Складові енергетичного потенціалу біогазу та базові підходи до їх оцінки

Види біогазу	Дані для оцінки потенціалу	Теоретичний потенціал	Технічний потенціал	Економічний потенціал
Біогаз з відходів та ПП АПК	1. Стат. данні щодо наявного поголів'я ВРХ, свиней та птиці на початок року, середній вихід гноївки/ посліду на 1 голову за добу, середній вміст сухих речовин та золи в гноївці/посліді, питомий вихід біогазу/метану з 1 кг сухої органічної речовини гноївки/посліду.	1. Враховуються гноївка/послід від усього поголів'я ВРХ, свиней та птиці, що утримуються на підприємствах, в т.ч. ФГ (тварини, що утримуються в господарствах населення не враховуються).	1. Враховується обсяг гною, який можливо зібрати в місцях групового утримання тварин. Не враховується обсяг гноївки, що потрапляє на пасовища при вигулі ВРХ ($k_{\text{дост}}=0.52$) та малої рогатої худоби – овець та кіз ($k_{\text{дост}}=0.27$). Коефіцієнт збору в місцях групового утримання прийнято для всіх видів тварин $k_{\text{збору}}=0,93$.	1. Розраховується з припущенням про економічну доцільність будівництва БГУ потужністю > 500 кВт . Частка обсягу біогазу, що забезпечується гноївкою/ послідом, приймається на рівні 25%, решта забезпечується додатковою сировиною (силос кукурудзи, пожнивні рештки, тощо). При цьому, $k_{\text{екон}}$ оцінено для підприємств ВРХ 0,41, свиноферм – 0,52, птиці – 0,96. Біогаз з гноївки овець/кіз не враховується.
	2. Стат. данні щодо виробництва основних видів продукції в харчовій переробній промисловості (ХПП), норми утворення різних видів ПП на одиницю виробленої продукції, середній вміст с.р. в різних видах ПП, питомий вихід біогазу/ метану з 1 кг с.р. ПП.	2. Враховується загальний обсяг утворення ПП в усіх галузях ХПП.	2. Враховується обсяг ПП ХПП, який можливо зібрати наявними технічними засобами. Прийнято $k_{\text{збору}}=0,95$.	2. Враховується обсяг ПП, який можливо використати для виробництва біогазу, з урахуванням споживання ПП на інші (окрім енергетичних) потреби, в т.ч. на корм тваринам. Оцінено $k_{\text{екон}}$ по кожному окремому виду ПП в діапазоні від 0,05 до 1,00. Усереднене для ХПП значення $k_{\text{екон}}$ оцінено 0,32.

Види біогазу	Дані для оцінки потенціалу	Теоретичний потенціал	Технічний потенціал	Економічний потенціал
Біогаз зі стічних вод (промислових та комунальних)	Дані Національного кадастру антропогенних викидів із джерел і абсорбції поглиначами парникових газів в Україні (Кадастр ПГ) за 1990-2018 рр. щодо річних викидів метану з осадів господарсько-побутових та промислових стічних вод Обсяги ХПК або БПК, що містяться в стічних водах, які збираються централізованими системами каналізації. Стат. данні про чисельність населення міст, забезпеченість житлових приміщень каналізацією.	Враховується увесь обсяг біогазу, що може теоретично виділитись з маси ХПК або БПК, що потрапляє в осаді стічних вод. Теоретичний потенціал утворення дорівнює річним викидам метану, наведеним в Кадастрі ПГ, розділеним на прийнятий коефіцієнт конверсії метану МСФ для систем обробки осадів.	Визначається множенням теоретичного потенціалу на фактор консервативності оцінки потенціалу біогазу 0,9	Визначається, виходячи з економічної доцільності будівництва систем анаеробної переробки осадів/мулів з виробництвом біогазу в когенераційних установках потужністю >500 кВт_e . Враховується частка міського населення – 69,3%, рівень забезпеченості міського населення каналізацією – 76,7%, частка врахованої генерації ХПК в промислових стічних водах – 50%. Оцінена мінімальна чисельність населення міст - 190 тис. жителів.
Біогаз з полігонів твердих побутових відходів (ТПВ)	Дані Національного кадастру антропогенних викидів із джерел і абсорбції поглиначами парникових газів в Україні за 1990-2018 рр. щодо річних викидів метану з полігонів і звалищ ТПВ	Визначається, виходячи з обсягу річних викидів метану з полігонів і звалищ ТПВ.	Визначається, виходячи з технічної доцільності збору біогазу для його подальшого енергетичного використання тільки на полігонах і звалищах міст з населенням більше 50 тис. з урахуванням ефективності збору біогазу 50%.	Визначається, виходячи з економічної доцільності збору біогазу для його подальшого енергетичного використання тільки на полігонах і звалищах міст з населенням більше 100 тис. жителів та урахуванням ефективності збору біогазу 50%.

Оцінка потенціалу біогазу з відходів та ПП АПК представлена в **Табл. 2.10**.

Табл. 2.10. Оцінка потенціалу біогазу з відходів та ПП АПК

Види біогазу	Загальний ресурс, млн т	Кількість біогазу*, млн м ³ СН ₄	Економічний потенціал тис. т н.е./рік
Біогаз з відходів та ПП АПК	26,3 – гній/послід	1084	529,1
	22,2 – ПП ХПП	1692	464,7
Біогаз зі стічних вод	0,36 млн т БПК – господарсько- побутові стічні води	235	85,0
	1,15 млн т ХПК – промислові стічні води	122	
Біогаз з полігонів твердих побутових відходів (ТПВ)	11,5	567	140,2

* перерахована у біометан

2.2. Оцінка енергетичного потенціалу біомаси в Україні

Енергетичний потенціал біомаси, оцінений згідно цієї методики, становив в 2018 році **23,1** млн т н.е./рік (**Табл. 2.11**).

Табл. 2.11. Енергетичний потенціал біомаси в Україні (2018 р.).

Вид біомаси	Теоретичний потенціал, млн т	Потенціал, доступний для енергетики (економічний)	
		Частка теоретичного потенціалу, %	млн т н.е.
Солома зернових колосових культур	32,8	30	3,36
Солома ріпаку	4,9	40	0,68
ПП кукурудзи (стебла, стрижні)	46,5	40	3,56
ПП соняшника (стебла, корзинки)	26,9	40	1,54
Вторинні залишки сільського господарства (лушпиння соняшника)	2,4	100	1,00
Деревна біомаса (паливна деревина, порубкові залишки, відходи деревообробки)	8,8	96	2,06

Вид біомаси	Теоретичний потенціал, млн т	Потенціал, доступний для енергетики (економічний)	
		Частка теоретичного потенціалу, %	млн т н.е.
Деревна біомаса (сухостій, деревина із захисних лісосмуг, відходи ОВБСН)	8,8	45	1,02
Біодизель (з ріпаку)	-	-	0,39
Біоетанол (з кукурудзи і цукрового буряку)	-	-	0,82
Біогаз з відходів та ПП АПК	2,8 млрд м ³ СН ₄	42	0,99
Біогаз з полігонів ТПВ	0,6 млрд м ³ СН ₄	29	0,14
Біогаз зі стічних вод (промислових та комунальних)	0,4 млрд м ³ СН ₄	28	0,09
Енергетичні культури:			
- верба, тополя, міскантус*	11,5	100	4,88
- кукурудза (на біогаз)*	3,0 млрд м ³ СН ₄	100	2,57
Всього	-	-	23,10

* За умови вирощування на 1 млн га незадіяних с-г земель.

Основними складовими енергетичного потенціалу біомаси є первинні сільськогосподарські залишки (солома зернових колосових культур та ріпаку, ПП кукурудзи та соняшника) – майже 40% загального потенціалу, а також енергетичні культури (верба, тополя, міскантус отримання твердого біопалива і силос кукурудзи для виробництва біогазу) – 32% (Рис. 2.2 та Рис. 2.3). В структурі енергетичного потенціалу деревної біомаси майже половину займає паливна деревина (серед іншого, включає дрова для опалення). Іншими вагомими складовими є сухостій і деревина від реконструкції захисних лісосмуг (Рис. 2.4).

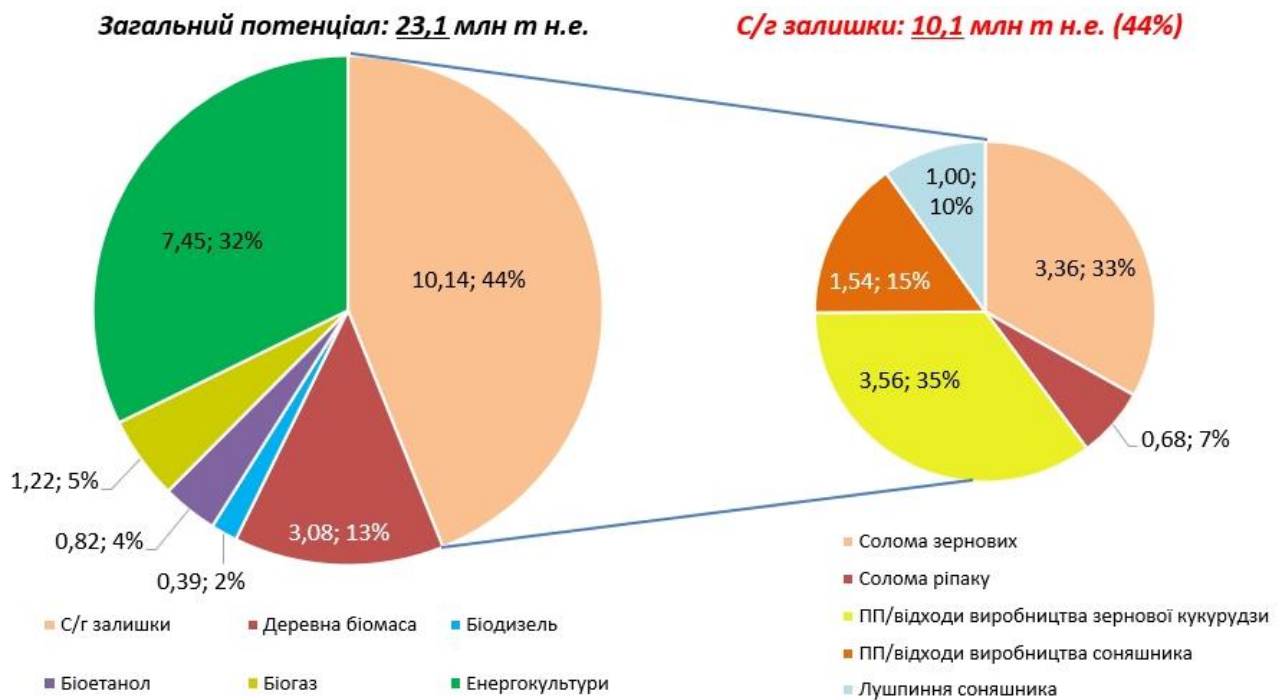


Рис. 2.2. Енергетичний потенціал біомаси, у тому числі сільськогосподарських залишків, в Україні, млн т н.е. (2018 р.).

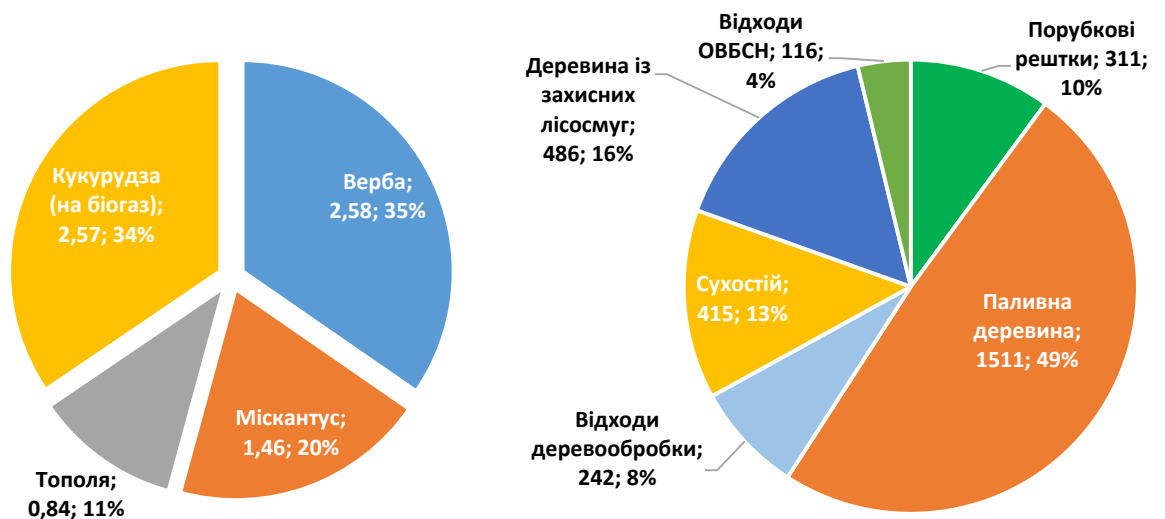


Рис. 2.3. Потенціал енергетичних культур в Україні, млн т н.е. (2018 р.).

Рис. 2.4. Потенціал деревної біомаси в Україні, тис. т н.е. (2018 р.).

Оцінки автора показують, що у 2050 р. цей потенціал може збільшитися до близько **45** млн т н.е./рік (Табл. 2.12).

Табл. 2.12. Прогноз енергетичного потенціалу біомаси в Україні у 2050 р.

Вид біомаси	Теоретичний потенціал, млн т	Потенціал, доступний для енергетики (економічний)	
		Частка теоретичного потенціалу, %	млн т н.е.
Солома зернових колосових культур*	49,2	30	5,04
Солома ріпаку	4,9	40	0,68
ПП кукурудзи (стебла, стрижні)*	58,1	40	4,45
ПП виробництва соняшника (стебла, корзинки)	26,9	40	1,54
Вторинні с-г залишки (лушпиння соняшника)	2,4	100	1,00
Деревна біомаса (паливна деревина, порубкові залишки, відходи деревообробки)*	12,3	96	2,88
Деревна біомаса (сухостій, деревина із захисних лісосмуг, відходи ОВБСН)	8,8	45	1,02
Біодизель (з ріпаку)	-	-	0,39
Біоетанол (з кукурудзи і цукрового буряку)	-	-	0,82
Біогаз з відходів та ПП АПК*	8,4 млрд м ³ СН ₄	83	5,92
Біогаз з ТПВ*	0,7 млрд м ³ СН ₄	70	0,42
Біогаз зі стічних вод (промислових та комунальних)*	0,4 млрд м ³ СН ₄	31	0,11
Енергетичні культури*:			
- верба, тополя, міскантус**;	34,5	100	14,65
- кукурудза (на біогаз)**.	7,5 млрд м ³ СН ₄	100	6,43
Всього	-	-	45,35

* Складові потенціалу біомаси, ріст яких очікується до 2050 р. Інші складові, згідно консервативного підходу, залишені на рівні значень потенціалу 2018 р.

** За умови вирощування на 2 млн га незадіяних с-г земель.

Основні фактори росту енергетичного потенціалу біомаси у період до 2050 р. включають (Табл. 2.13):

- підвищення врожайності с-г культур, у першу чергу, зернових;
- розширення сировинної бази для виробництва біогазу за рахунок пожнивних решток;

- зростання виробництва основної продукції різними галузями промисловості;
- укрупнення тваринницьких підприємств;
- перехід від захоронення ТПВ до використання технології механіко - біологічної обробки (МБО).
- зростання площ під енергокультурами та ріст їх врожайності;
- певний ріст частки рубки річного приросту деревини в лісах.

Складові енергетичного потенціалу біомаси, для яких не знайдено об'єктивних факторів росту до 2050 р., залишені на рівні показників 2018 р. Вони включають соломку ріпаку, ПП виробництва соняшника, вторинні сільськогосподарські залишки (лушпиння соняшника), деревну біомасу з «додаткових» джерел, рідкі біопалива.

Табл. 2.13. Обґрунтування факторів росту енергетичного потенціалу біомаси в Україні у 2050 році.

Вид біомаси	Економічний потенціал, млн т н.е.		Коефіцієнт росту потенціала	Обґрунтування росту потенціалу у 2050 р. (консервативний підхід)
	2018	2050		
Солома зернових колосових культур	3,36	5,04	1,5	2050 р.: припускаємо, що урожайність зернових в Україні може зрости у 1,5 разів, виходячи з існуючих тенденцій у с-г України і статистичних даних FAOSTAT по урожайності с-г культур в країнах ЄС [184]. 2018 р.: Україна – 37,2 ц/га, Німеччина – 66,7 ц/га, Данія – 62,3 ц/га, Франція – 68,4 ц/га.
Солома ріпаку	0,68	0,68	1,0	2050 р.: припускаємо, що урожайність ріпаку в Україні залишиться приблизно однаковою, виходячи з існуючих тенденцій у с-г України і статистичних даних FAOSTAT по урожайності с-г культур в країнах ЄС ³² . 2018 р.: Україна – 26,5 ц/га, Польща – 26,4 ц/га, Італія – 27,2 ц/га, Австрія – 29,8 ц/га.
ПП кукурудзи	3,56	4,45	1,25	2050 р.: припускаємо, що урожайність кукурудзи на зерно в Україні може зрости у 1,25 разів, виходячи з існуючих тенденцій у с-г України і статистичних даних FAOSTAT по урожайності с-г культур в країнах ЄС ³² . 2018 р.: Україна – 78,4 ц/га, Австрія – 101,5 ц/га, Італія – 104,5 ц/га, Іспанія – 119,2 ц/га.
ПП виробництва соняшника	1,54	1,54	1,0	2050 р.: припускаємо, що урожайність соняшника в Україні залишиться приблизно однаковою, виходячи з існуючих тенденцій у с-г України і статистичних даних FAOSTAT по урожайності с-г культур в країнах ЄС ³² . 2018 р.: Україна – 23,0 ц/га, Австрія – 28,0 ц/га, Франція – 22,6 ц/га, Італія – 24,0 ц/га.
Вторинні с-г залишки (лушпиння)	1,00	1,00	1,0	2050 р.: див. обґрунтування до ПП виробництва соняшника

Вид біомаси	Економічний потенціал, млн т н.е.		Коефіцієнт росту потенціала	Обґрунтування росту потенціалу у 2050 р. (консервативний підхід)
	2018	2050		
Деревна біомаса («традиційні» джерела)	2,06	2,88	1,4	2050 р.: припускаємо, що рівень рубки річного приросту деревини в лісах України може збільшитися в 1,4 рази (тобто, до близько 71%), виходячи з існуючих тенденцій у лісовому господарстві України і статистичних даних країн ЄС – Рис. 11 звіту [185]. 2018 р. Рівень рубки річного приросту деревини: Україна – 51%; Австрія – 94%, Чехія – 85%, Німеччина – 80%, Латвія – 78%, Словаччина – 77%, Угорщина – 76%.
Деревна БМ («до-даткові» джерела)	1,02	1,02	1,0	Немає об'єктивних факторів для збільшення.
Біодизель (з ріпаку)	0,39	0,39	1,0	Немає об'єктивних факторів для збільшення; критерії сталості для рідких біопалив.
Біоетанол (з кукурудзи і ЦБ)	0,82	0,82	1,0	Немає об'єктивних факторів для збільшення; критерії сталості для рідких біопалив.
Біогаз з відходів та ПП АПК	0,99	5,92	6,0	2050 р.: припускаємо, що приріст економічного потенціалу обумовлено комбінацією факторів, а саме: - укрупненням тваринницьких підприємств, що збільшить число ферм та поголів'я, що відповідатимуть критеріям економічного потенціалу: ферми ВРХ - 1,25 рази; свиноферми – 1,25 рази, птахів - 1,1 рази; - ростом обсягів виробництва продукції: птахівництва – 1,1 рази, ХПП – 1,3 рази; - збільшенням частки використання ПП ХПП на біогаз – 1,5 рази; - розширення видів біомаси для біогазу за рахунок пожнивних решток - 2,67 до загального потенціалу АПК (+ з врахуванням коефіцієнтів росту урожайності до 2050 р. як показано вище – середній по культурам 1,3)
Біогаз з ТПВ	0,18	0,42	2,3	2050 р.: переходимо до більш повного (70%) використання теоретичного потенціалу; 0,42 млн т н.е. – економічний потенціал утворення метану з ТПВ у 2050 р. з урахуванням

Вид біомаси	Економічний потенціал, млн т н.е.		Коефіцієнт росту потенціала	Обґрунтування росту потенціалу у 2050 р. (консервативний підхід)
	2018	2050		
				зміни складу і загального обсягу ТПВ, а також можливої кількості населення України у 2050 р., а також переходу від захоронення ТПВ до використання технології МБО. Коефіцієнт росту потенціалу: $0,42/0,18=2,3$.
Біогаз зі стічних вод	0,08	0,11	1,23	2050 р.: збільшення випуску промислової продукції та, відповідно, генерації ХПК в промислових стічних водах в 1,3 рази; збільшення забезпеченості міського населення каналізацією на 20%.
Енергетичні культури: верба, тополя, міскантус	4,88	14,64	3,0	2050 р.: припускаємо, що площа під енергокультурами, призначеними для отримання твердого палива, збільшиться у 2 рази (з 1 до 2 млн га.); урожайність зросте у 1,5 разів (для 2018 р. прийняти консервативні величини врожайності). Коефіцієнт росту потенціалу: $2*1,5=3$.
кукурудза (на біогаз)	2,57	6,43	2,5	2050 р.: припускаємо, що площа під кукурудзою на біогаз збільшиться у 2 рази (з 1 до 2 млн га.); вихід біогазу зросте у 1,25 рази (з 3000 до 3750 м ³ СН ₄ /га). Коефіцієнт росту потенціалу: $2*1,25=2,5$.
ВСЬОГО	23,10	45,35	2,0	

Оцінка енергетичного потенціалу областей України.

Прикладом практичного застосування приведеної вище методики оцінювання ресурсів біомаси, придатної для енергетичного використання, є створення карти потенціалу біомаси Вінницької області для Вінницької ОДА [186]. У даному дослідженні був використаний підхід оцінки енергетичного потенціалу біомаси для кожного окремого району, а загальний енергетичний потенціал області розраховувався як їх сума. Оцінка проводилась розрахунковим шляхом і ґрунтувалась на статистичних даних ДССУ, ГУСВ та інших наявних вихідних даних.

Зведений енергетичний потенціал біомаси у Вінницькій області у 2017 р. (як сума потенціалів по районах) представлений у **Табл. 2.14**, а структура технічно досяжного потенціалу – на **Рис. 2.5** у тонах умовного палива. Згідно отриманих результатів, сумарний потенціал становить: теоретичний – **8068,6** тис. т (**2384,8** тис. т у.п.), технічно досяжний – **3311,1** тис. т (**1003,7** тис. т у.п.).

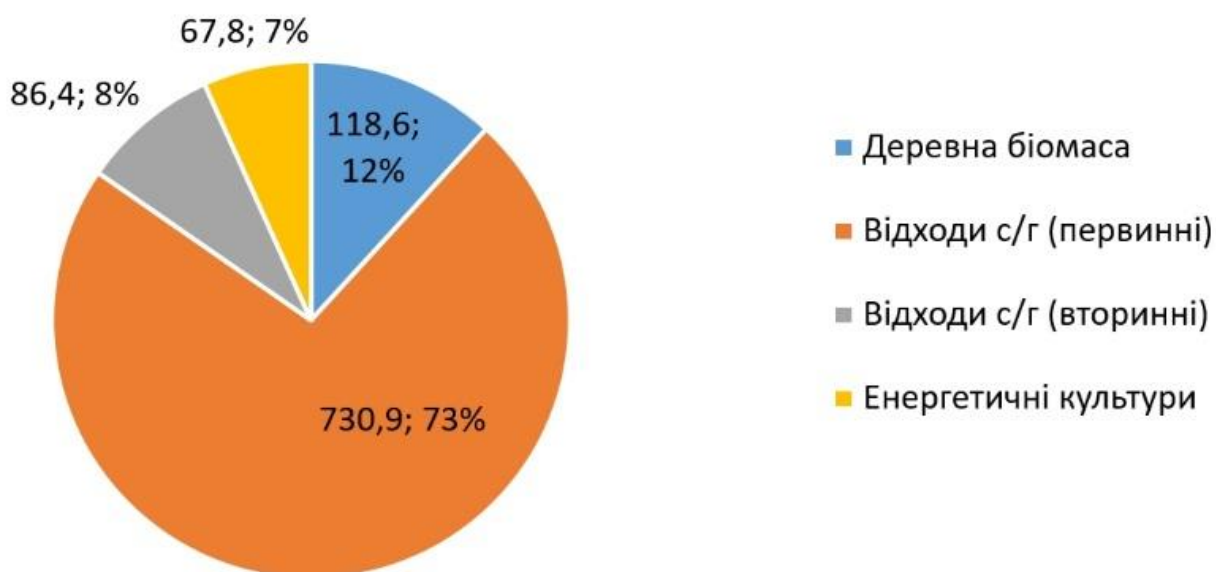


Рис. 2.5. Структура зведеного технічно досяжного потенціалу біомаси у Вінницькій області як сума потенціалів районів (тис. т у.п.), 2017 р. (загалом – 1003,72 тис. т у.п.).

Табл. 2.14. Зведений енергетичний потенціал біомаси у Вінницькій області як сума потенціалів районів (2017 р.).

Вид біомаси	Теоретичний потенціал		Технічний потенціал	
	тис. т	тис. т у.п.	тис. т	тис. т у.п.
Деревна біомаса				
Дрова для опалення	197,08	67,26	197,08	67,26
Порубкові рештки	52,82	18,03	38,03	12,98
Відходи деревообробки	4,00	1,77	3,99	1,77
Біомаса від ОВБСН	40,88	13,95	36,79	12,56
Біомаса від розчищення (реконструкції) полезахисних та інших лісосмуг	92,24	32,16	70,28	23,99
<i>Деревна біомаса, всього</i>	<i>387,02</i>	<i>133,17</i>	<i>346,17</i>	<i>118,56</i>
Відходи сільського господарства (первинні)				
Солома зернових колосових культур (без кукурудзи) та ріпаку	2060,33	1005,55	651,37	317,90
Відходи виробництва кукурудзи на зерно (стебла, стрижні)	2800,55	764,66	1120,22	305,86
Відходи виробництва соняшника (стебла, кошики)	1308,09	267,87	523,23	107,15
<i>Відходи с-г (первинні), всього</i>	<i>6168,97</i>	<i>2038,08</i>	<i>2294,83</i>	<i>730,91</i>
Відходи сільського господарства (вторинні)				
Лушпиння соняшника	123,40	67,39	107,85	58,90
Жом	1275,39	78,35	448,42	27,55
<i>Відходи с-г (вторинні), всього</i>	<i>1398,79</i>	<i>145,74</i>	<i>556,28</i>	<i>86,44</i>
Енергетичні культури				
Міскантус	41,03	23,80	41,03	23,80
Тополя	11,50	7,26	11,50	7,26
Просо прутоподібне	27,24	15,80	27,24	15,80
Вербя	34,08	20,94	34,08	20,94
<i>Енергетичні культури, всього</i>	<i>113,85</i>	<i>67,81</i>	<i>113,85</i>	<i>67,81</i>
ВСЬОГО	8068,63	2384,79	3311,11	1003,72

* Перерахунок обсягу жому в умовне паливо здійснюється через об'єм біогазу, який може бути вироблений з жому (90 м³ біогазу/т жому)

Найбільша частка технічно досяжного потенціалу (69% у натуральних тонах, 73% у т у.п.) припадає на первинні залишки сільського господарства –

2294,8 тис. т (730,9 тис. т н.е.). Найменша частка (4% у натуральних тонах, 7% у т у.п.) – на енергетичні культури – 113,8 тис. т (67,8 тис. т у.п.). Невелика частка енергокультур у структурі потенціалу біомаси пояснюється консервативним підходом (сценарієм) до їх оцінки у розрізі районів. При застосуванні інших підходів (сценаріїв), оцінка потенціалу енергетичних культур може дати значно більший результат. Одним з факторів збільшення потенціалу енергокультур може бути розгляд для їх вирощування не тільки площ незадіяної ріллі, але й вільних земель інших категорій (наприклад, перелогів, земель запасу та ін.).

Енергетичний потенціал біомаси розташований достатньо нерівномірно по районах Вінницької області (**Табл. 2.15, Рис. 2.6**). Найбільшим за даними 2017 року він є у Крижопільському (технічний потенціал 400,05 тис. т або 51,43 тис. т у.п.), Гайсинському (т.п. 260,50 тис. т або 47,19 тис. т у.п.), Вінницькому (т.п. 234,79 тис. т або 104,60 тис. т у.п.) та Хмільницькому (т.п. 169,06 тис. т або 52,20 тис. т у.п.) районах. З них три – це райони, де є вторинні залишки сільського господарства, а Хмільницький район характеризується великим обсягом первинних відходів сільського господарства, зокрема, відходів виробництва кукурудзи на зерно. При цьому потенціал енергетичних культур у Хмільницькому районі, а також у Бершадському, Чернівецькому і Теплицькому районах, оцінено наразі як нульовий через відсутність або дуже невелику площу незадіяної ріллі. Однак, при застосуванні іншого підходу до оцінки (наприклад, використання під енергокультури не тільки сільськогосподарських, але й вільних земельних ділянок несільськогосподарського призначення), результат може відрізнятись у бік збільшення величини цього потенціалу.

Табл. 2.15. Зведений енергетичний потенціал біомаси у Вінницькій області у розрізі районів, у тис. т у.п. (2017 р.).

	Деревна біомаса		Первинні залишки с-г		Вторинні залишки с-г		Енергокультури		Всього	
	теоретичн.	технічний	теоретичн.	технічний	теоретичн.	технічний	теоретичн.	технічний	теоретичн.	технічний
	тис. т у.п.	тис. т у.п.	тис. т у.п.	тис. т у.п.	тис. т у.п.	тис. т у.п.	тис. т у.п.	тис. т у.п.	тис. т у.п.	тис. т у.п.
Вінницька область	133,18	118,56	2038,08	730,91	145,74	86,44	67,81	67,81	2384,79	1003,72
<i>райони</i>										
Барський	6,17	5,51	74,20	26,51			2,78	2,78	83,15	34,80
Бершадський	7,56	6,76	107,01	38,40			0,00*	0,00*	114,57	45,16
Вінницький	14,23	13,01	59,16	21,63	67,39	58,90	11,06	11,06	151,84	104,60
Гайсинський	9,69	8,83	78,52	28,05	25,38	8,92	1,39	1,39	114,98	47,19
Жмеринський	10,33	9,51	75,90	27,39			9,58	9,58	95,81	46,48
Іллінецький	10,18	9,27	73,22	25,56			2,18	2,18	85,58	37,01
Козятинський	2,14	1,81	102,09	36,60			0,29	0,29	104,52	38,70
Калинівський	3,08	2,74	97,21	34,99			3,47	3,47	103,76	41,20
Крижопільський	10,34	9,63	63,70	22,14	52,97	18,62	1,04	1,04	128,05	51,43
Липовецький	1,77	1,39	76,63	27,94			1,91	1,91	80,31	31,24
Літинський	3,33	2,83	70,66	25,81			1,01	1,01	75,00	29,65
Мог.-Подільський	7,56	6,70	59,11	20,72			6,96	6,96	73,63	34,38
Мурованокуріловецький	2,44	2,02	56,90	20,95			9,17	9,17	68,51	32,14
Немирівський	3,03	2,60	92,36	33,59			1,74	1,74	97,13	37,93
Оратівський	2,16	1,87	79,82	29,29			0,09	0,09	82,07	31,25
Піщанський	1,61	1,30	39,18	14,19			1,39	1,39	42,18	16,88
Погребищенський	2,26	1,97	90,35	32,81			0,13	0,13	92,74	34,91
Теплицький	1,10	0,89	67,29	24,55			0,00*	0,00*	68,39	25,44
Томашпільський	2,20	1,85	60,38	20,96			0,35	0,35	62,93	23,16
Тростянецький	2,33	1,92	73,47	25,39			0,26	0,26	76,06	27,57

	Деревна біомаса		Первинні залишки с-г		Вторинні залишки с-г		Енергокультури		Всього	
	теоретичн.	технічний	теоретичн.	технічний	теоретичн.	технічний	теоретичн.	технічний	теоретичн.	технічний
	тис. т у.п.	тис. т у.п.	тис. т у.п.	тис. т у.п.	тис. т у.п.	тис. т у.п.	тис. т у.п.	тис. т у.п.	тис. т у.п.	тис. т у.п.
Тульчинський	7,55	6,71	80,87	29,42			7,75	7,75	96,17	43,88
Тиврівський	4,25	3,79	84,62	30,44			2,96	2,96	91,83	37,19
Хмільницький	7,41	6,71	124,04	45,49			0,00*	0,00*	131,45	52,20
Чернівецький	0,92	0,65	46,92	16,72			0,00*	0,00*	47,84	17,37
Чечельницький	3,74	3,33	52,24	18,57			0,15	0,15	56,13	22,05
Шаргородський	4,59	4,10	89,13	30,74			1,45	1,45	95,17	36,29
Ямпільський	1,22	0,84	63,13	22,08			0,69	0,69	65,04	23,61

* Згідно обраного сценарію оцінки – вирощування енергокультур на незадіяній площі ріллі.

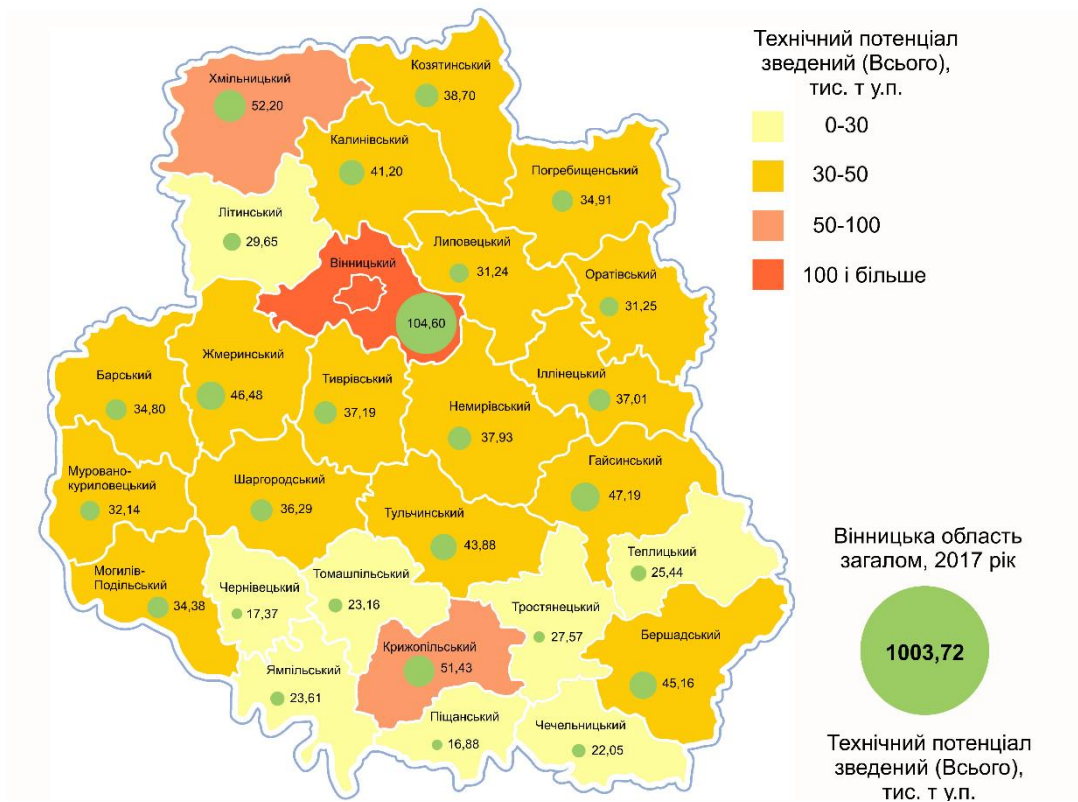


Рис. 2.6. Технічно-досяжний потенціал біомаси в розрізі районів Вінницької області (тис. т у.п.), 2017 р. (загалом – 1003,72 тис. т у.п.).

За даними 2017 року, Вінницька область спожила 2747,3 тис. т у.п./рік, з яких 56% – вугілля, 35% – природний газ, 8% – нафта/нафтопродукти. Паливно-енергетичний баланс області є від’ємним по нафті/нафтопродуктам (-144,8 тис. т), природному газу (-821,5 млн м³), вугіллю (-2081,3 тис. т) і мазуту. Разом з тим Вінницька область має доволі великий потенціал біомаси, доступної для енергетичного використання – 1003,7 тис. т у.п./рік (технічно досяжний потенціал, 2017 р.). Повне застосування цього потенціалу може замінити близько 37% річного споживання викопних палив. В першу чергу видається доцільним збільшувати енергетичне використання ПП АПК і розвивати вирощування енергетичних культур.

Отримані результати розрахунку потенціалу біомаси для енергетичних цілей у розрізі районів Вінницької області були використані як складові створеної онлайн карти. Ця карта містить як дані щодо потенціалу різних видів біомаси у розрізі районів, так і додаткову інформацію, що стосується, наприклад, земельних ділянок, де потенційно можливо вирощувати енергетичні культури, місця розташування старих садів, що потребують викорчовування, розміщення твердопаливних котельних, у яких можливе спалювання біопалив, розміщення виробників біопалив та ін. Карта може бути корисною для аналізу ситуації на рівні області в цілому або окремого району, а також може допомогти

конкретному підприємству визначитися з видом і масштабом біоенергетичного проекту для його подальшого впровадження.

Оцінка енергетичного потенціалу біомаси в областях України.

Крім приведеного вище прикладу практичного застосування розробленої методики оцінки потенціалу біомаси для енергетичних потреб у Вінницькій області були і інші проекти з її ефективним використанням, деякі з них перелічені нижче, а систематизовані доступні результати досліджень по областях зведені у **Табл. 2.16:**

Табл. 2.16. Результати вибраних досліджень по оцінці економічного потенціалу біомаси в областях України, тис. т у.п.

Вид потенціалу	Рік	Область, рік дослідження						
		Дніпропетровська, 2015	Вінницька, 2015	Херсонська, 2015	Одеська, 2017	Сумська, 2017	Луганська, 2017	Донецька, 2017
Первинні залишки рослинництва	2013				735	585,08		
	2014	649,09	770,12	376	738,31	631,94	260,75	297,26
	2015				669,81	606,42	208,86	227,62
	2016						282,85	259,98
Деревна біомаса	2013				27,1	456,83		
	2014	15,09	68,9	26,47	26,36	548,3	27,6	4,19
	2015				31,32	144,88	33,15	4,72
	2016						43,02	5,72
Енергетичні культури	2013				39,97	–		
	2014	28,63	45,96	398,8	37,17	56,93		–
	2015				42,33	29,51		123,06
	2016							72,98
Відходи переробної промисловості	2013				6,68	0,002		
	2014	41	50	30	110,95	1,53	–	61,04
	2015				78,47	1,79	10,44	29,14
	2016						16,1	22,4
Очерет	2013			30	60			
	2014				60			
	2015				60			
Біогаз з гною	2013				2,44	9,35		
	2014				3,26	6,25	13,12*	25,09
	2015				3,26	7,62	11,6*	22,56
	2016						10,02*	22,42
Біоетанол з зерна кукурудзи	2013				23,49*	68,22*		
	2014				15,91*	75,32*	9,22*	3,75*
	2015				13,32*	65,31*	6,01*	2,52*
	2016						8,93*	2,09*

Вид потенціалу	Рік	Область, рік дослідження						
		Дніпропетровська, 2015	Вінницька, 2015	Херсонська, 2015	Одеська, 2017	Сумська, 2017	Луганська, 2017	Донецька, 2017
Біодизель з ріпаку	2013				79,03*	28,15*		
	2014				101,47*	23,63*	1,73*	7,04*
	2015				55,54*	9,55*	0,4*	3,07*
	2016						1,05*	3,18*
Всього	2013				973,71	1147,63		
	2014	733,81	934,98	861,27	1093,43	1286,97	312,42	398,37
	2015				954,05	835,57	270,46	412,69
	2016						361,97	388,77

*технічно-досяжний потенціал

Як видно з приведених вище прикладів, унікальною особливістю методики оцінки потенціалу біомаси для енергетичних потреб є те, що вона може застосовуватись на різних рівнях – на рівні країни, області, району, громади. Це дозволяє застосовувати уніфікований та оперативний підхід там, де виникає потреба виконання такої оцінки.

Використання того чи іншого виду біомаси для енергетичних потреб має враховувати структуру місцевого потенціалу, яка, в свою чергу, залежить від цілої низки місцевих умов, таких як переважний розвиток рослинництва або тваринництва, наявність вільних земель для вирощування енергетичних культур, наявність переробних підприємств, лісгоспів, деревообробних підприємств і т.п.

2.3. Дорожня карта розвитку біоенергетики України до 2050 р.

В законодавстві України не існує офіційного визначення поняття «дорожня карта» та вимог до її структури. Зазвичай «дорожню карту» використовують як синонім «стратегії». В літературі також можна знайти такі визначення та роз'яснення:

Дорожня карта – це покроковий сценарій розвитку об'єкта управління, наочно представлений у вигляді графа процесу управління, на якому відображені стратегічно значущі події, що визначають розвиток об'єкта управління, і послідовність їх настання. Займає **проміжне положення між стратегією і стратегічним планом**. [187]

Дорожня карта – це **стратегічний план**, який визначає ціль або бажаний результат, і включає головні кроки або етапи, необхідні для досягнення цього [188].

Дорожня карта – це **інструмент стратегічного планування**, який

розміщує цілі та головні матеріали проєкту (завдання, етапи) на часовій шкалі, групує усе у вигляді єдиної презентації або графіку [189].

Існує декілька важливих факторів, які обумовлюють необхідність розробки довгострокової стратегії розвитку біоенергетики України і Дорожньої карти як її складової.

По-перше, Енергетична стратегія України ставить амбітну мету досягти 11 млн т н.е. з біомаси, біопалива та відходів у загальному постачанні первинної енергії у 2035 році. Але Енергостратегія не була супроводжена документом (дорожньою картою або планом дій), який показував би, за рахунок яких видів біомаси/біопалив, з використанням яких технологій і в яких секторах буде практично досягнуто 11 млн т н.е. у ЗППЕ. Натомість, необхідне розуміння того, які види обладнання (котельні, ТЕЦ, ТЕС), яких потужностей і в яких секторах (виробництво теплової енергії, електроенергії, когенерація, сектор транспорту) повинні бути впроваджені для найбільш ефективного досягнення поставлених цілей.

По-друге, Україна має міжнародні зобов'язання по скороченню викидів парникових газів (ПГ) згідно Паризької кліматичної угоди 2015 р. – виконання так званих «національно визначених внесків». Наразі ці зобов'язання по зниженню складають до 2030 р. 40% відносно рівня викидів ПГ 1990 р., але протягом найближчих років можуть збільшитися майже до 70% відносно рівня викидів ПГ 1990 р. Для виконання цієї нової цілі Україна має переходити на низьковуглецеву економіку, суттєво скорочувати споживання викопних палив, активно розвивати енергоефективність і впроваджувати відновлювані джерела енергії. За попередніми оцінками, частка ВДЕ в енергетичному секторі у 2050 році може досягти 60%, з яких більше половини – внесок біоенергетики. Таким чином, біоенергетика відіграє значну роль у виконанні Україною міжнародних зобов'язань по скороченню викидів парникових газів, що також обумовлює необхідність розробки довгострокової стратегії розвитку для неї.

Третій фактор обумовлений тим, що вже зараз обладнання більшості потужностей вугільних ТЕС в Україні знаходиться на межі фізичного зносу, бо ці електростанції були введені в експлуатацію у 1960-х роках. Крім того, до 2050 р. закінчатся всі можливі терміни продовження експлуатації АЕС країни. Стратегія розвитку біоенергетики на період до 2050 р. покаже, яким чином біопалива, біоенергетичні установки і технології зроблять свій внесок у заміщення того обсягу потужностей на викопних паливах (вугіллі, природному газі) і потужностей АЕС, які будуть виведені з експлуатації до 2050 р.

Отже, необхідна довгострокова стратегія розвитку біоенергетики в Україні, яка:

- окреслить *перспективи* розвитку біоенергетичного сектору до 2050 р.;

- надасть план дій по досягненню *існуючих* цілей з розвитку сектору до 2035 р.;
- визначить роль біоенергетики у виконанні міжнародних зобов'язань України по *скороченню викидів* парникових газів;
- покаже внесок біоенергетичних установок і технологій у *заміщення потужностей* на викопних паливах і потужностей АЕС, які будуть виведені з експлуатації до 2050 р..

Важливою складовою і першим кроком на шляху підготовки стратегії розвитку біоенергетики є *Дорожня карта*. Матеріали Дорожньої карти можуть бути використані при розробці НПДВЕ до 2030 р. (дія поточного НПДВЕ закінчується у 2020 р.), а також нової Енергетичної стратегії України з розширенням охоплюваного періоду до 2050 р. Стосовно останнього, треба зазначити, що Радою національної безпеки і оборони України було прийнято рішення щодо необхідності забезпечити перегляд Енергетичної стратегії України на період до 2035 р. «Безпека, ефективність, конкурентоспроможність» [190]. На виконання цього рішення Урядом України було розроблено *проект Концепції «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 р* [191].

Метою Дорожньої Карти є представлення реалістичного довгострокового сценарію розвитку біоенергетики, що відповідає переходу України на 100% ВДЕ у 2070 році. Запропонована Дорожня карта охоплює період з 2020 по 2050 роки і враховує кілька реперних точок. Одна з них – 2030 рік, оскільки новий НПДВЕ буде розроблятися до 2030 р., в якому має споживатися не менше **8** млн т н.е. з біомаси, біопалива та відходів у ЗППЕ у 2030 році (згідно діючої Енергостратегії). Друга – 2035 рік, що враховує цілі з розвитку біоенергетики, поставлені Енергетичною стратегією України на період до 2035 р. – **11** млн т н.е. з біомаси, біопалива та відходів у ЗППЕ у 2035 році.

Дорожня карта відповідає сценарію досягнення не менше **60%** ВДЕ в енергобалансі у 2050 р. (**Рис. 2.7**), у тому числі по окремих секторах:

- електроенергія – **70%** ВДЕ (**Рис. 2.8**);
- теплова енергія – **65%** ВДЕ (**Рис. 2.9**);
- транспорт – **35%** ВДЕ (**Рис. 2.10**).

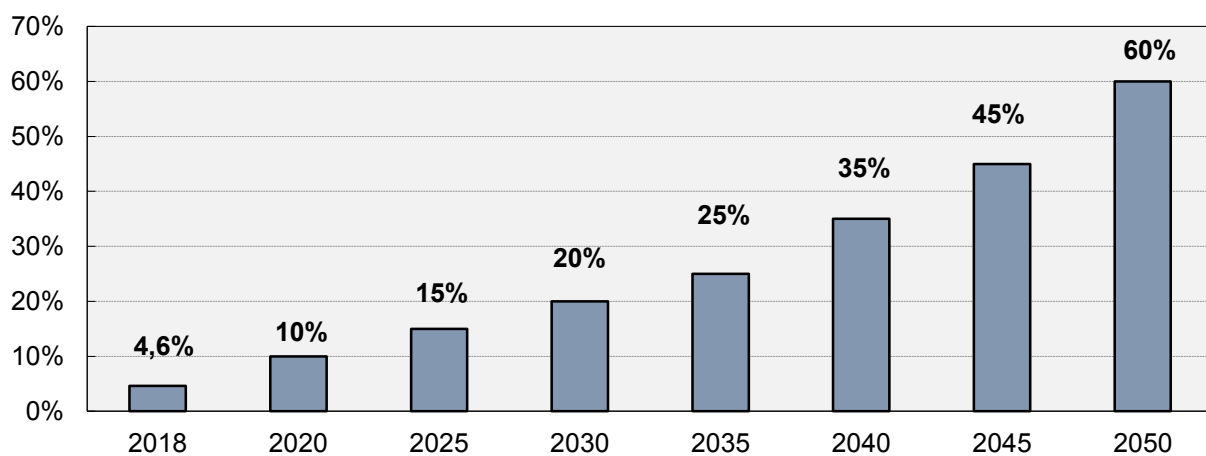


Рис. 2.7. Прогноз частки ВДЕ в ЗПЕ до 2050 р. [192]

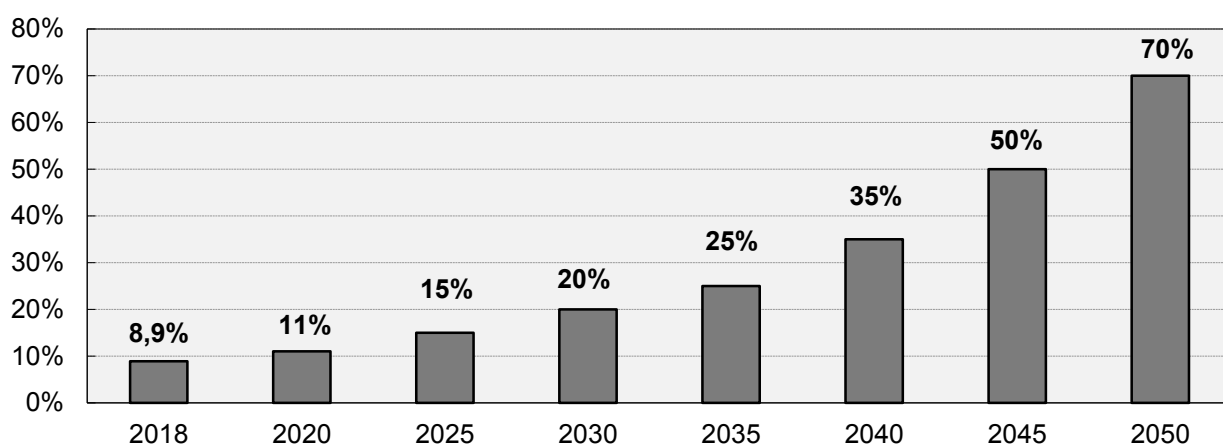


Рис. 2.8. Прогноз частки ВДЕ у виробництві електричної енергії до 2050 р. [193].

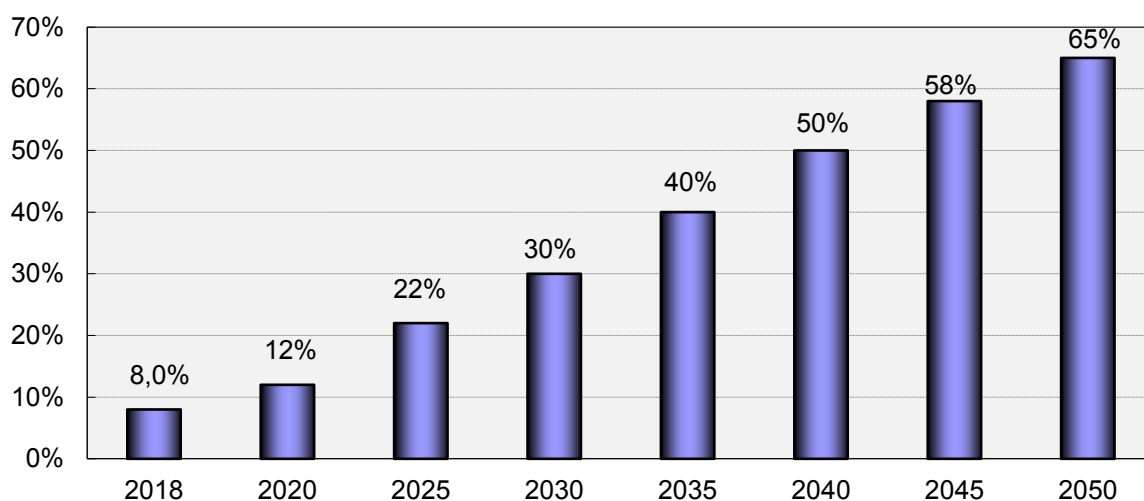


Рис. 2.9. Прогноз частки ВДЕ у виробництві теплової енергії до 2050 р.

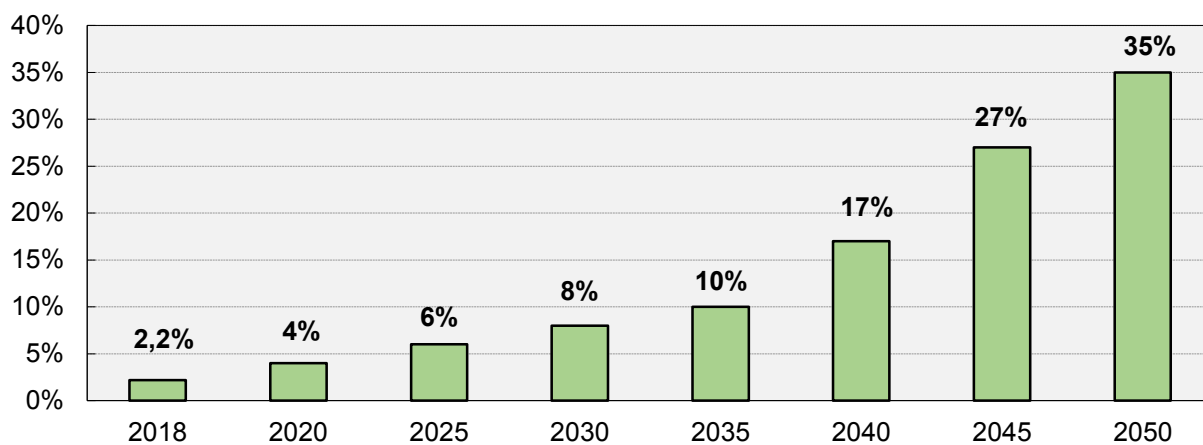


Рис. 2.10. Прогноз частки ВДЕ у транспортному секторі до 2050 р.

Реалізація зазначених цілей можлива за умови зменшення ЗППЕ у 2050 р. порівняно з 2018 р. на 33% (до ~63 млн т н.е.) при збільшенні кінцевого споживання енергії на 8% (до ~55 млн т н.е.).

Згідно світової практики і прогнозу автора, до 90% загального виробництва теплової енергії з ВДЕ припадає і надалі буде припадати на біомасу. Цей підхід іде у розріз з деякими «радикальними» прогнозами, згідно яких у майбутньому Україна може повністю перейти на електрообігрів. Видається показовим приклад Литви, де активно розвивається виробництво теплової енергії з біомаси з амбітними планами і на майбутнє. Згідно Національної стратегії енергетичної незалежності Литви (Lithuania's National Energy Independence Strategy [194]) до 2030 р. 90% теплової енергії будуть вироблятися з ВДЕ, в основному завдяки сучасним ТЕЦ на біомасі. До 2050 р. вся тепла енергія, що споживатиметься у Литві, буде вироблятися з ВДЕ та інших чистих джерел. Литовська асоціація ЦТ (Lithuanian District Heating Association) зазначає, що у Литві достатньо ресурсів, щоб мати 100% опалення з використанням біопалива, не спричиняючи негативного впливу на навколишнє середовище [195].

Структура та напрямки використання енергетичного потенціалу біомаси, передбачені в Дорожній карті, враховують і відображають **ключові тенденції**, які за прогнозами автора матимуть місце у секторі біоенергетики України у період 2020-2050 років. (**Рис. 2.11** та **Рис. 2.12**):

- Збільшення частки агробіомаси – с-г залишків та енергокультур в структурі споживання твердих біопалив – до 60% у 2050 р.
- Мінімальний ріст обсягу використання деревних біопалив – в 1,2 разів у 2050 р.
- Значне збільшення обсягів виробництва біогазу і рідких біопалив I покоління – до 4,7 млн т н.е./рік та 0,43 млн т н.е./рік, відповідно, у 2050 р.

- Започаткування та ріст виробництва біометану і моторних біопалив II покоління – до, відповідно, 2,4 млн т н.е./рік та 0,43 млн т н.е./рік у 2050 р.

Наразі основними складовими енергетичного потенціалу біомаси є первинні с-г залишки (солома зернових колосових культур та ріпаку, ПП кукурудзи та соняшника) – майже 40% загального потенціалу (тут і далі – за даними 2018 р.) і енергетичні культури (верба, тополя, міскантус отримання твердого біопалива і силос кукурудзи для виробництва біогазу) – 32%. Але у структурі виробництва енергії з біомаси первинні с-г залишки і енергокультури займають останні місця, оскільки їх потенціал використовується на 0...3% в залежності від виду біомаси. Дорожня карта передбачає суттєве збільшення обсягів енергетичного використання агробіомаси, у першу чергу стебел та інших ПП кукурудзи та соняшника.

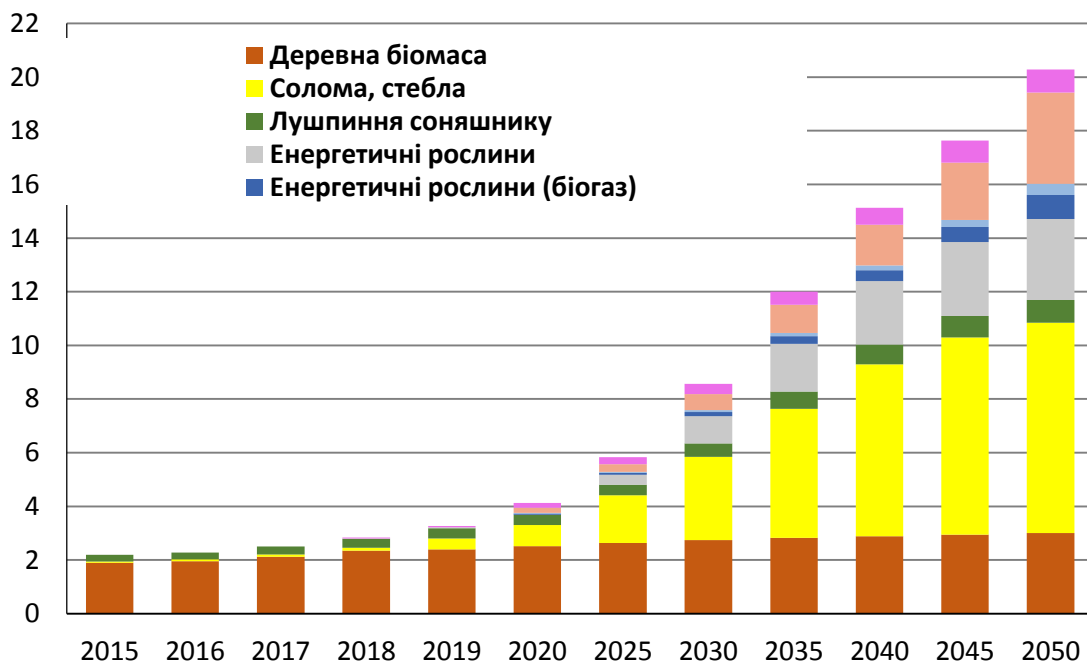


Рис. 2.11. Запропонована в Дорожній карті структура використання біопалив в Україні до 2050 р. за їх видами, млн т н.е.

Частка деревної біомаси в структурі енергетичного потенціалу біомаси становить всього близько 13%, проте практичне застосування її потенціалу перевищує 80%. Виходячи із основ сталого розвитку, Дорожня карта передбачає мінімальний ріст обсягів виробництва енергії з деревного біопалива, необхідний для виконання цілей 2050 р. Цей ріст може бути досягнуто за рахунок збільшення рівня рубки річного приросту деревини в лісах з поточних ~51% до ~71% [196], а також залучення до енергетичного використання сухостою, деревини від реконструкції та відновлення захисних лісосмуг, відходів від обрізки фруктових садів та виноградників.

Україна має необхідні передумови та можливості для суттєвого

нарощування обсягів виробництва рідкого та газоподібного біопалива. Сировиною для отримання біогазу можуть бути с-г залишки (первинні, такі як солома; вторинні, наприклад, пивна барда; гній, послід), енергетичні культури (силос кукурудзи), а також ТПВ та деякі інші види біомаси. Рідкі моторні біопалива включають біоетанол та біодизель. В Україні традиційними видами сировини для виробництва рідких біопалив I покоління є зерно кукурудзи і меляса з цукрових буряків для біоетанолу; насіння ріпаку – для біодизеля.

Отримання та споживання біометану і моторних біопалив II покоління є відносно новими, але назвичайно перспективними сегментами біоенергетики. В Україні, на відміну від Європи, ці напрямки, нажаль, ще не почали розвиватися. Дорожня карта передбачає започаткування та ріст виробництва зазначених видів біопалива, що відповідає європейським трендам та пропонує безперечні переваги для енергетики і транспортного сектору країни.

В Україні більше половини кінцевого споживання енергії припадає на теплову енергію [197]. З урахуванням цього, згідно Дорожньої карти, у 2050 році близько половини загального обсягу споживання біопалив припадатиме на тверді біопалива, що використовуються для виробництва теплової енергії (11,7 млн т н.е.) (див. **Рис. 2.12**). Решта розділятиметься між твердими біопаливами для виробництва електроенергії (3,0 млн т н.е.), біогазом (2,36 млн т н.е.), біометаном (2,36 млн т н.е.), рідкими біопаливами I покоління (0,43 млн т н.е.) та II покоління (0,43 млн т н.е.).

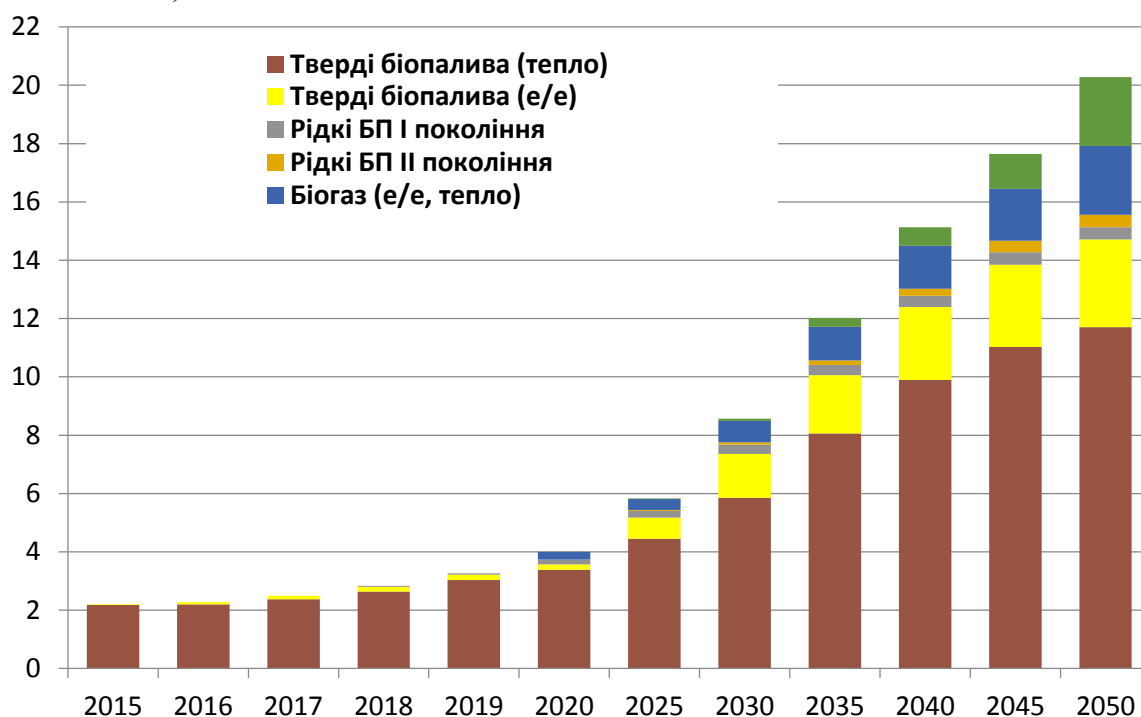
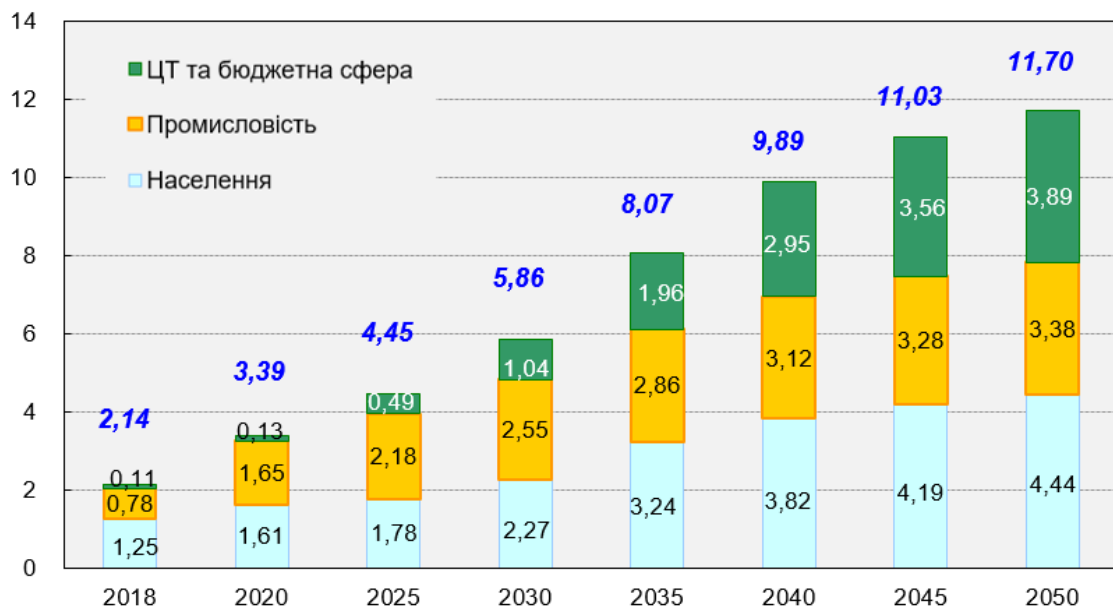


Рис. 2.12. Запропонована в Дорожній карті структура використання біопалив в Україні до 2050 р. за видами отриманого енергоносія, млн т н.е.

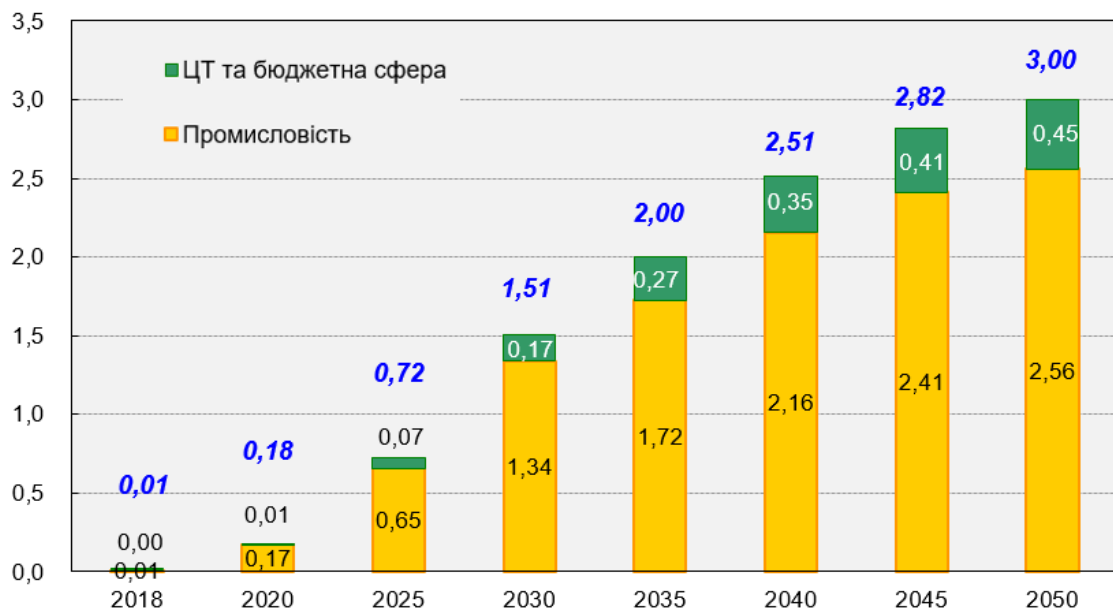
Прогноз структури використання твердих біопалив для виробництва

теплової та електричної енергії в Україні у різних секторах представлено на **Рис. 2.13, 2.14.**



верхні цифри – сума по секторах

Рис. 2.13. Прогноз структури використання твердих біопалив для виробництва теплової енергії в Україні у різних секторах, **млн т н.е.**



верхні цифри – сума по секторах

Рис. 2.14. Прогноз структури використання твердих біопалив для виробництва електричної енергії в Україні у різних секторах, **млн т н.е.**

З наведених даних видно, що обсяги виробництва тепла з твердої біомаси до 2050 р. будуть співставними у ЦТ та бюджетній сфері, промисловості і індивідуальному опаленні населення, тоді як виробництво електроенергії з біомаси буде зосереджено більше в промисловому секторі.

В Табл. 2.17 представлено розподілення обладнання по секторах: побутовий сектор (побутові котли на твердому біопаливі), ЦТ та бюджетна сфера (котли і ТЕЦ на твердому біопаливі, ТЕЦ на ТПВ), промисловість (котли, ТЕЦ, ТЕС, ТЕС ORC на твердому біопаливі, ТЕЦ на біогазі/біометані, електростанції на біогазі з відходів).

Табл. 2.17. Прогноз встановленої потужності біоенергетичного обладнання у 2050 р.

Вид обладнання	Загальна встановлена потужність у 2050 р.	
	МВт _Т	МВт _{Тел}
<i>Побутовий сектор</i>		
Побутові котли, пічки на деревній біомасі (дрова, гранули, брикети)	5285	
Побутові котли на агробіомасі (гранули, брикети, малі тюки)	7500	
Побутові котли на енергетичних рослинах (гранули, тріска)	6000	
<i>ЦТ + бюджетна сфера</i>		
Котли (деревна біомаса)	600	
Котли (первинні с/г залишки)	12750	
Котли (вторинні с/г залишки)	900	
Котли (енергетичні рослини)	2750	
ТЕЦ (деревна біомаса)	225	75
ТЕЦ (первинні с/г залишки)	1500	500
ТЕЦ (енергетичні рослини)	2250	750
<i>Промисловість</i>		
Котли (деревна біомаса)	1400	
Котли (первинні с/г залишки)	3000	
Котли (вторинні с/г залишки)	300	
ТЕЦ (деревна біомаса)	240	80
ТЕЦ (первинні с/г залишки)	1520	475
ТЕЦ (вторинні с/г залишки)	300	100
ТЕЦ (біогаз, біометан)	2870	2040
ТЕС (первинні с/г залишки)		380
ТЕС (вторинні с/г залишки)		160
ТЕС (деревна біомаса)		55
ТЕС (енергетичні рослини)		340
ТЕС ORC (первинні с/г залишки)		25
ТЕЦ на біогазі з відходів (полігони ТПВ, МБО відходів, стічні води)	265	250
Всього	49655	5230

Передбачається, що загальна встановлена потужність біоенергетичного обладнання у 2050 році складатиме близько **49,6** ГВт_т і **5,2** ГВт_{ел}. Загальне споживання біопалив становитиме **20,28** млн т н.е./рік, що фактично відповідає повному використанню поточного енергетичного потенціалу біомаси і біля половини енергетичного потенціалу біомаси в 2050 р..

Попередні експертні оцінки свідчать про те, що реалізація Дорожньої карти потребує інвестицій обсягом **20,8...33,5** млрд євро в залежності від вартості обладнання, яке буде впроваджуватися. Розподіл інвестицій за видами біоенергетичного обладнання/технологій наведено в **Табл. 2.18**.

Табл. 2.18. Оцінка інвестицій, необхідних для реалізації Дорожньої карти розвитку біоенергетики України до 2050 р.

Види біоенергетичного обладнання/ технологій	Питомі капітальні витрати*	Необхідні інвестиції, млрд євро
Побутові котли, пічки на твердій біомасі	50...100 євро/кВт _т	0,9...1,9
Котли на твердій біомасі.	200...300 євро/кВт _т	4,3...6,5
ТЕЦ/ТЕС на твердій біомасі.	2500...4000 євро/кВт _{ел}	7,4...11,8
ТЕЦ на біогазі/біометані (с/г залишки, полігони ТПВ, МБО відходів, стічні води).	2500...4000 євро/кВт _{ел}	5,7...9,1
Виробництво біометану (моторне паливо)	10000...16000 євро/(м ³ СН ₄ /год)	1,1...1,8
Виробництво рідких біопалив I покоління.	837...1648 євро/т н.е.	0,4...0,7
Виробництво рідких біопалив II покоління.	2346...4246 євро/т н.е.	1,0...1,8
Загалом		20,8...33,5

Розвиток біоенергетики згідно прогнозу, представленому в Дорожній карті, може призвести до заміщення близько **20** млрд м³/рік природного газу і створення більше **160** тис. робочих місць до 2050 р (**Табл. 2.19**).

Таблиця 26. Прогноз розвитку біоенергетики до 2050 р. в частині твердого біопалива.

Рік	Встановлена потужність		Споживання біопалива*, млн т н.е.	Заміщення природного газу, млрд м ³	Зміщення бензину та дизельного пального, млн т	Скорочення викидів CO ₂ , млн т/рік	Інвестиції, млрд євро		Створення робочих місць, од.
	МВт _т	МВт _{ел}					мін.	макс.	
2020	8206	202	3,77	4,34	0,17	8,90	1,52	2,52	16900
2025	12276	844	5,83	6,35	0,25	14,31	3,73	6,06	31400
2030	19087	1846	8,57	9,11	0,39	21,35	7,07	11,44	54300
2035	30237	2804	12,01	12,62	0,50	30,37	10,78	17,43	86200
2040	39338	3609	15,13	15,77	0,67	38,66	14,15	22,85	115400
2045	45351	4299	17,64	17,98	0,96	45,79	16,94	27,38	139000
2050	49655	5230	20,28	19,92	1,23	54,40	19,70	31,81	162700

2.4. Висновки до розділу

1. Розроблено методику оцінювання ресурсів біомаси, придатної для енергетичного використання. Методика включає оцінку теоретичного, технічно досяжного та економічно доцільного потенціалу біомаси, придатної для енергетичного використання. Питання про частку соломи, стебел та інших пожнивних решток, що можуть бути використані для виробництва енергії або біопалива, необхідно вирішувати індивідуально для кожного господарства. При цьому мають бути враховані всі важливі агроекономічні фактори. Для України в цілому загальна рекомендація автора - використовувати на енергетичні цілі до **30%** теоретичного потенціалу соломи зернових колосових культур і до **40%** теоретичного потенціалу соломи ріпаку, а також ПП кукурудзи та соняшника.

2. Енергетичний потенціал біомаси, оцінений згідно розробленої методики, становив в 2018 році **23,1** млн т н.е./рік. Основними складовими енергетичного потенціалу біомаси є первинні с-г залишки (солома зернових колосових культур та ріпаку, ПП кукурудзи та соняшника) – майже 40% загального потенціалу і енергетичні культури (верба, тополя, міскантус отримання твердого біопалива і силос кукурудзи для виробництва біогазу) – 32%. Експерні оцінки показують, що у 2050 цей потенціал може збільшитися до близько **45** млн т н.е./рік.

3. Дорожня карта розвитку біоенергетики України до 2050 р. є необхідним документом, оскільки вона дає план дій по досягненню існуючих цілей з розвитку біоенергетики до 2035 р., окреслює цілі та перспективи сектору

до 2050 р., містить матеріали для розробки ряду стратегічних документів в секторі енергетики. Крім того, Дорожня карта є першим кроком на шляху підготовки більш комплексного документу – довгострокової стратегії розвитку біоенергетики України.

Дорожня карта відповідає сценарію досягнення не менше **60%** ВДЕ в енергобалансі у 2050 р., у тому числі по окремих секторах:

- електроенергія – **70%** ВДЕ;
- теплова енергія – **65%** ВДЕ;
- транспорт – **35%** ВДЕ.

Попередні оцінки автора свідчать про те, що реалізація Дорожньої карти потребує інвестицій обсягом **20,8...33,5** млрд євро в залежності від вартості обладнання, яке буде впроваджуватися.

Розвиток біоенергетики згідно прогнозу, представленому в Дорожній карті, призведе до заміщення близько **20** млрд м³/рік природного газу і створення більше **160** тис. робочих місць до 2050 р.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ НАУКОВИХ ЗАСАД ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГІЇ З БІОЛОГІЧНИХ ВИДІВ ПАЛИВА

З досліджених в роботі розглянуті переважно питання пов'язані з ПП кукурудзи, які є найменш дослідженими і одними з найбільш перспективних.

3.1. Збирання і енергетичне використання поживних решток кукурудзи

Сучасний стан виробництва кукурудзи на зерно в світі та Україні

Кукурудза – це найбільш урожайна культура, всі частини якої (Рис. 3.1) широко використовуються у різних галузях сільського господарства та промисловості.

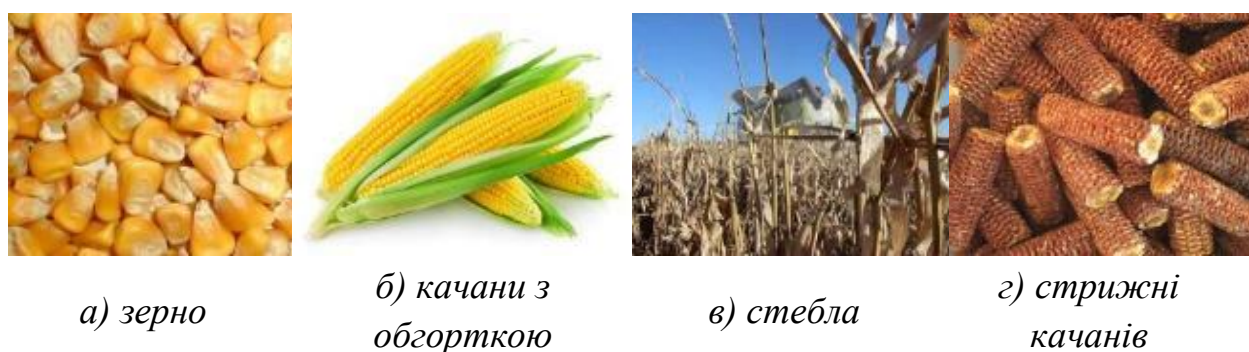


Рис. 3.1. Основні частини кукурудзи.

Великим є й агротехнологічне значення кукурудзи, оскільки вона очищує ґрунт від бур'янів та є ефективним попередником у сівозміні. За поглинанням вуглекислого газу й виділенням кисню кукурудза займає одне з перших місць серед всіх культурних рослин і є навіть ефективнішою, ніж ліс аналогічної площі [198]. Вирощування кукурудзи на зерно дозволяє краще використовувати с-г техніку за рахунок пізніших строків посіву і збирання. Цінні властивості кукурудзи викликають її стабільно високий попит на світовому ринку. Більше інформації про властивості та особливості вирощування кукурудзи наведено у роботі [199], розробленій за участю автора.

США є світовим лідером із валового збору та врожайності кукурудзи на зерно. За попередніми даними, виробництво кукурудзи в США у 2018/2019 маркетинговому році (МР) становило 364,3 млн т (32,5% від світового виробництва), середня врожайність – 11,1 т/га. В інших країнах виробництво кукурудзи у 2018/2019 МР було таким: Китай – 257,3 млн т, Бразилія – 101 млн т, ЄС – 64,2 млн т, Аргентина – 51 млн т та Україна – 35,8 млн т (6-е місце у світі). При цьому у січні поточного року прогноз USDA [200] для України на 2019/2020 МР становить 35,5 млн т, що дещо нижче, ніж історичний рекорд 2018 р.

Зростання врожайності кукурудзи пов'язано із розвитком аграрної науки та використанням біотехнології для створення гібридів, що з 2000 р. забезпечує приріст врожайності у США на 2% щорічно [201]. На порівняльних

випробуваннях американські фермери досягають врожайності зерна кукурудзи понад 250 ц/га. У 2019 р. Національна асоціація виробників кукурудзи США повідомила про встановлення світового рекорду у штаті Вірджинія – близько 386 ц/га (616,2 бушелі/акр) зерна кукурудзи [202].

Кукурудза була однією з основних с-г культур в Україні протягом принаймні останнього десятиліття (Рис. 3.2). Незважаючи на деякі коливання, загальною тенденцією було зростання врожаю зерна кукурудзи (Рис. 3.3). За даними 2018 р, посівна площа під кукурудзу на зерно становила 4564 тис. га (що складало майже 31% посівної площі під усі зернові та зернобобові культури), при цьому валовий збір досягнув 35,8 млн т, а урожайність – 78,4 ц/га. У 2019 р. площі під кукурудзою на зерно в Україні зросли до 4,9 млн га.

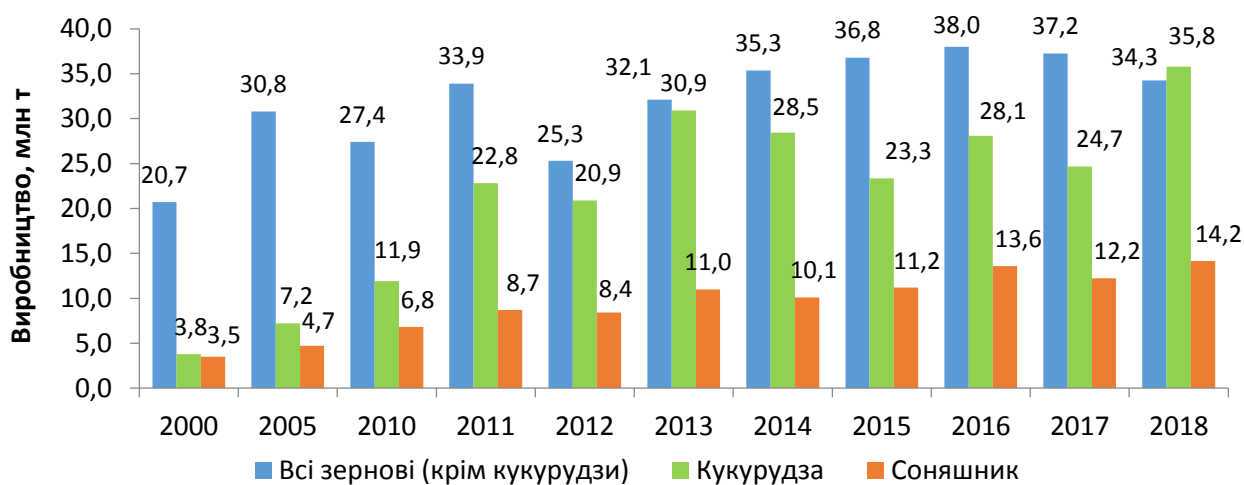


Рис. 3.2. Виробництво зернових культур та соняшника в Україні [203].

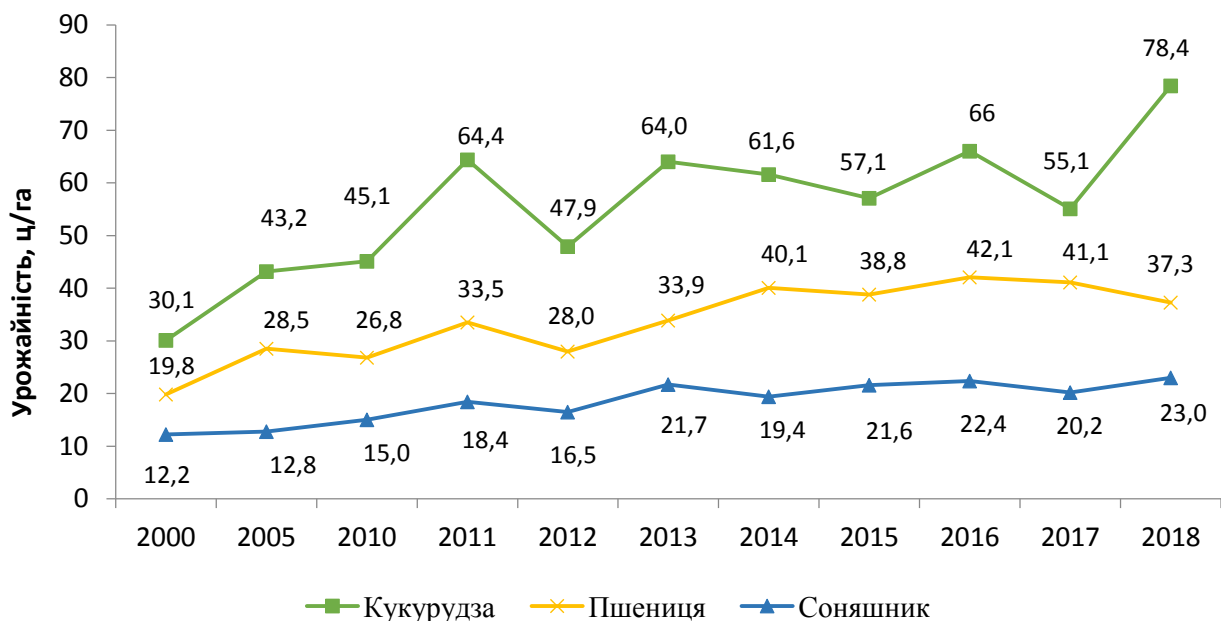


Рис. 3.3. Урожайність зернових культур та соняшника в Україні [203].

Оцінка енергетичного потенціалу ПП кукурудзи в Україні

ПП кукурудзи (кукурудзиння) складається (Рис. 3.4) з стебел, що становлять близько 52,5% всієї маси залишків, листя – 20,0%, стрижнів – 17,5%, обгортки – 8,5% , інших частин – 1,5%.

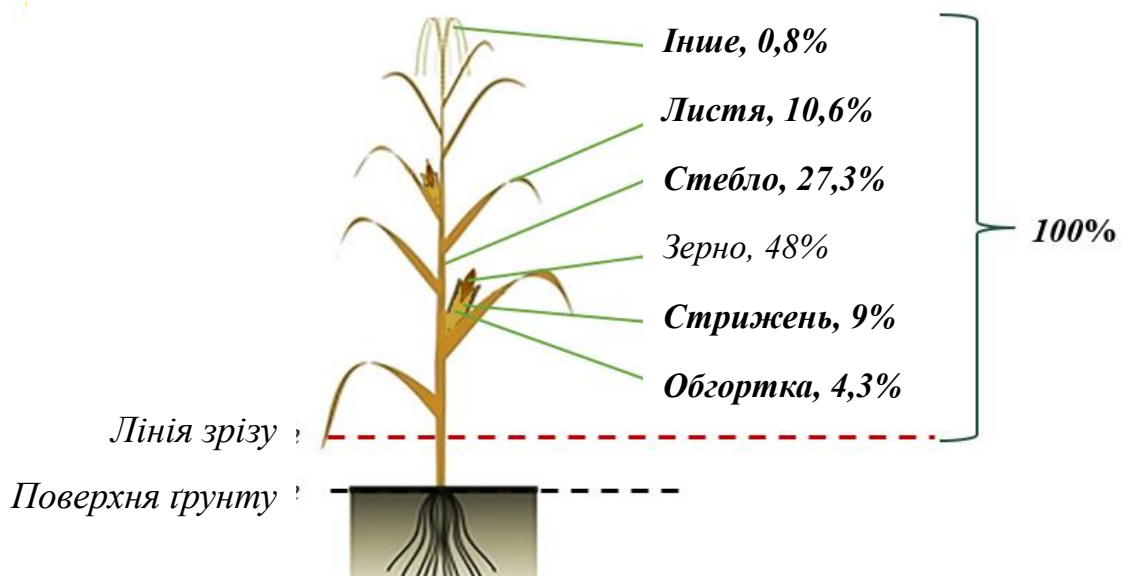


Рис. 3.4. Основні частини кукурудзи та їхні масові співвідношення [204]

Коефіцієнт виходу ПП кукурудзи (масове співвідношення між ПП та зерном) залежить від багатьох факторів, насамперед від гібриду, але в середньому для кукурудзи він становить 1,3 [205]. При збиранні кукурудзи на зерно зернозбиральним комбайном формуються три потоки рослинних решток: стерня; стебла і листя, які залишаються за жаткою, та обгортка і стрижні, які залишаються за комбайном (Рис. 3.5).

Оцінка енергетичного потенціалу ПП кукурудзи в Україні у 2018 р., зробленого на базі підходів [206], показала наступні результати (Табл. 3.1):

- теоретичний потенціал (весь обсяг утвореної ПП) складає **46,5 млн т**, або **8,9 млн т н.е.**;
- економічний потенціал (обсяги, доступні для енергетичного використання) становить **18,6 млн т** або **3,6 млн т н.е.**, включаючи *стебла* – 9,7 млн т (1,9 млн т н.е.) та *стрижні* – 3,3 млн т (0,6 млн т н.е.).



Позначення: СТ – стебло, ЛТ – листя, ОБ – обгортка, СТР – стрижень, $M_{\text{зерна}}$ – маса зерна

Рис. 3.5. Орієнтовні потоки рослинних решток при збиранні кукурудзи зернозбиральним комбайном.

Табл. 3.1. Енергетичний потенціал ПП кукурудзи в Україні у 2018 р.

Області	Теоретичний потенціал		Економічний потенціал	
	тис. т	тис. т н.е.	тис. т	тис. т н.е.
Вінницька	4876,8	931,8	1950,7	372,7
Волинська	375,1	71,7	150,0	28,7
Дніпропетровська	1728,6	330,3	691,4	132,1
Донецька	232,1	44,3	92,8	17,7
Житомирська	1956,1	373,8	782,4	149,5
Закарпатська	353,7	67,6	141,5	27,0
Запорізька	166,0	31,7	66,4	12,7
Івано-Франківська	425,5	81,3	170,2	32,5
Київська	3677,6	702,7	1471,0	281,1
Кіровоградська	2949,3	563,5	1179,7	225,4
Луганська	294,5	56,3	117,8	22,5
Львівська	465,7	89,0	186,3	35,6
Миколаївська	742,8	141,9	297,1	56,8
Одеська	933,0	178,3	373,2	71,3
Полтавська	6405,9	1224,0	2562,4	489,6
Рівненська	618,7	118,2	247,5	47,3
Сумська	4255,4	813,1	1702,2	325,2
Тернопільська	1307,2	249,8	522,9	99,9
Харківська	1862,3	355,8	744,9	142,3
Херсонська	380,9	72,8	152,4	29,1
Хмельницька	2732,1	522,0	1092,8	208,8
Черкаська	4372,2	835,4	1748,9	334,2
Чернівецька	429,7	82,1	171,9	32,8
Чернігівська	5000,6	955,5	2000,2	382,2
УКРАЇНА	46541,4	8893,0	18616,6	3557,2

До 2030 р. можна очікувати збільшення економічного потенціалу ПП кукурудзи в Україні до **19,2** млн т/рік, або **3,7** млн т н.е./рік, з огляду на очікуване зростання врожайності кукурудзи в Україні до найкращих показників ЄС. В 2019 р. середня врожайність кукурудзи в Україні досягла 78,4 ц/га. Враховуючи поточну позитивну динаміку розвитку рослинництва в країні, очікується що протягом найближчих 10 років Україна вийде на рівень врожаю кукурудзи понад 100 ц/га.

Виробництво ПП рослинництва, включаючи кукурудзиння, є сезонним і залежить від періодів збирання урожаю. Кукурудзу на зерно збирають у різні часові рамки, залежно від сорту, місця вирощування та часу сівби. Зазвичай початок збирання кукурудзи визначається рівнем вологості зерна, тому перед збиранням врожаю визначають вологість зерна та його стиглість з урахуванням строків сівби та гібридної групи стиглості. До початку збирання зерно кукурудзи повинно мати високий вміст сухої речовини (не менше 45%).

Як правило, кукурудзу на зерно збирають у вересні-листопаді. Наприклад, в Україні у 2016 році кукурудзу на зерно зібрали з 24,4% загальної площі до початку жовтня (20,4% річного виробництва) та з 65,7% площі до початку листопада (61,4% річного виробництва). До 2 грудня 2016 р. частка зібраної площі під кукурудзою становила 95-100% у 10 областях, а у решті зібрали переважно понад 80%.

Слід зазначити, що останніми роками деякі фермери збирали кукурудзу у грудні, січні та навіть пізніше. Однак це пов'язано не з агротехнічними вимогами, а з певними виробничими особливостями та економічною доцільністю. Відповідно до існуючих періодів збирання, типовий «графік» отримання кукурудзиння представлений у **Табл. 3.2.**

Табл. 3.2. Сезонне отримання кукурудзиння в Україні.

Місяць	Коментарі
Січень	Нетиповий період (лише у випадках деяких виробничих потреб та економічної доцільності)
Вересень	Типовий період
Жовтень	Типовий період
Листопад	Типовий період
Грудень	Нетиповий період (лише у випадках деяких виробничих потреб та економічної доцільності)

Розподіл потенціалу кукурудзиння на території України не рівномірний. Регіони з найбільшою концентрацією цього виду біомаси – це області з найбільшими обсягами виробництва кукурудзи на зерно. У 2018 р. найбільший потенціал ПП кукурудзи на зерно був на Полтавщині (з економічним потенціалом

кукурудзиння 489,6 тис. т н.е.), у Чернігівській області (382,2 тис. т н.е.) та у Вінницькій області (372,2 тис. т н.е.) (**Рис. 3.6**).

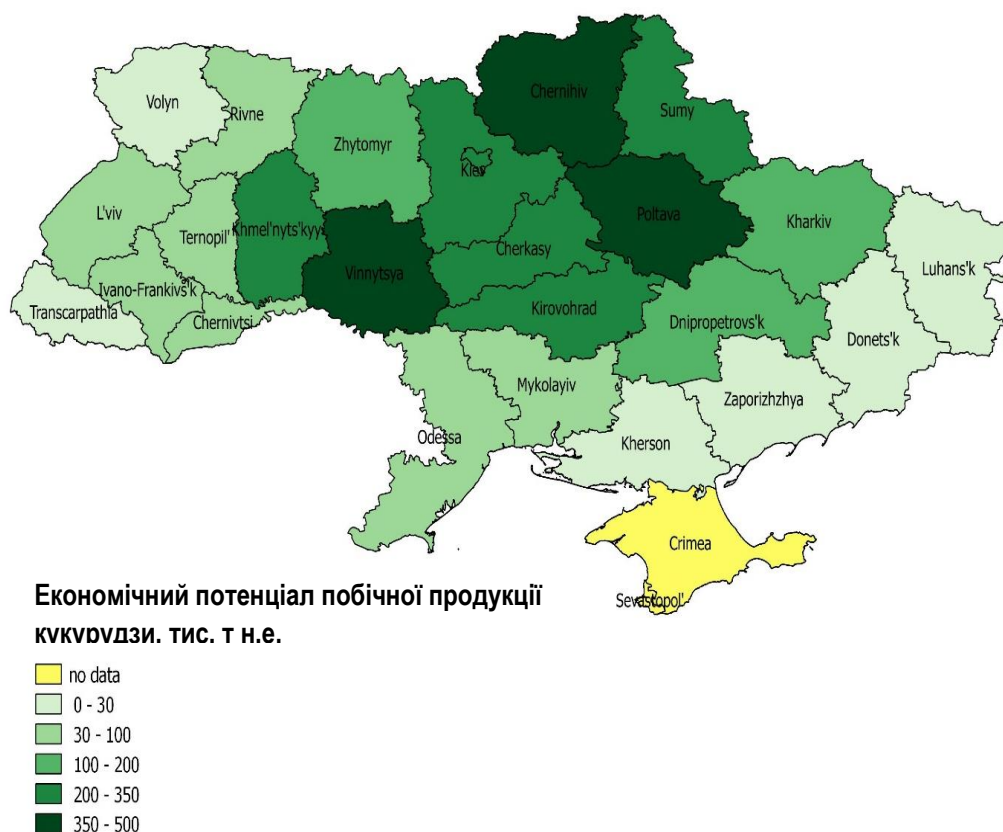


Рис. 3.6. Картограма економічного енергетичного потенціалу ПП кукурудзи у регіонах України у 2018 р.

Паливні характеристики та властивості ПП кукурудзи.

Загалом, ПП кукурудзи має досить хороші паливні властивості, близькі до властивостей деревного палива. Завдяки цьому біопаливо, виготовлене із кукурудзиння, може спалюватися в котельному обладнанні, призначеному для деревної біомаси. Детальна характеристика та паливні властивості різних видів ПП кукурудзи представлені в **Табл. 3.3**. Порівняння властивостей із властивостями іншої с-г біомаси та деревної тріски наведено у **Табл. 3.4**.

Вміст золи у кукурудзинні є основним фактором якості для подальшого виробництва біопалива. Вміст золи залежить від технології збирання, оскільки він збільшується внаслідок контакту біомаси з ґрунтом. З огляду на це, існує два типи золи: структурна та неструктурна [207]. Структурна зола складається з неорганічних речовин у рослині, які залишаються після її спалювання. Звичайна зольність кукурудзиння становить 3,5%. Неструктурована зола – це неорганічні речовини (переважно ґрунт), які потрапляють у біомасу під час її заготівлі, зокрема при формуванні валків та тюкуванні. Типовий загальний вміст золи у кукурудзинні при збиранні с-г машинами у декілька проходів становить 8-10%.

Табл. 3.3. Характеристики та паливні властивості ПП кукурудзи [208].

Показники	Зразки стебел та листя кукурудзи ¹⁾			Зразки стрижнів кукурудзи ¹⁾		
	#704	#889	#1241	#2068	#2791	#1454
<i>Властивості:</i>						
Вологість, W^{ar} , %	6,06	5,00	–	–	7,04	–
Вміст золи, A^d , %	5,06	7,35	5,58	3,48	3,12	3,60
Летючі, V^{daf} , %	85,17	84,30	79,61	–	80,69	83,20
<i>Елементарний склад:</i>						
Вуглець, C^d , %	46,82	46,50	43,65	48,22	46,51	45,31
Водень, H^d , %	5,74	5,81	5,56	6,20	5,68	7,16
Азот, N^d , %	0,66	0,56	0,61	1,57	0,47	–
Сірка, S^d , %	0,11	0,11	0,01	0,13	0,09	–
Кисень, O^d , %	41,36	39,67	43,31	42,94	44,13	43,93
<i>Галоїди:</i>						
Хлор, Cl^d , мг/кг	2661,3	0,0	6000,0	2100	–	–
Нижча теплота згоряння, Q^{ar} , МДж/кг	15,68	16,72	16,44 ⁴⁾	–	15,05	14,02 ⁴⁾
Вища теплота згоряння, Q^{daf} , МДж/кг	19,06	20,50	18,69	19,95 ²⁾	18,19	16,16
<i>Склад золи, %:</i>						
P_2O_5	8,68	–	–	#1240 ⁵⁾	–	–
SiO_2	54,04	–	–	–	–	–
Al_2O_3	1,99	–	–	–	–	–
CaO	8,66	–	–	–	–	–
MgO	6,11	–	–	–	–	–
Na_2O	0,15	–	–	–	–	–
K_2O	20,67	–	–	–	–	–
<i>Температури плавкості золи, °C:</i>						
Початок деформації (IDT)	–	1232	–	900	–	850
Напівсфера (HT)	–	1500	–	–	–	1000
Розтікання (FT)	–	1500	–	1020	–	–
<i>Біохімічна композиція, %</i>						
Целюлоза	–	36,80	28,00	26,30	52,00	–
Геміцелюлоза	–	25,40	28,00	25,20	32,00	–
Лігнін	–	16,90	11,00	16,30	15,00	–

Верхні індекси: ar – паливо у робочому стані; d – суха речовина; daf – сухий беззолний залишок.

1) Значення відповідно до бази даних Phyllis. 2) HHV_{mine} . 3) Склад золи та характеристики плавкості золи для зразка #402. 4) Для сухої речовини. 5) Галоїди для зразка #1240. 6) Біохімічна композиція для зразка #979. 7) Біохімічна композиція для зразка #2372.

Табл. 3.4. Хімічний склад та характеристики різних видів біопалива.

Показники	Свіжа солома «жовта»	Лежала солома («сіра»)	Солома озимої пшениці	Стебла кукурудзи*	Стебла соняшника*	Деревна тріска
Вологість, %	10-20	10-20	11,2	30-60 (після збирання) 15-18 (висушені на повітрі)	35-70 (після збирання) ~20 (висушені на повітрі)	40
Нижча теплота згорання, МДж/кг	14,4	15	14,96	16,7 (с.р.) 5-8 (W 45-60%) 15-17 (W 15-18%)	16 (W<16%)	10,4
Вміст летючих речовин, %	>70	>70	80,2	67	73	>70
Зольність, %	4	3	6,59	6-9	10-12	0,6-1,5
Елементарн. склад, %:						
вуглець	42	43	45,64	45,5	44,1	50
водень	5	5,2	5,97	5,5	5,0	6
кисень	37	38	41,36	41,5	39,4	43
хлор	0,75	0,2	0,392	0,2	0,7-0,8	0,02
калій	1,18	0,22	–	стрижні: 6,1 мг/кг с.р.	5,0	0,13-0,35
азот	0,35	0,41	0,37	0,69; 0,3	0,7	0,3
сірка	0,16	0,13	0,08	0,04	0,1	0,05
Температура плавлення золи, °С	800-1000	950-1100	1150	1050-1200	800-1270	1000-1400

с.р. – суха речовина; *W* – вологість.

* Дані по вмісту летючих речовин, зольності, елементарному складу – % маси *с.р.*

За характеристиками плавкості золи кукурудзиння наближається до деревної біомаси, що забезпечує кращі умови для спалювання порівняно із соломою зернових колосових культур. Для порівняння: у деревини температура плавлення золи у середньому складає близько 1200⁰С, а у стебел кукурудзи – близько 1100⁰С (див. **Табл. 3.4**). Крім того, кукурудзиння містить менше хлору

(0,2% с.р.) у порівнянні зі свіжою («жовтою») соломою зернових колосових культур (0,75% с.р.). Це позитивний фактор для використання ПП кукурудзи на зерно як палива, оскільки сполуки хлору викликають корозію сталевих елементів енергетичного обладнання.

За елементарним складом кукурудзиння майже не відрізняється від соломи зернових колосових, тому у них порівнювана теплотворна здатність. Властивості ПП рослинництва сильно залежать від місця вирощування, періоду збирання та погоди, ґрунту та добрив. Найбільший вплив на теплотворну здатність кукурудзиння має вологість (**Рис. 3.7**).

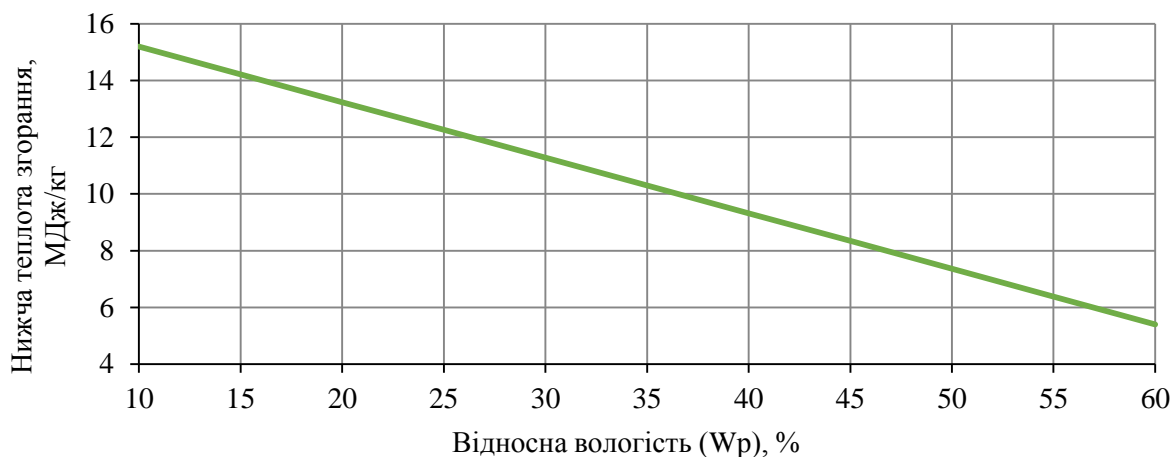


Рис. 3.7. Графік залежності нижчої теплоти згорання від відносної вологості кукурудзиння.

Вибір технології збирання ПП кукурудзи.

При організації збирання побічної продукції кукурудзи на зерно важливо уникнути негативного впливу на її паливні характеристики. При цьому хімічний склад біомаси формується під час біологічного циклу росту рослини. Технологія збирання безпосередньо впливає на вологість побічної продукції та може збільшити її зольність, в першу чергу за рахунок забруднення ґрунтом. Під дією опадів в біомасі зменшується вміст окремих агресивних речовин, у тому числі, хлору і луґу, які викликають корозію обладнання. Тому, вибір раціональної технології збирання ПП кукурудзи є важливим фактором для забезпечення ефективного енергетичного використання такої біомаси, зокрема, для її спалювання або анаеробне зброджування.

Можна виділити декілька технологічних схем збору кукурудзи на зерно:

1. Збирання кукурудзозбиральними комбайнами з наступною доробкою качанів на стаціонарі:
 - 1.1. з одночасним очищенням качанів від обгорток;
 - 1.2. без очищення качанів від обгорток.
2. Збирання зернозбиральними комбайнами з кукурудзяними жатками.

3. Збирання комбайнами зерно-стрижневої суміші.

Нині основним способом збору врожаю товарної кукурудзи є *комбайновий обмолот качанів у полі, подрібнення і розкидання зрізаної маси* при використанні зернозбиральних комбайнів з кукурудзяними жатками. Такий спосіб збирання кукурудзи є найбільш економічно доцільним. Він, порівняно із збором кукурудзи в качанах, забезпечує у 1,8-2 рази зменшення затрат праці та на 20-25% – витрати палива [209]. Лише деякі господарства збирають кукурудзу в необмолочених качанах з наступним стаціонарним обмолотом, що *дає можливість збору стрижнів без їх забруднення ґрунтом*. Це насінневі заводи, метою вирощування кукурудзи у яких є отримання (гібридного) насіння кукурудзи як посадкового матеріалу. Збирання зерно-стрижневої суміші в Україні поки що мало розповсюджене. В результаті досліджень встановлено, що при збиранні кукурудзи зернозбиральними комбайнами, оснащеними кукурудзяними жатками, рослинні залишки у загальному перерозподіляються таким чином: стерня (10% маси зерна), залишки за жаткою (96% маси зерна) і залишки за комбайном (24% маси зерна) (**Рис. 3.5**).

Побічну продукцію можна збирати у подрібненому вигляді або спресовану у тюкі. Пресування біомаси у тюки завдяки ущільненню сировини у більш ніж 4 рази сприяє підвищенню ефективності логістики та зменшує необхідні площі складів. Виділимо чотири основні типи технологічних схем збирання ПП кукурудзи у тюках (**Рис. 3.8**):

1. Однопрохідна схема, в якій зернозбиральний комбайн з'єднаний із прес-підбирачем, що дозволяє формувати тюки кукурудзиння одночасно із обмолотом зерна.

2. Двопрохідна система: зернозбиральний комбайн з жаткою, що формує валок із кукурудзиння, яке далі тюкується трактором із прес-підбирачем.

3. Трьохпрохідна система: зернозбиральний комбайн + трактор з мульчувачем-валкоутворювачем + трактор з прес-підбирачем великих прямокутних тюків (рулонів).

4. Багатопрохідна система: зернозбиральний комбайн + трактор з мульчувачем + трактор з граблями + трактор з прес-підбирачем.

З цих технологій з огляду на можливість використання для збирання кукурудзи на зерно стандартної техніки, наявної у агровиробників та менший контакт біомаси із ґрунтом, що дозволяє запобігти погіршення паливних характеристик побічної продукції, для України рекомендується використовувати *трьохпрохідну* систему (**Рис. 3.8 с**).



a) Однопрохідна система: комбайн з прес-підбирачем.



b) Двопрохідна система: комбайн з жаткою валкоутворювачем + трактор з прес-підбирачем.



c) Трьохпрохідна система: комбайн + трактор з мульчувачем-валкоутворювачем + трактор з прес-підбирачем.



d) Багатопрохідна система: комбайн + трактор з мульчувачем + трактор з граблями + трактор з прес-підбирачем.

Рис. 3.8. Технологічні схеми збирання ПП кукурудзи [210].

На різних стадіях процесу збору врожаю можуть використовуватися різноманітні моделі с-г техніки (**Рис. 3.9**). На ринку України доступні не всі види необхідного обладнання, але деякі з них можна замовити та імпортувати через дилерів, що працюють в Україні. Обладнання потребує налаштування під конкретні умови збирання побічної продукції кукурудзи на зерно, зкорема, необхідно враховувати висоту зрізу кукурудзи, ґрунтові умови та обсяги біомаси.

Використовуються у США	Дилери в Україні	Аналоги ЄС
1. Утворення валків		
Hiniker 5600 series	-	-
		Biochipper 300, 400, 500, 600
2. Тюкування		
Massey Ferguson 2270XD	+	+
		Krone Big Pack 1290 HDP
3. Збирання тюків у полі		
ProAg 16 K Plus Bale Runner	+	+
		Arcusin Autostack XP 54T

Рис. 3.9. Моделі сільськогосподарської техніки для збирання ПП кукурудзи.

Приклад налагодженого ланцюга заготівлі ПП у тюках, що використовується компанією DuPont (США) для забезпечення заводу виробництва біоетанолу із лігноцелюлозної сировини, представлений на **Рис. 3.10**. Після збирання кукурудзи на зерно місцевими фермерами, спеціально підготовлені працівники заводу здійснюють заготівлю ПП кукурудзи.

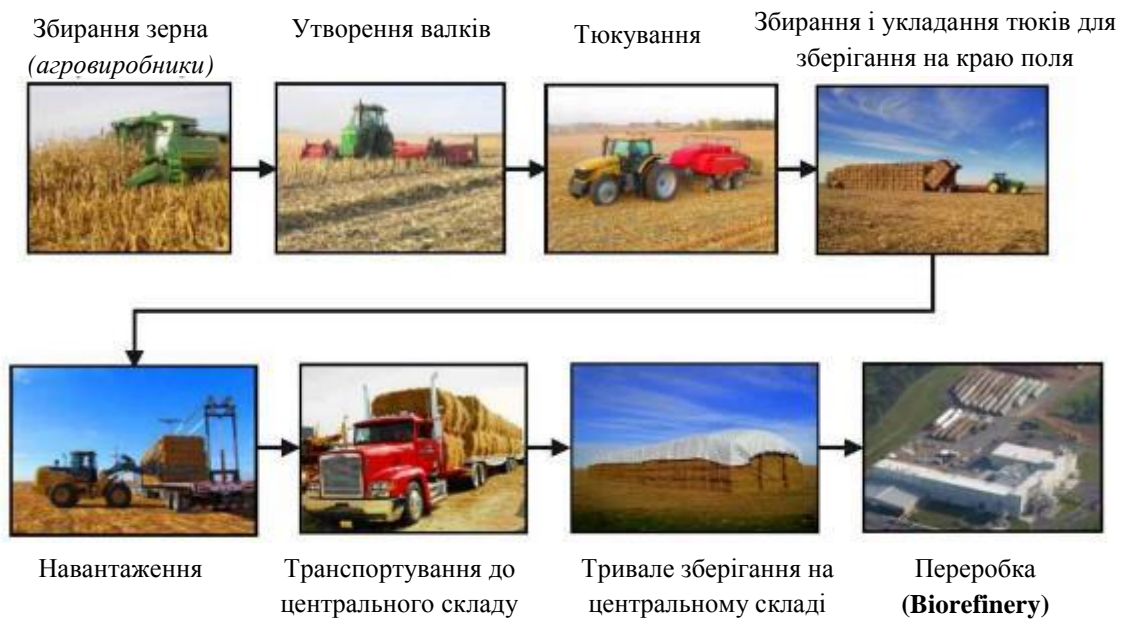


Рис. 3.10. Схема заготівельно-логістичної структури для збирання ПП кукурудзи для заводу виробництва біоетанолу із лігноцелюлозної сировини DuPont [211].

Крім технологій збирання ПП кукурудзи 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. 3.11** зображена технологічна схема збирання кукурудзиння у подрібненому вигляді з використанням кормозбирального 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-підбирача [212].



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



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

Рис. 3.11. Ланцюжки заготівлі ПП кукурудзи у подрібненому вигляді.

Іншим варіантом заготівлі ПП кукурудзи є збирання частини залишків після обмолоту зерна комбайном. Наприклад, дослідники італійської компанії CREA-IT (Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e l'Analisi dell'Economia Agraria) провели у 2018 р. польові випробування для оцінки ефективності інноваційної механізованої системи збору стрижнів качанів [213] (**Рис. 3.12 а**). Використовуючи комбайн із системою Harcov, вдалося зібрати в середньому 2 т/га стрижнів, продуктивність за зібраною біомасою – 4,1 т/год [214]. Компанія Vermeer випускає збирач стрижнів CCX770 (**Рис. 3.12 б**), який доступний на ринку с-г техніки [215]. Збирач стрижнів Vermeer CCX770 – це причіпна машина, яка приєднується до зернозбирального комбайна. Цей технічний засіб дозволяє фермерам за один прохід збирати як зерно кукурудзи, так і окремо – стрижні.



a)



b)

Рис. 3.12. Збирач стрижнів: а – система Harco; b – Vermeer CCX770.

Отже, для збирання ПП кукурудзи можна застосовувати різноманітні технології на базі різних машин, але, беручи до уваги наявне на ринку обладнання та результати польових випробувань у США та ЄС, визначимо раціональну для вітчизняних умов технологію збирання ПП кукурудзи для подальшого її енергетичного використання. Для цього використаємо техніко-економічну оцінку чотирьох ланцюгів заготівлі кукурудзиння:

1) **SC1** – трьохпрохідна система на базі прес-підбирача великих прямокутних тюків: зернозбиральний комбайн + трактор з мульчувачем-валкоутворювачем + трактор з прес-підбирачем великих прямокутних тюків (**Рис. 3.8 с**);

2) **SC2** – трьохпрохідна система на базі рулонного прес-підбирача: зернозбиральний комбайн + трактор з мульчувачем-валкоутворювачем + трактор з рулонним прес-підбирачем;

3) **SC3** – система на базі кормозбирального комбайна: зернозбиральний комбайн + трактор з мульчувачем-валкоутворювачем + кормозбиральний комбайн + трактор з причепом (**Рис. 3.11 а**);

4) **SC4** – система на базі кормозбирального причепа-підбирача: зернозбиральний комбайн + трактор з мульчувачем-валкоутворювачем + трактор з кормозбиральним причепом-підбирачем (**Рис. 3.11 б**).

Додатково розглянута технологія заготівлі стрижнів качанів на базі Vermeer CCX770 (**Рис. 3.12 б**).

Результати ТЕО для цих технологій представлені в Розділі **5.1**. Відповідно до отриманих результатів, найбільш економічно доцільною технологією заготівлі ПП кукурудзи є технологія **SC1** з виготовленням *великих прямокутних тюків*, що дозволяє отримати біомасу на центральному складі на відстані 25 км від поля з собівартістю від 22,3 євро/т с.р.

3.2. Енергетичний та екологічний аналіз життєвого циклу енергетичного використання ПП кукурудзи

Біомаса, яка виробляється чи використовується в енергетичних цілях, має бути отримана з врахуванням критеріїв сталого розвитку. Такі критерії включають недопущення негативного впливу на навколишнє середовище, збереження біорозмаїття, уникнення конкуренції з виробництвом продуктів харчування, сприяння економічному розвитку локального регіону та інші. Сталий розвиток – загальна концепція стосовно необхідності встановлення балансу між задоволенням сучасних проблем людства і захистом інтересів майбутніх поколінь, включаючи їх потребу у безпечному і здоровому довкіллі.

Критерії сталості для твердої біомаси, що використовується з метою виробництва енергії, встановлюються як обов'язкові до виконання у Директиві Європарламенту 2018/2001/ЕС щодо сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел [216]. За рекомендаціями роботи [217] в умовах України як критерії сталості в першу чергу мають розглядатися показники енергетичної та екологічної ефективності впровадження біоенергетичних технологій.

Методика оцінки енергетичної та екологічної ефективності впровадження біоенергетичних технологій

Об'єктивне порівняння енергетичної ефективності впровадження різних технологій отримання енергії із біомаси повинно проводитись за методологією оцінки життєвого циклу (ОЖЦ) [218] та з розрахунком балансу між загальним споживанням первинної енергії під час виробництва продукту та сумарним виробництвом енергії як кінцевим продуктом. Загальне споживання первинної енергії системи продукту позначається як величина Сукупних Витрат Енергії – Cumulative Energy Demand (CED), [Дж_{перв.}]. Сукупні витрати енергії враховують всі статті споживання енергії на одержання матеріалів та енергоносіїв з первинної сировини, які використовуються в даному енергетичному процесі та при виготовленні відповідного технологічного обладнання (споживання первинної енергії в процесі сировинного циклу заготівлі біомаси та технологічному циклі виробництва енергії). При діленні CED на величину Сумарного Виробництва Енергії (кінцевого продукту) – Cumulative Energy Production (CEP), [Дж_{вир.}] отримується приведена питома величина сукупних витрат енергії ced [Дж_{перв.}/Дж_{вир.}].

Показник сукупних витрат енергії визначається як сума витрат первинної енергії, необхідної для виробництва енергоустановки (E_P) та для її утилізації після завершення терміну служби (E_D), віднесених до терміну її експлуатації (n) та витрат енергії для роботи установки протягом часу її функціонування (E_U):

$$CED = (E_P + E_D)/n + E_U. \quad (3.1)$$

Витрати первинної енергії на роботу установки протягом часу її функціонування поділяються на декілька складових:

$$E_U = E_A + F, \quad (3.2)$$

де E_A – енергія, необхідна для роботи допоміжного обладнання енергоустановки,

F – первинна енергія використаного палива протягом функціонування установки.

$$F = F_H + F_P + F_T, \quad (3.3)$$

де F_H – енергія палива, що споживається безпосередньо установкою;

F_P – первинна енергія, що витрачається на попередню підготовку палива;

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

Внесок невідновлювального (NR) та відновлювального (R) палива визначається наступним чином:

$$F = F_{NR} + F_R. \quad (3.4)$$

E_P, E_D, E_A, F_T розглядаються як складові 100% невідновлюваної енергії;

F_H – 100% відновлювальна енергія для установки на біомасі;

F_P – 100% невідновлювана енергія для виробництва тріски, дров, тюків соломи; проте, необхідно враховувати частку біомаси, що може використовуватися на сушіння при виготовленні гранул з біомаси.

На практиці існує декілька підходів до визначення і розрахунку CED в залежності від того, які складові енерговитрат враховуються в аналізі:

$$1. CED = (E_P + E_D)/n + E_A + F. \quad (3.5)$$

Використання CED у даному вигляді – найбільш загальний підхід до визначення сукупних витрат енергії. Цей показник може використовуватися для порівняння енергетичної ефективності будь-яких установок, не акцентуючи уваги на тому, працюють вони на відновлюваних чи на традиційних паливах.

$$2. CED_{NR} = (E_P + E_D)/n + E_A + F_{NR}. \quad (3.6)$$

Показник CED_{NR} враховує витрати тільки невідновлюваної енергії і палив, пов'язані з організацією роботи енергоустановки (F_{NR}). Тобто, наприклад, для котла на біомасі споживання біомаси цим котлом до F_{NR} не входить. CED_{NR} найбільш підходить для порівняння між собою установок, що працюють на біопаливах та викопних паливах, оскільки акцентує увагу на обсягах використання і заощадження традиційних енергоносіїв. Для порівняння двох енергосистем, які працюють на відновлюваних джерела енергії, рекомендується використання обох показників – CED та CED_{NR} .

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

$$ced = CED/CEP, \quad (3.7)$$

$$ced_{NR} = CED_{NR}/CEP. \quad (3.8)$$

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

$$EYC = ced^{-1}, \quad (3.9)$$

$$EYC_{NR} = ced_{NR}^{-1}. \quad (3.10)$$

Для будь-яких енергетичних систем, незалежно від виду палива, завжди виконується співвідношення: $EYC < 1$, $ced > 1$. При цьому найбільш оптимальними вважаються значення $EYC = 0,67$, $ced = 1,5$. Для енергосистем на невідновлюваній енергії та паливах завжди $ced_{NR} > 1$, $EYC_{NR} < 1$, тоді як для енергосистем на відновлюваних джерелах енергії ситуація протилежна: $ced_{NR} < 1$, $EYC_{NR} > 1$. **Згідно рекомендацій міжнародного енергетичного агентства, для досягнення сталого розвитку біоенергетики у майбутньому коефіцієнт перетворення енергії EYC_{NR} для енергоустановок на ВДЕ має складати як мінімум більше 2, рекомендоване значення – більше 5.** [219]

Потенціальні екологічні переваги, включаючи скорочення викидів парникових газів, що можуть бути отримані завдяки заміщенню викопних видів палива біомасою, являються однією з найпотужніших рушійних сил для розвитку біоенергетики.

Директива Європарламенту 2018/2001/ЕС щодо сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел містить методику для розрахунку балансу парникових газів палива отриманого з біомаси, що використовується для виробництва теплової та електричної енергії та охолодження. Згідно запропонованої методики викиди парникових газів розглядаються для таких одиночних процесів як: посадка, збір урожаю, попередня підготовка та транспортування біомаси. Також враховуються викиди, що пов'язані із прямими змінами у землекористуванні у випадку, коли такі зміни відбулися після 2008 р. До балансу не включаються викиди від спалювання біомаси як палива та будь-які викиди, що пов'язані з непрямими впливами. На відміну від рідких біопалив методика розрахунку викидів ПГ для біомаси та біогазу включає також фінальний етап їх перетворення в теплову та/чи електричну енергію.

Викиди парникових газів від виробництва твердої та газоподібної біомаси перед її перетворенням у теплову/електричну енергію розраховуються за наступною формулою:

$$E = e_{ec} + e_l + e_p + e_{td} + e_u - e_{sca} - e_{ccs} - e_{ccr}, \quad \text{г CO}_2 \text{ екв./T}_{\text{біом.}} \quad (3.11)$$

де E – загальні викиди від виробництва палива до його енергетичного перетворення;

e_{ec} – викиди від збору/посадки сировини для виробництва біопалива;

e_l – сумарні викиди від зміни вуглецевого запасу спричиненого змінами у землекористуванні;

e_p – викиди від переробки/обробки сировини;
 e_{td} – викиди від транспортування біомаси;
 e_u – викиди під час використання палива, що являють собою парникові гази під час спалювання біомаси;

e_{sca} – скорочення викидів від акумулювання вуглецю у ґрунті, що пов'язане з покращенням ведення сільського господарства;

e_{ccs} – скорочення викидів внаслідок уловлювання та геологічного зберігання вуглецю;

e_{scr} – скорочення викидів внаслідок уловлювання та заміщення вуглецю.

Викиди, що мають місце при виготовленні обладнання та техніки не враховуються до загального балансу.

Викиди парникових газів при використанні біопалива для виробництва теплової та електричної енергії, включаючи етап енергетичного перетворення, розраховується за наступними залежностями:

- для енергоустановок, що виробляють лише теплову енергію

$$ES_h = E / \eta_h \quad (3.12)$$

- для енергоустановок, що виробляють лише електроенергію

$$ES_{el} = E / \eta_{el} \quad (3.13)$$

де ES_h – загальні викиди парникових газів при виробництві теплової енергії як кінцевого продукту, г $CO_2_{екв.}/МДж_{вир.}$;

η_h – ефективність виробництва теплової енергії, що визначається як відношення теплової енергії, виробленої для забезпечення економічно доцільної потреби в тепловій енергії, до річного споживання палива;

ES_{el} – загальні викиди парникових газів при виробництві електричної енергії як кінцевого продукту, г $CO_2_{екв.}/МДж_{вир.}$;

η_{el} – ефективність виробництва електричної енергії, що визначається як відношення річного виробництва електроенергії до річного споживання палива.

Скорочення викидів парникових газів при виробництві теплової та електричної енергії із біопалива розраховуються наступним чином:

$$СКОРОЧЕННЯ = (ES_{F(h,el)} - ES_{h,el}) / ES_{F(h,el)}, \% \quad (3.14)$$

де $ES_{(h,el)}$ – загальні викиди парникових газів при виробництві теплової та електричної енергії при використанні біопалив;

$ES_{F(h,el)}$ – загальні викиди ПГ при використанні викопних палив для виробництва теплової та електричної енергії.

Вторинна біомаса та відходи лісового та сільського господарства, включаючи гілки та верхів'я дерев, солому, жом, лушпиння соняшника, качани, горіхову лушпину та відходи від переробки, включаючи сирий гліцерин, повинні розглядатись як такі, що мають нульовий баланс викидів парникових газів до моменту збору даних видів сировини.

З рекомендаціями, що містяться в Директиві Європарламенту 2018/2001/ЕС при виробництві електроенергії із біопалива викиди парникових газів мають порівнюватись з наступними показниками викидів від систем на викопних паливах $ES_{F(e)}$: 183 г $CO_2_{екв.}/МДж_{ел.ен.}$ для ЄС та 212 г $CO_2_{екв.}/МДж_{ел.ен.}$ для зовнішніх країн. При виробництві теплової енергії показник $ES_{F(h)}$ становить 80 г $CO_2_{екв.}/МДж_{тепл.ен.}$ Для біопалив, що використовуються для виробництва теплової енергії, коли може бути продемонстровано пряму фізичну заміну вугілля, для цілей розрахунку, показник $ES_{F(h)}$ повинен становити 124 г $CO_2_{екв.}/МДж_{тепл.ен.}$

Згідно наказу Національного агентства екологічних інвестицій України №75 від 12.05.2011 р., питомі викиди двооксиду вуглецю при виробництві електричної енергії тепловими електростанціями, які підключені до Об'єднаної енергетичної системи України, становлять 1,063 кг $CO_2_{екв.}/кВт\cdot год$ або 298 г $CO_2_{екв.}/МДж$. Аналогічний коефіцієнт при виробництві теплової енергії для умов України не знайдений в офіційних документах. В директиві вказано, що значення показнику ES_{Fh} на рівні 80 г $CO_2_{екв.}/МДж$ враховує те, що більшість теплової енергії до 2020 р. у ЄС вироблятиметься з природного газу, що є ідентичним також для України. Тому в дисертації значення викидів парникових газів при використанні біомаси для виробництва теплової енергії порівнюється з даною величиною.

Біоенергетична технологія може вважатися екологічно доцільною, якщо її впровадження призводить до зменшення викидів парникових газів у порівнянні із застосуванням викопного палива. Згідно нових вимог Директиви Європарламенту щодо сприяння використанню ВДЕ зниження викидів парникових газів при використанні біопалива для виробництва електроенергії, теплової енергії та охолодження повинно становити щонайменше 70% для установок, що починають функціонувати з 1 січня 2021 р. до 31 грудня 2025 р., і 80% для установок, що починають функціонувати з 1 січня 2026 р.

Енергетичний та екологічний аналіз використання ПП кукурудзи у тюках для виробництва теплової енергії.

Енергетичний та екологічний аналіз використання ПП кукурудзи виконано для трьохпрохідної системи на базі прес-підбирача великих прямокутних тюків: зернозбиральний комбайн + трактор з мульчувачем-валкоутворювачем + трактор з прес-підбирачем великих прямокутних тюків (Розділ 3.1, SC1), як найбільш прийнятної за техніко-економічними показниками. Збір ПП кукурудзи з поля повинен відбуватись відразу після збору основного урожаю, щоб не заважати основній діяльності по сівознам. Згідно типових сівознам господарств, збір ПП

АПК з полів може тривати не більше 14 днів. Далі ПП транспортується на основний склад (зберігається весь річний об'єм заготівлі), а потім (у передопалювальний та опалювальний сезон) – на склад котельні.

Згідно методики ОЖЦ проведено аналіз кожної стадії (одиночного процесу) використання ПП у якості палива. На **Рис. 3.13** представлено дані стадії та границі системи продукту (теплова енергія).

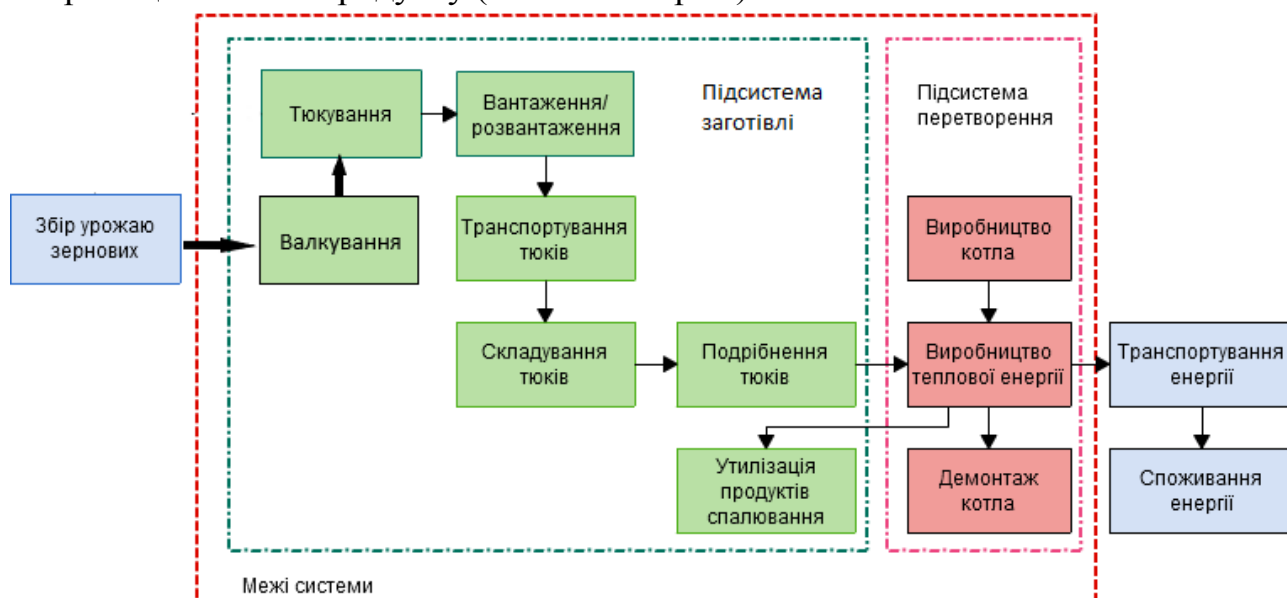


Рис. 3.13. Схема життєвого циклу використання ПП кукурудзи у тюках для виробництва теплової енергії

Сировинний цикл використання кукурудзиння у якості палива розпочинається з операції валкування, оскільки попередні операції відносяться до основного виду діяльності, а саме до збору основної продукції – кукурудзи на зерно. У **Табл. 3.5** наведено дані щодо виду та витрат палива, яке використовується під час виконання кожної операції, типу обладнання, техніки та інших показників, необхідних для оцінки споживання первинної енергії палива під час операцій із заготівлі/складування та транспортування ПП на енергетичний об'єкт.

Табл. 3.5. Аналіз сировинного циклу використання тюків кукурудзиння у якості палива

Операція	Обладнання для виконання операції	Паливо, що витрачається	Витрата палива	Інше
Валкування	Трактор з мульчувачем	Дизельне пальне	1,75 л/т	Трактор NH T7060 Мульчувач Hiniker 5620
Тюкування	Трактор з прес-підбирачем	дизельне пальне	1,6 л/т	Трактор Deutz-Fahr X 720 Прес-підбирач MF 2270 Вага тюка 575 кг, розміри 2,45x1,2x0,9
Збір тюків на полі	Трактор з причепом	дизельне пальне	1,09 л/т	Трактор NH T7060 Причеп Arcusin XP 54 T
Завантаження тюків на транспортний засіб	Телескопічний навантажувач	дизельне пальне	0,16 л/т	Телескопічний навантажувач MF9407
Транспортування до центрального складу	Спеціальний вантажний транспорт	дизельне пальне	38 л/100 км	Вантажівка МАЗ з напівпричепом вантажопідйомність 22 т, об'єм 100 м ³
Вантажні операції на центральному складі	Телескопічний навантажувач	дизельне пальне	0,39 л/т	Телескопічний навантажувач Claas Scorpion 7035
Складування на центральному складі	Під агроволокном	енергозатрати на виготовлення матеріалів	30 МДж/т	Зберігається річний запас палива
Транспортування до складу котельної	спеціальний вантажний транспорт	дизельне пальне	38 л/100 км	Вантажівка МАЗ з напівпричепом вантажопідйомність 22 т, об'єм 100 м ³
Вантажні операції на складі котельної	Телескопічний навантажувач	дизельне пальне	0,39 л/т	Телескопічний навантажувач Claas Scorpion 7035
Зберігання на складі котельної	Під металевим навісом	енергозатрати на виготовлення матеріалів	200 МДж/т	На складі котельної зберігається не весь запас палива, а лише тижневий запас
Подрібнення тюків	Соломорізка	Е/е на привід ріжучого механізму	15 кВт·год/т сировини	Соломорізка – подрібнювач ТАЙФУН-3000.

Споживання первинної енергії протягом сировинного циклу використання тюків кукурудзиння можна описати системою математичних співвідношень, кожне з яких відповідає за один з елементарних потоків або операцій життєвого циклу:

$E_{вал} = 1,25 \cdot V \cdot b_{вал} \cdot Q_n^p$ – споживання первинної енергії при валкуванні кукурудзиння на полі, ГДж/рік;

$E_{тюк} = 1,25 \cdot V \cdot b_{тюк} \cdot Q_n^p$ – споживання первинної енергії при тюкуванні, ГДж/рік;

$E_{зб} = 1,25 \cdot V \cdot b_{зб} \cdot Q_n^p$ – споживання первинної енергії під час збору тюків з поля, ГДж/рік;

$E_{ван1} = 1,25 \cdot V \cdot b_{ван1} \cdot Q_n^p$ – споживання первинної енергії при завантаженні тюків на транспортний засіб, ГДж/рік;

$E_{тр1} = V \cdot E_{т-км1} \cdot n_1$ – споживання первинної енергії при транспортуванні тюків на центральний склад, ГДж/рік;

$E_{збер1} = V \cdot e_{а.в.}$ – витрати первинної енергії на виробництво агроволокна для збереження тюків на центральному складі віднесені до терміну експлуатації агроволокна, ГДж/рік,

$E_{тр2} = V \cdot E_{т-км2} \cdot n_2$ – споживання первинної енергії при транспортуванні біомаси до споживача, ГДж/рік;

$E_{ван2} = 1,25 \cdot 2 \cdot V \cdot b_{ван2} \cdot Q_n^p$ – споживання первинної енергії при вантажних операціях на центральному складі та складі котельної;

$E_{збер2} = \frac{168 \cdot V \cdot e_{збер.нав.}}{10 \cdot \tau}$ – витрати первинної енергії при будівництві складу на котельній для зберігання тижневого запасу тюків віднесені до терміну експлуатації складу, ГДж/рік,

$E_{нод} = 3 \cdot e_{нод} \cdot V$ – витрати первинної енергії при подрібненні тюків перед подачею у котел, ГДж/рік,

де V – річне споживання палива котельною установкою, т/рік;

$b_{вал}$, $b_{тюк}$, $b_{зб}$, $b_{ван}$ – питомі витрати палива обладнанням, яке використовується для валкування, тюкування, збору та завантаження сировини, л/т;

Q_n^p – нижча теплотворна здатність дизельного пального, МДж/л (36,1 МДж/л);

n_1 – відстань транспортування тюків від місця їх заготівлі до центрального складу, км (відстань приймається на рівні 10 км);

n_2 – відстань перевезення тюків від центрального складу до споживача, км.

τ – час роботи енергетичної установки, год./рік;

$E_{т-км}$ – енергоємність транспортної роботи (розраховується методикою представленою в [220] МДж/т·км;

$e_{а.в.}$ – питомі витрати первинної енергії при виробництві агроволокна, МДж/т;

$e_{збер.}$ – питомі витрати первинної енергії при будівництві складу: енергоємність металічних та бетонних конструкцій, споживання пального та електроенергії при будівництві, МДж/т;

$e_{под}$ – питомі витрати електроенергії на подрібнення тюків, МДж/т.

Загалом, споживання первинної енергії викопного палива протягом сировинного циклу використання тюків кукурудзиння може бути розраховане за наступним рівнянням:

$$E_{сир} = V \cdot \sum E_i = V \cdot \left(1,25 \cdot b_{вал} \cdot Q_H^p + 1,25 \cdot b_{тюк} \cdot Q_H^p + 1,25 \cdot b_{зб} \cdot Q_H^p + 1,25 \cdot b_{ван1} \cdot Q_H^p + E_{ТКМ1} \cdot n_1 + e_{а.в.} + E_{ТКМ2} \cdot n_2 + 2,5 \cdot b_{ван2} \cdot Q_H^p + \frac{16,8 \cdot e_{збер}}{\tau} + 3 \cdot e_{под} \right), \quad \text{ГДж/рік} \quad (3.15)$$

Сукупні витрати первинної енергії у підсистемі перетворення визначаються як:

$$E_{пер.} = E_k / \kappa_n + E_{екс.} + E_{ел.}, \quad \text{ГДж/рік} \quad (3.16)$$

де E_k – затрати первинної енергії та стадії спорудження та демонтажу установки, ГДж; κ_n – розрахунковий період експлуатації обладнання, років (20 років); $E_{екс.}$ – витрати первинної енергії на ремонт та обслуговування котельного обладнання, ГДж/рік; $E_{ел.}$ – власне енергоспоживання, ГДж/рік.

$$E_k = E_{мат.} + E_{сп.} + E_{дем.},$$

де $E_{мат.}$; $E_{сп.}$; $E_{дем.}$ – затрати первинної енергії під час виготовлення матеріалів, спорудження котельної установки та під час її демонтажу, ГДж.

$$E_k = E_{мат.} + 0,2 \cdot E_{мат.} + 0,125 (1,2 \cdot E_{мат.}) = 1,35 \cdot E_{мат.} = 1,35 \cdot e_{мат.} \cdot M, \quad (3.17)$$

де $e_{мат.}$ – енергоємність матеріалу, з якого виготовлено котел (сталь), МДж/кг; M – маса котла, кг.

$$E_{екс.} = E_{рем.} + E_{обсл.}, \quad (3.18)$$

де $E_{рем.}$, $E_{обсл.}$ – затрати первинної енергії під час ремонтування котла та його обслуговування протягом терміну експлуатації (оператори котельної та працівники складу палива), ГДж/рік.

$$E_{рем.} = 0,0021 \cdot e_{мат.} \cdot M, \quad (3.19)$$

$$E_{обсл.} = e_{обсл.} \cdot N_{обсл.}, \quad (3.20)$$

де $e_{обсл.}$ – енергетичний еквівалент праці людини, МДж/люд·год;

$N_{обсл.}$ – сумарна кількість людино-годин обслуговування котельного обладнання, люд·год/рік.

$$E_{ел.} = e_{ел.} \cdot СЕР \quad (3.21)$$

де $e_{ел.}$ – питоме споживання електроенергії на власні потреби котельної установки (включаючи подачу палива в котел), кВт·год/ГДж. СЕР – виробництво теплової енергії котельною установкою, ГДж/рік.

З врахуванням залежностей (3.17-3.21) сукупні витрати первинної енергії у підсистемі перетворення ($E_{пер.}$) становлять:

$$E_{пер.} = 0,07 \cdot e_{мат.} \cdot M + e_{обсл.} \cdot N_{обсл.} + e_{ел.} \cdot СЕР. \quad (3.22)$$

Залежності (3.5 та 3.6) з врахуванням життєвого циклу виробництва теплової енергії матимуть вигляд:

$$CED = E_{\text{сир}} + E_{\text{пер}} + B \cdot Q_{\text{H}}^{\text{P}}, \quad \text{ГДж/рік} \quad (3.23)$$

$$CED_{\text{NR}} = E_{\text{сир}} + E_{\text{пер}}, \quad \text{ГДж/рік} \quad (3.24)$$

Проведемо оцінку енергетичної ефективності виробництва теплової енергії з тюкованого кукурудзиння на прикладі котла потужністю 500 кВт (Табл. 3.6). Паливом для котельної установки є кукурудзиння вологістю 25% з теплотворною здатністю 12 МДж/кг.

Табл. 3.6. Технічні характеристики котла на біомасі

Показники	Значення
Встановлена потужність	500 кВт
Час роботи	4272 год./рік
Номінальне навантаження	70%
ККД котла	84%
Витрата палива (кукурудзиння)	534 т/рік
Виробництво теплової енергії	5383 ГДж/рік
Втрати теплової енергії	5%
Теплова енергія на виході з енергетичної установки	5114 ГДж/рік

Сукупні витрати первинної енергії під час сировинного циклу використання кукурудзиння ($E_{\text{сир}}$) розраховуються за (3.15), сукупні витрати первинної енергії у підсистемі перетворення ($E_{\text{пер}}$) визначаються за формулою (3.22), де маса котла становить 4000 кг. В Табл. 3.7 та 3.8 наведені значення всіх складових витрат первинної енергії протягом життєвого циклу використання кукурудзиння у котлі потужністю 500 кВт, а також приведені значення показників енергетичної ефективності: коефіцієнту перетворення невідновлюваної енергії та питомих сукупних витрат невідновлюваної енергії.

Табл. 3.7. Витрати первинної енергії протягом життєвого циклу виробництва теплової енергії з подрібнених тюків кукурудзиння

Етап життєвого циклу	Витрати первинної енергії, ГДж/рік
1. Витрата палива	6408
2. Валкування ПП кукурудзи	43,4
3. Тюкування ПП кукурудзи	40,5
4. Збір тюків з поля	26,3
5. Завантаження тюків на транспортний засіб	3,9
6. Транспортування тюків на центральний склад (відстань 10 км)	27,5

Етап життєвого циклу	Витрати первинної енергії, ГДж/рік				
7. Вантажні операції на центральному складі та складі котельної	18,8				
8. Споживання електроенергії котельною установкою (власні потреби + подрібнювач тюків)	202,8				
9. Спорудження котельної установки (виготовлення обладнання, будівельно-монтажні роботи)	12,0				
10. Демонтаж, утилізація обладнання котельної установки	1,5				
11. Складування тюків з пожнивних решток (під агроволокном на полі та на складі при котельній під металевим навісом)	16,4				
12. Витрати енергії на обслуговування котла персоналом	8,9				
13. Витрати енергії на ремонтування котла	0,42				
14. Перевезення тюків на склад котельної до місця використання)	Відстань транспортування, км				
	0	10	50	100	150
	0,00	27,5	137,7	275,5	413,2
CED, ГДж/рік	6810	6838	6948	7086	7224
ced	1,33	1,34	1,36	1,39	1,41
EYC=1/ced	0,75	0,75	0,74	0,72	0,71
CE _{NR} , ГДж/рік	402	430	540	678	816
ced _{NR}	0,08	0,08	0,11	0,13	0,16
EYC _{NR} =1/ced _{NR}	12,71	11,89	9,47	7,54	5,36

З даних **Табл. 3.8** видно, що найбільші витрати первинної енергії викопного палива відбуваються на стадії транспортування ПП кукурудзи у вигляді тюків (31%), їх подрібненням перед подачею у котельну установку (16%) та під час виробництва теплової енергії (22%). Заготівля ПП кукурудзи в полі також становить значну складову витрат первинної енергії палива (20%). Витрати енергії на виготовлення, демонтаж, обслуговування та ремонт котельної установки становлять 4% від усіх затрат первинної енергії викопного палива (приведено дані для варіанту перевезення тюків до споживача на відстань 50 км).

Розрахунок викидів парникових газів та їх скорочення при виробництві теплової енергії із ПП кукурудзи виконано з використанням методики, описаної у Розділі 3.1.

Табл. 3.8. Споживання первинної енергії при роботі котла потужністю 500 кВт

Складові енергетичного балансу	ГДж/рік
Заготівля ПП кукурудзи (валкування, тюкування та збір) ($E_{ЗАГ}$)	110,2
Вантажні операції на полі та складах ($E_{ВАН}$)	22,7
Транспортування тюків (до центрального складу та до складу котельної) ($E_{ТР}$)	165,3
Зберігання тюків ($E_{СК}$)	16,4
Подрібнення тюків ($E_{ПОД}$)	86,5
Виробництво теплової енергії ($E_{ВИР}$)	116,3
Виготовлення, демонтаж, обслуговування, ремонтування котла ($E_{КОТ}$)	22,8
CE_{NR} ($E_{ЗАГ}+E_{ВАН}+E_{ТР}+E_{СК}+E_{ВИР}+ E_{ПОД} +E_{КОТ}$)	540,1
Споживання біопалива котельною установкою (F_H)	6408
CE_{D} ($CE_{NR}+F_H$)	6948
Виробництво теплової енергії (CEP)	5114
$E_{УС_{NR}} = CEP/CE_{NR}$	9,47
$E_{УС} = CEP/CE_{D}$	0,74

Розглядаються викиди парникових газів на кожному етапі життєвого циклу використання ПП кукурудзи для виробництва теплової енергії: валкування, тюкування, збору і завантаження, вантаження/розвантаження на складах, транспортування, подрібнення та подачі до котельної установки. Залежність (3.11) у розрахунковому варіанті має наступний вигляд:

$$E = K_{в.д.} \cdot Q_H^p \cdot (b_{вал} + b_{тюк} + b_{зб} + b_{зав1} + b_{тр1} + b_{зав2} + b_{тр2}) + K_{в.ел.} \cdot (b_{под} + b_{кот}), \quad \text{г CO}_2 \text{ екв./т (3.24)}$$

де, $b_{вал}$; $b_{тюк}$; $b_{зб}$; $b_{тр1}$; $b_{зав1}$; $b_{тр2}$; $b_{зав2}$ – витрати дизельного пального обладнанням, що здійснює валкування, тюкування, збір, перевезення та завантаження пожнивних решток, л/т;

Q_H^p – нижча теплота згорання дизельного пального, МДж/л;

$K_{в.д.}$ – коефіцієнт викидів парникових газів при використанні дизельного пального 74,1 т/ГДж.

$K_{в.ел.}$ – питомі викиди двооксиду вуглецю при використанні електричної енергії споживачами, які віднесені до 2 класу споживачів 1,227 кг CO₂ екв./кВт·год.

$b_{под}$, $b_{кот}$ – споживання електричної енергії подрібнювачем тюків та котельною установкою, кВт·год/т.

Результати розрахунку скорочення викидів парникових газів при виробництві теплової енергії з використанням тюкованих ПП кукурудзи в котлі потужністю 500 кВт наведені в **Табл. 3.9.**

Табл. 3.9. Баланс викидів парникових газів при спалюванні ПП кукурудзи в котлі потужністю 500 кВт

Стадія життєвого циклу	Викиди ПГ, т CO ₂ екв./рік			
	0 км	50 км	100 км	150 км
Валкування пожнивних решток	2,50			
Тюкування пожнивних решток	2,35			
Збір та завантаження на транспортний засіб	1,79			
Вантажні операції та центральному складі та складі котельної	1,12			
Перевезення тюків до центрального складу	1,94			
Подрібнення	9,83			
Завантаження у котельну установку	13,21			
Транспортування тюків на склад котельної установки	0 км	50 км	100 км	150 км
	0,00	9,69	19,38	29,07
Викиди парникових газів протягом життєвого циклу використання тюків, $ES_h, \frac{rCO_2 \text{ екв}}{\text{МДж}}$	7,24	9,38	11,52	13,67
Скорочення викидів парникових газів при виробництві теплової енергії з тюкованих пожнивних решток, %	90,95	88,27	85,60	82,92

Аналіз отриманих результатів показує, що скорочення викидів парникових газів при використанні ПП кукурудзи є досить високим – 82,92-90,95% в залежності від відстані транспортування біомаси (в розглянутому прикладі – 0-150 км). Директива Європарламенту щодо сприяння використанню ВДЕ вимагає, щоб зниження викидів парникових газів становило не менше 70% при виробництві теплової енергії із біопалива. Таким чином, по даному параметру проект по виробництву теплової енергії із застосуванням ПП кукурудзи у вигляді подрібнених тюків в котлі 500 кВт задовольняє встановленим критеріям сталого розвитку. Скорочення викидів парникових газів на 80% обмежується відстанню транспортування тюків до споживача у 200 км, на 70% у 400 км.

Енергетичний та екологічний аналіз використання гранул з ПП кукурудзи для виробництва теплової енергії.

Життєвий цикл використання ПП кукурудзи у вигляді гранул (у порівнянні з використанням у тюках) містить додатковий етап гранулювання, що виконується після валкування, тюкування, збору ПП з поля, завантаження на транспортний засіб та перевезення до місця гранулювання (Рис. 3.14). Готові гранули перевозяться з місця їх виробництва до споживача. Вважається, що місячний об'єм гранул зберігається на складі у споживача у спеціальному бункері. Котел обладнаний системою для автоматичної подачі гранул.

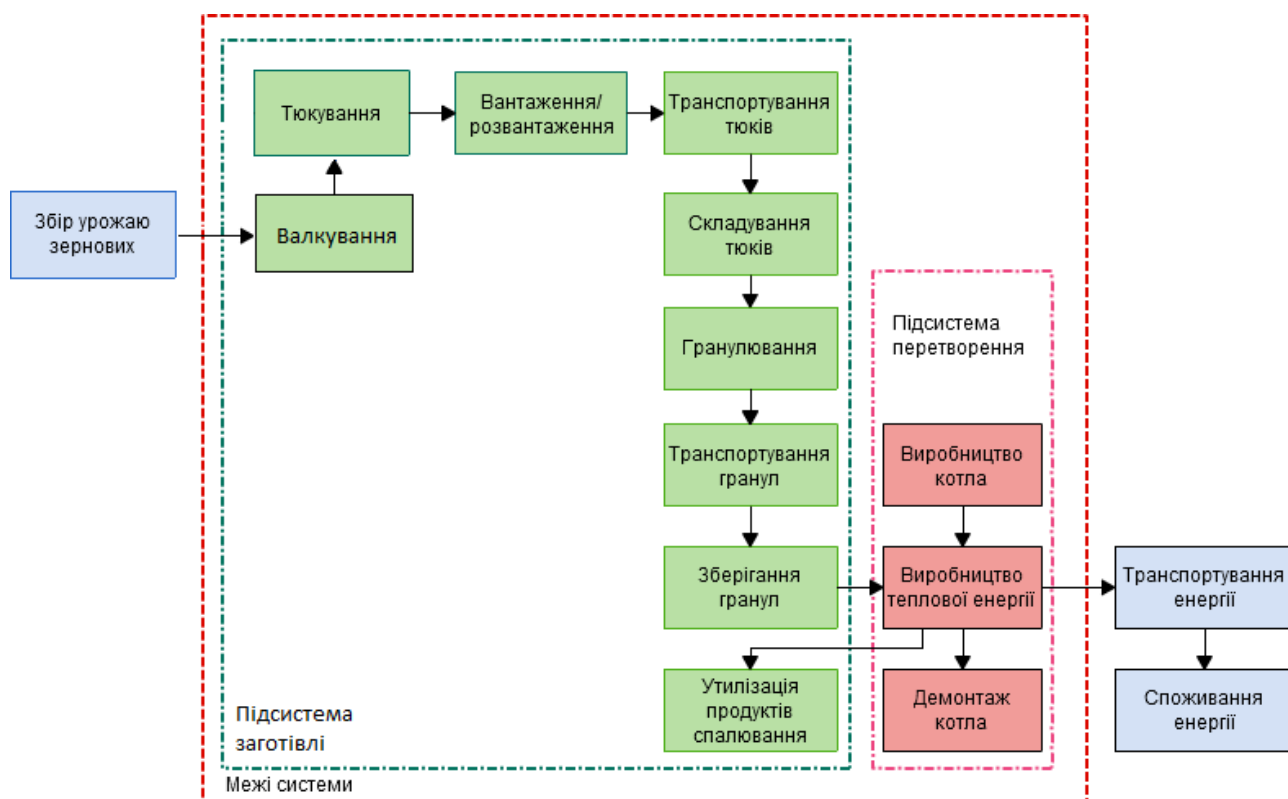


Рис. 3.14. Схема життєвого циклу використання гранул з ПП кукурудзи для виробництва теплової енергії

Розрахунок енергетичної ефективності використання ПП кукурудзи у вигляді гранул проведено на прикладі котла потужністю 500 кВт (Табл. 3.10).

Табл. 3.10. Технічні характеристики котла на гранулах

Показники	Значення
Встановлена потужність	500 кВт
Період роботи	4272 год/рік
Номінальне навантаження	70%
ККД котла	87%
Витрата палива (гранули $Q_H^p = 15$ МДж/кг)	412,5 т/рік
Виробництво теплової енергії	5383 ГДж/рік
Втрати теплової енергії	5%
Теплова енергія, відпущена споживачу (енергія «на виході»)	5114 ГДж/рік

З врахуванням того, що для отримання необхідної річної кількості гранул необхідно зтюкувати у 1,2 рази більше ПП кукурудзи (з огляду на різницю у вологості: гранули мають вологість 10%, природна вологість тюків приймається

на рівні 25%) та додаткового етапу гранулювання, залежність для сукупних витрати первинної енергії під час сировинного циклу матиме вигляд:

$$E_{\text{сир}} = V_{\text{гр}} \cdot (1,5 \cdot b_{\text{вал}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}} + 1,5 \cdot b_{\text{тюк}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}} + 1,5 \cdot b_{\text{зб}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}} + 1,5 \cdot b_{\text{ван1}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}} + E_{\text{ткм1}} \cdot n_1 + 1,2 \cdot e_{\text{а.в.}} + 3 \cdot b_{\text{ван2}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}} + 3 \cdot e_{\text{гр}} + E_{\text{ткм2}} \cdot n_2 + \frac{72 \cdot e_{\text{збер}}}{\tau}), \quad (3.25)$$

де, $V_{\text{гр}}$ – річне споживання гранул котельною установкою, т/рік;

$b_{\text{вал}}$, $b_{\text{тюк}}$, $b_{\text{зб}}$, $b_{\text{ван1}}$, $b_{\text{ван2}}$ – питомі витрати палива обладнанням, яке використовується для валкування, тюкування, збору, завантаження тюків на транспортний засіб та під час вантажних операцій на місці виробництва гранул, л/т;

$Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ – нижча теплотворна здатність дизельного пального, МДж/л (36,1 МДж/л);

n_1 – відстань транспортування тюків від місця їх збору до місця гранулювання (приймається на рівні 10 км), км;

n_2 – відстань транспортування гранул до споживача, км

$E_{\text{т-км}}$ – енергоємність транспортної роботи, 1 – перевезення тюків до місця гранулювання, 2 – гранул до споживача;

$e_{\text{гр}}$ – питомі витрати первинної невідновлюваної енергії на гранулювання (витрати електроенергії в технологічному обладнанні під час операцій з подрібнення, гранулювання, охолодження та транспортування гранул), МДж_{пер}/Т_{гр};

$e_{\text{а.в.}}$ – питомі витрати первинної енергії при зберіганні тюків з ПП кукурудзи до моменту їх гранулювання (зберігання відбувається під агроволокном), МДж/т.

$e_{\text{зб}}$ – питомі витрати первинної енергії при будівництві бункеру для гранул: енергоємність металічних та бетонних конструкцій, споживання пального та електроенергії при будівництві (зберігання місячного запасу гранул, термін експлуатації споруди 10 років), МДж/т.

В **Табл. 3.11** наведені значення всіх складових витрат первинної енергії протягом життєвого циклу використання ПП у вигляді гранул та показники енергетичної ефективності виробництва теплової енергії.

Табл. 3.11. Витрати первинної енергії протягом життєвого циклу виробництва теплової енергії з гранул

Етап життєвого циклу	Витрати первинної енергії, ГДж/рік				
1. Споживання гранул	6333				
2. Валкування	40,25				
3. Тюкування	36,64				
4. Збір тюків з поля	24,4				
5. Завантаження на транспортний засіб	3,6				
6. Перевезення на місце виробництва гранул	24,5				
7. Вантажні операції з тюками на місці виробництва гранул	17,4				
8. Гранулювання (електроенергія)	490,0				
9. Гранулювання (сушка біомасою)	754,82				
10. Зберігання тюків та гранул	16,2				
11. Виробництво теплової енергії (електроенергія на власні потреби енергетичної установки, включаючи подачу гранул в котел)	116,3				
12. Виготовлення котельної установки	12,9				
13. Утилізація котельної установки	1,6				
14. Затрати праці (обслуговування котла+гранулювання), ГДж/рік	5,9				
15. Ремонтнування котельної установки	0,45				
16. Транспортуванні гранул до місця використання	0 км	10 км	50 км	100 км	150 км
	0	21,14	42,2	211,40	317,10
CED, ГДж/рік	7732	7753	7838	7943	8049
ced	1,51	1,52	1,53	1,55	1,57
EYS=1/ced	0,66	0,66	0,65	0,64	0,64
CE _{NR} , ГДж/рік	790	811	896	1002	1107
ced _{NR} :	0,16	0,16	0,18	0,20	0,22
EYS _{NR} =1/ced _{NR}	6,47	6,30	5,71	5,11	4,62

Як видно з даних в **Табл. 3.11**, проект по впровадженню котельної установки на гранулах з ПП кукурудзи характеризується високими значеннями коефіцієнту перетворення енергії та відповідає рекомендованим значенням критеріїв сталого розвитку в радіусі транспортування гранул до **110 км**. При неперевищенні даної відстані приведені питомі сукупні витрати невідновлюваної енергії і коефіцієнт виходу енергії відповідають рекомендованим діапазонам: $ced_{NR} < 0,2$, $EYS_{NR} > 5$.

Показники енергетичної ефективності при використанні гранул із ПП є набагато нижчими у порівнянні з використанням тюків для виробництва теплової

енергії (Табл. 3.7). Зниження показників пояснюється великими витратами первинної енергії на гранулювання біомаси – 55% всіх витрат первинної енергії.

Проте, як видно з залежності представленої на Рис. 3.15, коефіцієнт перетворення енергії $E_{C_{NR}}$ вище для перевезення у вигляді тюків, ніж у вигляді гранул, до відстані 500 км. При необхідності транспортування поживних решток на відстань більше ніж 500 км, гранули стають трохи вигіднішими з точки зору енергетичної ефективності їх використання для виробництва теплової енергії. При транспортуванні тюків показники енергетичної ефективності перевищують рекомендовані значення ($E_{C_{NR}}=5$) при відстанях транспортування до 200 км. При транспортуванні гранул показники енергетичної ефективності перевищують рекомендовані значення ($E_{C_{NR}}=5$) при відстанях транспортування до 100 км.

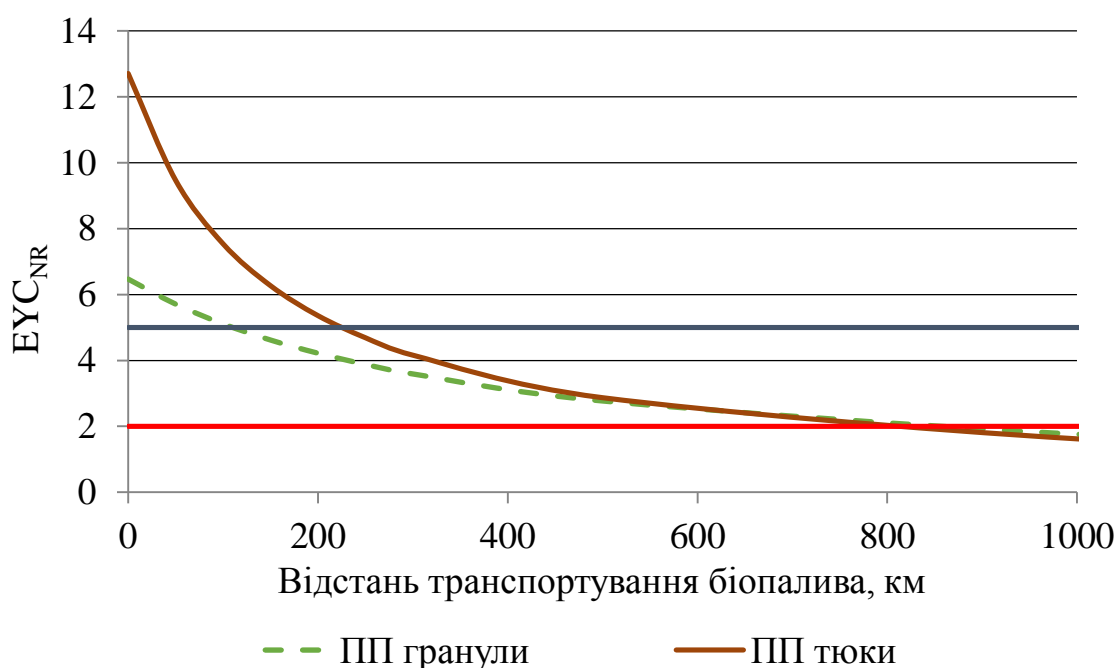


Рис. 3.15. Залежність коефіцієнту перетворення енергії $E_{C_{NR}}$ від відстані перевезення тюків та гранул з поживних решток кукурудзи.

Життєвий цикл виробництва теплової енергії з ПП кукурудзи у вигляді гранул включає додатковий етап гранулювання, тому залежність, що характеризує питомі викиди парникових газів, матиме наступний вигляд:

$$E = K_{в.д.} \cdot Q_H^p \cdot (b_{вал} + b_{тюк} + b_{зб} + b_{тр1} + b_{ван} + b_{тр2}) + K_{в.ел.} \cdot (b_{кот} + b_{гр}),$$

$$\Gamma \text{ CO}_2 \text{ екв.} / T_{біом} \quad (3.26)$$

де, $b_{гр}$ – питомі витрати електроенергії на гранулювання, кВт·год/ $T_{гр}$.

Баланс викидів парникових газів при спалюванні гранул з ПП кукурудзи в котлі потужністю 500 кВт представлено в Табл. 3.12.

Табл. 3.12. Баланс викидів парникових газів при спалюванні гранул з ПП кукурудзи в котлі потужністю 500 кВт

Стадія життєвого циклу	Викиди ПГ, т CO ₂ екв./рік			
	0 км	50 км	100 км	150 км
Валкування пожнивних решток	2,32			
Тюкування пожнивних решток	2,12			
Збір та завантаження на транспортний засіб	1,65			
Перевезення тюків до місця гранулювання	1,70			
Вантажні операції на місці виробництва гранул	0,78			
Гранулювання	55,67			
Завантаження у котельну установку	13,21			
Транспортування гранул до споживача	0 км	50 км	100 км	150 км
	0,00	7,43	14,86	22,30
Викиди парникових газів протягом життєвого циклу використання гранул з ПП кукурудзи, $ES_h, \frac{r_{CO_2-екв}}{МДж}$	16,54	18,13	19,71	21,30
Скорочення викидів парникових газів при виробництві теплової енергії з ПП кукурудзи у вигляді гранул, %	79,32	77,34	75,36	73,37

Скорочення викидів парникових газів при використанні ПП кукурудзи у вигляді гранул є дещо меншим у порівнянні з використанням тюків, що пояснюється додатковими викидами на етапі гранулювання. Проте, їх значення цілком задовольняє вимогам сталості, що розглядаються в даній роботі.

Енергетичний та екологічний аналіз використання ПП кукурудзи у брикетах для виробництва теплової енергії.

Аналогічно до випадку виробництва гранул з пожнивних решток, життєвий цикл їх використання у вигляді брикетів (у порівнянні з використанням у тюках) містить додатковий етап брикетування, що виконується після валкування, тюкування, збору ПП з поля, завантаження на транспортний засіб та перевезення до місця брикетування. Готові брикети перевозяться з місця їх виробництва до споживача. Вважається, що місячний об'єм брикетів зберігається на складі у споживача. Склад заповнюється вручну з вантажного автомобіля. Далі брикети подаються безпосередньо у котел (вручну).

Розрахунок енергетичної ефективності виробництва та використання пожнивних решток у вигляді брикетів проведено на прикладі котла потужністю 500 кВт (Табл. 3.13).

Табл. 3.13. Технічні характеристики котла на брикетах з ПП кукурудзи.

Показники	Значення
Встановлена потужність	500 кВт
Період роботи	4272 год/рік
Номінальне навантаження	70%
ККД котла	85%
Витрата палива (брикети $Q_H^p = 15$ МДж/кг)	422,2 т/рік
Виробництво теплової енергії	5383 ГДж/рік
Втрати теплової енергії	5%
Теплова енергія, відпущена споживачу (енергія «на виході»)	5114 ГДж/рік

З врахуванням того, що для отримання необхідної річної кількості брикетів необхідно зтюкувати у 1,2 рази більше ПП кукурудзи (з огляду на різницю у вологості: брикети мають вологість 10%, природна вологість тюків приймається на рівні 25%) та додаткового етапу брикетування, залежність для сукупних витрати первинної енергії під час сировинного циклу матиме вигляд:

$$E_{\text{сир}} = V_{\text{бр}} \cdot (1,5 \cdot b_{\text{вал}} \cdot Q_H^p + 1,5 \cdot b_{\text{тюк}} \cdot Q_H^p + 1,5 \cdot b_{\text{зб}} \cdot Q_H^p + 1,5 \cdot b_{\text{ван1}} \cdot Q_H^p + E_{\text{ткм1}} \cdot n_1 + 1,2 \cdot e_{\text{а.в.}} + 3 \cdot b_{\text{ван2}} \cdot Q_H^p + 3 \cdot e_{\text{гр}} + E_{\text{ткм2}} \cdot n_2 + \frac{72 \cdot e_{\text{збер}}}{\tau}), \quad (3.27)$$

де, $V_{\text{бр}}$ – річне споживання брикетів котельною установкою, т/рік;

$b_{\text{вал}}$, $b_{\text{тюк}}$, $b_{\text{зб}}$, $b_{\text{ван1}}$, $b_{\text{ван2}}$ – питомі витрати палива обладнанням, яке використовується для валкування, тюкування, збору, завантаження тюків на транспортний засіб та під час вантажних операцій на місці виробництва брикетів, л/т;

Q_H^p – нижча теплотворна здатність дизельного пального, МДж/л (36,1 МДж/л);

n_1 – відстань транспортування тюків від місця їх збору до місця брикетування (приймається на рівні 10 км), км;

n_2 – відстань транспортування брикетів до споживача, км

$E_{\text{ткм}}$ – енергоємність транспортної роботи, 1 – перевезення тюків до місця брикетування, 2 – брикетів до споживача;

$e_{\text{гр}}$ – питомі витрати первинної невідновлюваної енергії на брикетування (витрати електроенергії в технологічному обладнанні під час операцій з подрібнення, брикетування, охолодження та транспортування брикетів), МДж_{пер}/Т_{гр};

$e_{\text{а.в.}}$ – питомі витрати первинної енергії при зберіганні тюків з ПП кукурудзи до моменту їх брикетування (зберігання відбувається під агроволокном), МДж/т.

e_{36} – питомі витрати первинної енергії при будівництві складу для брикетів: енергоємність металічних та бетонних конструкцій, споживання пального та електроенергії при будівництві (зберігання місячного запасу брикетів, термін експлуатації споруди 10 років), МДж/т.

В Табл. 3.14 наведені значення всіх складових витрат первинної енергії протягом життєвого циклу використання ПП кукурудзи у вигляді брикетів та показники енергетичної ефективності виробництва теплової енергії.

Табл. 3.14. Витрати первинної енергії протягом життєвого циклу виробництва теплової енергії з брикетів вироблених з ПП кукурудзи.

Етап життєвого циклу	Витрати первинної енергії, ГДж/рік				
	1. Споживання палива	6333			
2. Валкування	41,2				
3. Тюкування	38,41				
4. Збір тюків з поля	24,90				
5. Завантаження на транспортний засіб	3,7				
6. Перевезення на місце виробництва брикетів	24,3				
7. Вантажні операції з тюками на місці виробництва брикетів	17,8				
8. Брикетування (електроенергія)	455,9				
9. Брикетування (сушка біомасою)	772,58				
10. Зберігання тюків та брикетів	16,6				
8. Виробництво теплової енергії (електроенергія на власні потреби енергетичної установки)	76,8				
9. Виготовлення котельної установки	9,0				
10. Утилізація котельної установки	1,1				
11. Затрати праці (обслуговування котла+брикетування), ГДж/рік	5,9				
12. Ремонтування котельної установки	0,32				
13. Транспортування брикетів до місця використання	0 км	10 км	50 км	100 км	150 км
	0,0	21,14	105,70	211,40	317,1
СЕД, ГДж/рік	7821	7842	7927	8138	8244
Ced	1,53	1,53	1,55	1,57	1,59
ЕУС=1/ced	0,65	0,65	0,65	0,64	0,63
СЕД _{NR} , ГДж/рік	716	737	822	927	1033
ced _{NR} :	0,14	0,14	0,16	0,18	0,20
ЕУС _{NR} =1/ced _{NR}	7,14	6,94	6,22	5,51	4,95

Як видно з отриманих значень, проект по впровадженню котельної

установки на брикетах з ПП кукурудзи характеризується високими значеннями коефіцієнту перетворення енергії та відповідає рекомендованим значенням критеріїв сталого розвитку в розглянутому радіусі транспортування брикетів до установки – 150 км.

Варто зазначити, що у порівнянні з використанням ПП кукурудзи у тюках (Табл. 3.7) енергетичні показники є нижчими. Зниження показників пояснюється великими витратами первинної енергії на брикетування – 55% всіх витрат первинної енергії (при транспортуванні брикетів на відстань 50 км). Проте, у порівнянні з виробництвом гранул (Табл. 3.11) показники енергетичної ефективності є кращими, що пов'язано з меншими первинними витратами енергії на брикетування, в порівнянні з гранулюванням, та меншим споживанням енергії на власні потреби котельної установки (паливо завантажується вручну).

Як видно з залежності, представлені на Рис. 3.16, коефіцієнт перетворення енергії EUC_{NR} вище для перевезення у вигляді тюків, ніж у вигляді гранул і брикетів, до відстані 500 км. При необхідності транспортування поживних решток на відстань більше ніж 500 км, гранули та брикети стають вигіднішими з точки зору енергетичної ефективності їх використання для виробництва теплової енергії. В порівнянні з гранулами, брикети мають кращі показники енергетичної ефективності, як в межах допустимих ($EUC_{NR}=2$), так і рекомендованих значень ($EUC_{NR}=5$).

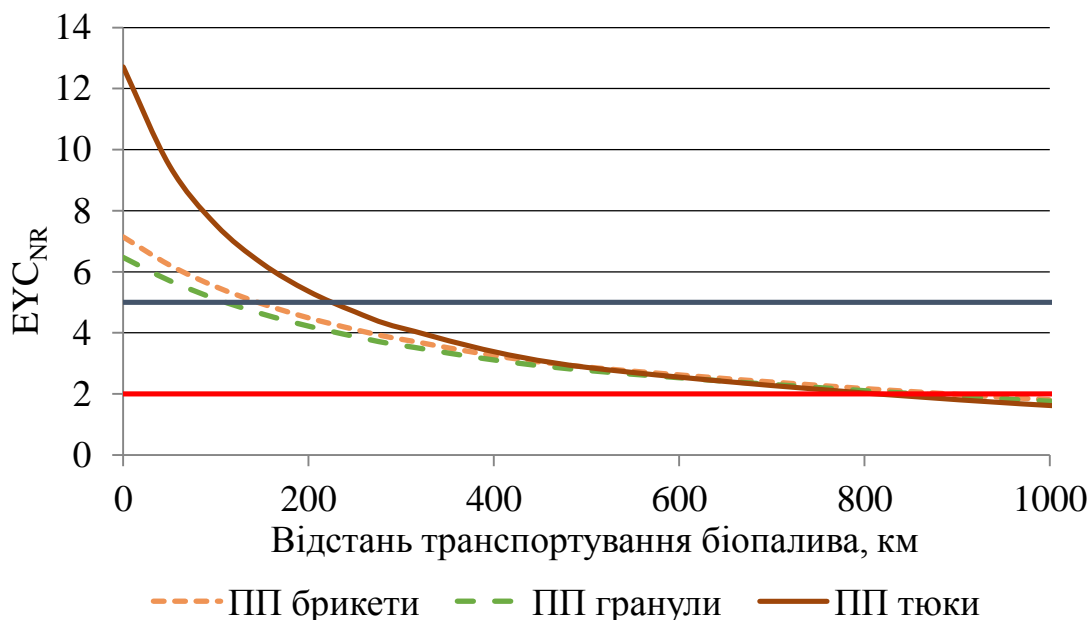


Рис. 3.16. Залежність коефіцієнту перетворення енергії EUC_{NR} від відстані перевезення тюків, гранул та брикетів з поживних решток кукурудзи.

Життєвий цикл виробництва теплової енергії з ПП кукурудзи у вигляді брикетів включає додатковий етап брикетування, тому залежність, що характеризує питомі викиди парникових газів, матиме наступний вигляд:

$$E = K_{в.д.} \cdot Q_H^p \cdot (b_{вал} + b_{тук} + b_{зб} + b_{тр1} + b_{ван} + b_{тр2}) + K_{в.ел.} \cdot (b_{кот} + b_{бр}),$$

Г CO₂ екв./Тбіом (3.28)

де, $b_{бр}$ – питомі витрати електроенергії на брикетування, кВт·год/т.

Результати розрахунку скорочення викидів парникових газів при виробництві теплової енергії з брикетів ПП кукурудзи в котлі потужністю 500 кВт наведені в **Табл. 3.15**.

Табл. 3.15. Баланс викидів парникових газів при спалюванні брикетів ПП кукурудзи в котлі потужністю 500 кВт.

Стадія життєвого циклу	Викиди ПГ, т CO ₂ екв./рік			
Валкування пожнивних решток	2,37			
Тюкування пожнивних решток	2,22			
Збір та завантаження на транспортний засіб	1,70			
Перевезення туків до місця брикетування	1,77			
Вантажні операції на місці виробництва брикетів	1,06			
Брикетування	51,72			
Робота котельної установки	8,71			
Транспортування брикетів до споживача	0 км	50 км	100 км	150 км
	0,00	7,43	14,86	22,30
Викиди парникових газів протягом життєвого циклу використання брикетів, $ES_H, \frac{гCO_2-екв}{МДж}$	15,20	16,83	18,45	20,07
Скорочення викидів парникових газів при виробництві теплової енергії ПП кукурудзи у вигляді брикетів, %	81,00	78,97	76,94	74,91

Скорочення викидів парникових газів при використанні ПП кукурудзи у вигляді брикетів є досить високим – 75-81% в залежності від відстані транспортування біомаси (в розглянутому прикладі – 0-150 км). Нова директива Європарламенту 2018/2001/ЕС щодо сприяння використанню ВДЕ вимагає, щоб зниження викидів парникових газів при використанні біопалив становило щонайменше 70% при виробництві електроенергії, опаленні та охолодженні в установках, що починають функціонувати з 1 січня 2021 р. до 31 грудня 2025 р., і 80% на установках, що починають функціонувати з 1 січня 2026 р. Таким чином, по даному параметру проект по виробництву теплової енергії із застосуванням пожнивних решток у брикетах у котлі 500 кВт задовольняє встановленим критеріям сталого розвитку.

Скорочення викидів парникових газів при використанні ПП кукурудзи у вигляді брикетів є дещо меншим у порівнянні з використанням тюків, та вищим ніж в випадку виробництва та використання гранул.

На **Рис. 3.17** наведено порівняння питомих викидів парникових газів при виробництві теплової енергії з ПП кукурудзи у вигляді великих тюків, гранул та брикетів. Видно, що на етапі перевезення гранульованої та брикетованої біомаси відбуваються дещо нижчі викиди парникових газів у порівнянні з перевезенням тюків. Проте додатковий етап гранулювання та брикетування, під час якого споживається електрична енергія, призводить до значного підвищення питомих викидів парникових газів протягом життєвого циклу використання ПП кукурудзи для виробництва енергії.

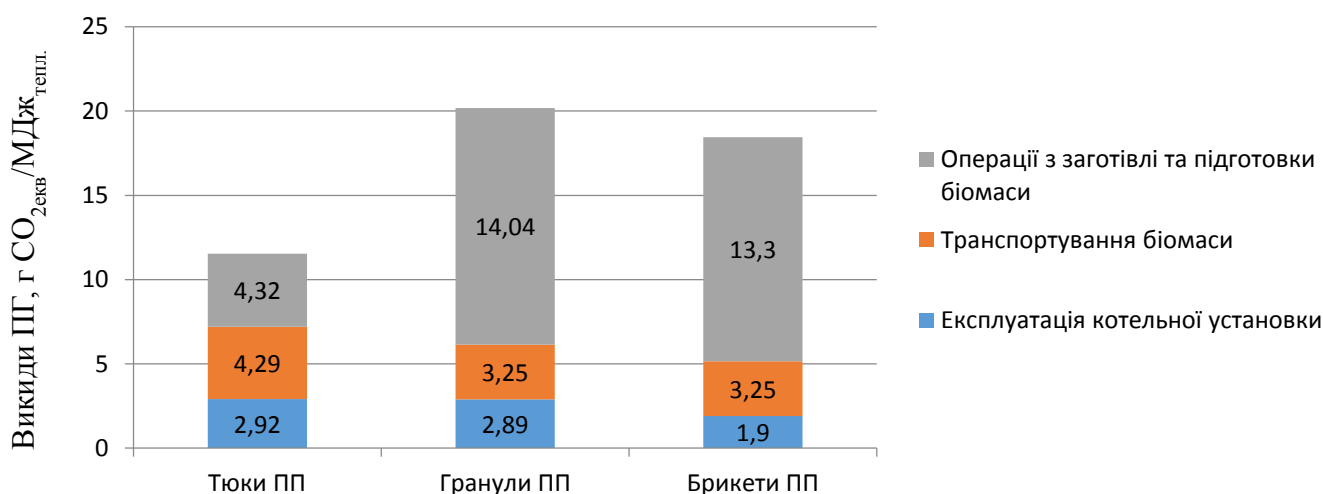


Рис. 3.17. Питомі викиди парникових газів протягом життєвого циклу використання поживних решток для виробництва теплової енергії.

3.3. Застосування електрогенеруючих потужностей на біомасі, біогазі і біометані для балансування енергетичної системи України

Застосування електрогенеруючих потужностей на біомасі для балансування енергетичної системи України

Станом на січень 2020 р. встановлена потужність об'єктів ВДЕ, що працюють на енергомережу, становила 6,8 ГВт, з яких 6,5 ГВт – СЕС та ВЕС (92%) [221, 222]. Це вже перевищує критичну межу встановленої потужності СЕС та ВЕС, що, за даними Укренерго, безпечна для енергосистеми, і не потребує будівництва додаткових потужностей балансування [223, 224]. За даними Укренерго, 500 МВт_е нових балансуєчих потужностей на природному газі мають бути побудовані вже у 2020 р для забезпечення надійної роботи енергосистеми в умовах зростаючої частки ВДЕ [225].

Балансування (добове) існуючих потужностей ВДЕ через брак балансуєчих потужностей в енергосистемі, здійснюється здебільшого

вугільними електростанціями. Ці електростанції не пристосовані до роботи на змінних навантаженнях (за періоди хвилини-години). Це спричиняє т.з. «зелено-вугільний парадокс»: чим більше виробляється енергії з ВДЕ, тим більше використовується вугілля для балансування. Це вже сьогодні покладає певні обмеження на впровадження відновлюваної енергетики в Україні. Тому питання балансування електрогенеруючих потужностей за рахунок схемного вирішення біоенергетичних систем є актуальним.

Проаналізовано можливості застосування електрогенеруючих потужностей на біомасі, біогазі і біометані для балансування енергетичної системи України. Близько 180 МВт_е потужностей на біомасі та біогазі вже працюють в енергосистемі України (квітень 2020 р). До 2035 р. ця цифра може зрости до 1,7 ГВт_е. Частково ця потужність може бути задіяна для балансування енергосистеми, відповідно зменшуючи потребу у будівництві нових балансуєчих газових блоків та неефективне спалювання вугілля в режимах набору-спаду потужності на вугільних електростанціях.

Одне з можливих рішень щодо стимулювання роботи ТЕЦ/ТЕС на біомасі та біогазі на ринку балансуєчих потужностей може бути так званий стимулюєчий тариф на балансуєчу електрику. Цей механізм стимулювання дещо схожий із нічним тарифом на електрику – в окремі години доби (ранковий та вечірній піки) для ТЕЦ/ТЕС встановлюється підвищений тариф на «балансиєчу» електрику, а в інші години, коли потреба у добовому балансуванні знижена, – звичайний тариф на «базову» електрику.

Такий підхід має забезпечувати рівноправність економічних показників базового та балансуєчого режимів роботи ТЕЦ на біомасі. Тобто, додаткове стимулювання роботи ТЕЦ у балансуєчому режимі має покривати всі додаткові витрати у порівнянні із альтернативою – режимом роботи ТЕЦ у базовому навантаженні, і не створювати додатковий прибуток. Таким чином, для інвестора існуватиме дві рівноправні альтернативи, і він зможе обирати між ними як рівними.

Для ефективної роботи на ринку пікових електричних навантажень існуюча ТЕЦ на біомасі повинна бути дооснащена додатковим котлом для можливості відпуску незмінної кількості теплової енергії в години пікового виробництва електричної енергії. Як одне з можливих рішень щодо стимулювання роботи ТЕЦ/ТЕС на біомасі та біогазі на ринку балансуєчих потужностей запропоновано підвищений тариф на електроенергію в окремі години доби (ранковий та вечірній піки). При цьому, додаткове стимулювання роботи ТЕЦ у балансуєчому режимі має покривати всі додаткові витрати у порівнянні з режимом роботи ТЕЦ у базовому режимі. Для детальної оцінки обох альтернатив розглянуто типову ТЕЦ на біомасі 3 МВт_е + 20 МВт_т (Рис. 3.18). Така «базова»

ТЕЦ включає котел на біомасі 30 МВт_T та теплофікаційну турбіну з електричною потужністю 3 МВт_e з відбором тепла до 10 МВт_T . Корисний відпуск тепла складає 20 МВт_T , включаючи 10 МВт_T з відбору турбіни і 10 МВт_T напряму з котла. В базовому режимі ТЕЦ виробляє $3 \text{ МВт}_e + 20 \text{ МВт}_T$ протягом 24 годин/добу.

В балансуєчому режимі турбіна працює як конденсаційна, тобто без відбору пари, з електричною потужністю 6 МВт_e . Необхідна теплова потужність 20 МВт_T забезпечується при цьому від базового і додатково включеного котлів. ТЕЦ виробляє 6 МВт_e в «піку» протягом тільки 6 годин/добу, а теплову енергію відпускає за таким самим графіком, що і базова ТЕЦ – 20 МВт_T протягом 24 годин/добу.

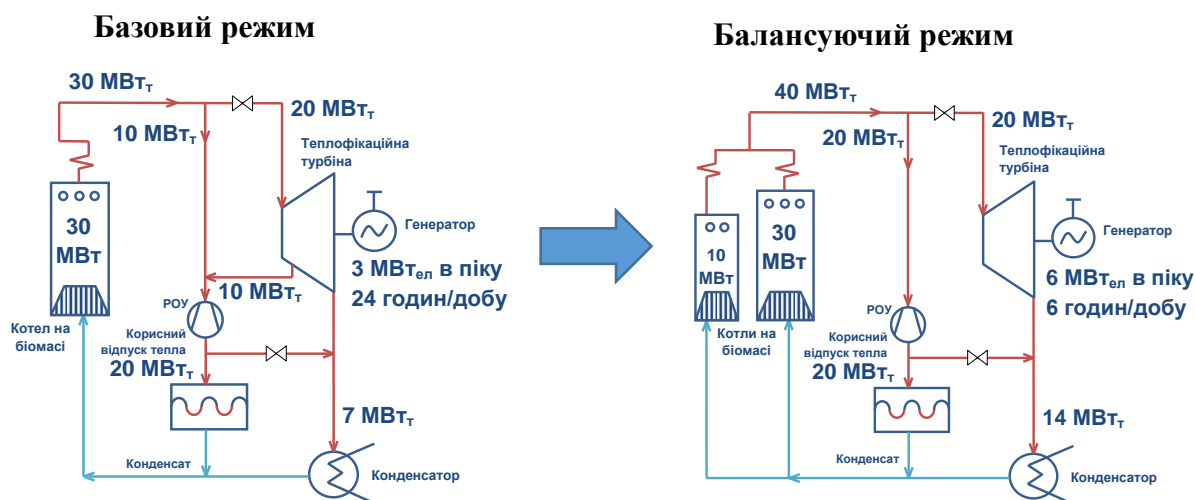


Рис. 3.18. Концепція роботи ТЕЦ на біомасі $3 \text{ МВт}_e + 20 \text{ МВт}_T$ у базовому та $6 \text{ МВт}_e + 20 \text{ МВт}_T$ у балансуєчому режимах

Для базового та балансуєчого режимів маємо відповідні коефіцієнти використання палива – $0,77$ та $0,65$ відповідно при майже рівних ККД виробництва електроенергії. Для базового режиму коефіцієнт використання палива вище, оскільки задіються ефект когенерації, чого немає у балансуєчому режимі. Для подальшого розрахунку вважається, що період роботи «в базі» дорівнює 24 год/добу, «в піку» – 6 год/добу.

Технічні та фінансові показники для моделі подальших розрахунків зведені у **Табл. 3.16**. Загальні капітальні витрати на базову ТЕЦ складають 9 млн євро, на балансуєчу ТЕЦ – 15 млн євро через додаткові витрати на дообладнання котлом 10 МВт_T та супутні витрати на допоміжне обладнання. Розрахунок проводиться для двох варіантів тарифу на електричну енергію – із застосування «зеленого» тарифу до 2030 і середньозваженого тарифу ринку після 2030 р. (перший варіант), і для опції участі ТЕЦ у аукціонах на електроенергію із зниженим на 10% тарифом на електроенергію на 20 років до 2040 р. (другий варіант). Тариф на теплову енергію з біомаси визначається відповідно до правил

його встановлення [226], як 0,9 від середньозваженого тарифу на теплову енергію з газу для відповідної категорій споживачів. Фінансові показники для розрахунку визначаються за реальними пропозиціями на ринку для таких проектів.

Табл. 3.16. Вихідні показники моделі ТЕО «базової» ТЕЦ на біомасі
3 МВт_е (база) + 20 МВт_т

ПРОЕКТНІ ПОКАЗНИКИ	
Об'єкт впровадження	ТЕЦ на біомасі (тріска/тюки стебла кукурудзи/соняшника) на 3 МВт _е +20 МВт _т , ККДел=30%, ККДтепл=85%
Теплотворна здатність біомаси	3,5 МВт·год/т (12,6 ГДж/т)
Ціна на сировину	50 євро/т
Споживання сировини	39 200 т/рік
Власне споживання електричної енергії	15%
Коефіцієнт використання встановленої електричної потужності ТЕЦ за рік (КВВП)	87%
Коефіцієнт використання палива	77%
Річні операційні витрати	ВСЬОГО: 2,9 млн євро/рік, з них Паливо: 1,9 млн євро/рік Інші витрати: 1,0 млн євро/рік
ФІНАНСОВІ ПОКАЗНИКИ	
Тариф на е/е до 1 січня 2030 р.	0,1239 євро/кВт·год без ПДВ
Тариф на е/е з 1 січня 2030 р.	0,06 євро/кВт·год без ПДВ
Тариф на теплову енергію з біомаси	0,9 x 1400 грн/Гкал без ПДВ [227]
Ставка дисконтування	8%
Ставка кредитування	8%
Період кредитування / грейс період	8 років / 1 рік
Частка кредитних коштів в CAPEX	60%

На першому етапі розрахунку використовувався cash-flow аналіз, відповідно до якого визначалися всі сукупні витрати-прибутки обох альтернатив за строк життя проекту (25 років). Потім тариф на балансуєчу електричну енергію для балансуєчої ТЕЦ підбирався так, щоб баланс витрат-прибутків для неї та для базової ТЕЦ були однаковими.

З точки зору інвестора, cash flow аналіз недостатній для розуміння фінансової рівноправності альтернатив базової та балансуєчої ТЕЦ. Тому, на

другому етапі, використовується стандартний підхід фінансового аналізу із визначенням IRR, NPV та строку окупності для обох проєктів. Вважається, що обидві альтернативи рівноправні, якщо їхні IRR рівні. Для інвестора в умовах України проєкт вважається фінансово привабливим, якщо $IRR \geq 20\%$. Базова ТЕЦ на біомасі в обраній технічній концепції забезпечує $IRR = 20\%$. Для забезпечення $IRR = 20\%$ балансуючої ТЕЦ підбирається відповідний стимулюючий «піковий тариф» в години балансування. Результати розрахунку показані у Табл. 3.17.

Табл. 3.17. Порівняння показників ТЕЦ: базової 3 МВт_е (база) + 20 МВт_т та балансуючої 6 МВт_е (пік) + 20 МВт_т.

Показники проєкту	Модель			
	Базова ТЕЦ е/е по схемі «ЗТ» (0,1239 євро/кВт·год до 2030 р.)	Базова ТЕЦ е/е по схемі аукціону (0,9 х 0,1239 євро/кВт·год на 20 років)	Пікова ТЕЦ е/е по схемі «ЗТ» (0,1239 євро/кВт·год до 2030 р.)	Пікова ТЕЦ е/е по схемі аукціону (0,9 х 0,1239 євро/ кВт·год на 20 років)
Час роботи в базовому/піковому навантаженні	24 / 0	24 / 0	0 / 6	0 / 6
Базова/пікова потужність ТЕЦ, МВт _е	3 / 0	3 / 0	0 / 6	0 / 6
Піковий тариф, Євро/кВт*год	-	-	0,273	0,279
CAPEX, млн євро	9.0	9.0	15.0	15.0
CAPEX, євро/кВт _е	3 000	3 000	2 500*	2 500*
NPV, євро	6 866 333	9 236 958	14 167 295	16 834 248
IRR, %	20,7%	20,5%	20,5%	20,4%
Простий строк окупності, років	4,9	5,5	5,1	5,5

* - питомі капітальні витрати нижче, тому що для «пікової» ТЕЦ у порівнянні з «базовою» ТЕЦ необхідне дообладнання додатковим паровим котлом та допоміжним обладнанням (+10 МВт_т, 6 млн євро).

Розраховано, що для створення умов стимулювання інвестора у ТЕЦ на біомасі працювати на ринку пікових електричних навантажень (IRR на рівні 20%), необхідно встановити тариф на обсяг електроенергії, вироблений в періоді пікового споживання, на рівні 0,273-0,279 євро/кВт·год в залежності від схеми відпуску електроенергії в мережу.

Застосування електрогенеруючих потужностей на біогазі і біометані для балансування енергетичної системи України.

Можливості регулювання обсягів виробництва енергії з біогазу пов'язані зі специфікою біогазової технології, а саме з можливістю розділення власне виробництва біогазу та виробництва енергії з біогазу, як у часі так і у просторі. Розглянемо більш детально кожен з таких можливостей.

Регулювання шляхом створення додаткового об'єму сховищ (газгольдерів) для накопичення біогазу

Класичні біогазові технології, зокрема ті, що використовують в секторі АПК, зазвичай орієнтовані на виробництво номінального добового обсягу біогазу рівномірно протягом року. Ідеальним випадком є отримання одного і того ж добового об'єму біогазу при завантаженні однакової добової порції сировини. Втім, на практиці біогаз часто виділяється нерівномірно, як протягом доби, так і протягом року. Це значною мірою пов'язано із нерівномірною подачею сировини, мінливістю складу сировини протягом року, пригніченням біологічних процесів в реакторі.

Незначні добові коливання об'ємів утворення біогазу як правило усереднюються за допомогою буферного накопичувача (газгольдера). Існує два основних, найбільш поширених типів газгольдерів у складі біогазових установок:

а) газгольдери острівного типу – окремо розташовані жорсткі або гнучкі ємності для зберігання газу, середнього і низького тиску;

б) газгольдери, суміщені з робочим об'ємом біореакторів – гнучкі ємності купольного типу низького тиску, які одночасно виконують функцію герметизації біореакторів чи інших технологічних ємностей у верхній частині.

На переважній більшості біогазових установок в секторі АПК використовуються гнучкі газгольдери, суміщені з біореактором (Рис. 3.19), рідше – гнучкі газгольдери острівного типу (Рис. 3.20).



Рис. 3.19. Газгольдер гнучкий, суміщений з реактором



Рис. 3.20. Газгольдери гнучкі острівного типу

Гнучкі газгольдери виконують у вигляді подвійної мембрани, що дозволяє регулювати/підтримувати тиск біогазу перед його подачею на блок генерації енергії навіть при значних коливаннях добової витрати газу. При цьому, як правило, синхронізуються виробництво та енергетичне використання біогазу.

Для того, щоб мати можливість регулювати виробництво енергії протягом доби в діапазоні, що перевищує базову, технологічно обумовлену нерівномірність обсягів виділення біогазу, необхідно створювати додатковий об'єм сховищ для накопичення біогазу. Відповідно, для того, щоб мати можливість виробити більшу кількість енергії в окремі години доби, необхідно також вводити додаткові потужності енергогенеруючого обладнання (в даному випадку міні-ТЕЦ на біогазі).

Єдиним способом створити додаткову буферну ємність для накопичення біогазу в межах біогазової установки є будівництво газгольдерів острівного типу. Необхідний об'єм газгольдерів буде тим більшим, чим більшим буде співвідношення необхідної пікової потужності до базової номінальної потужності енергогенеруючого обладнання.

Оцінку необхідного об'єму додаткового газгольдера для біогазової міні-ТЕЦ з базовою (номінальною) встановленою електричною потужністю 2126 кВт, в залежності від режиму видачі електричної енергії в мережу, наведено нижче. В основу розрахунку покладено функціональну модель роботи, коли номінальний об'єм біогазу виділяється рівномірно протягом доби, а спалюється в міні-ТЕЦ у встановлені години. Розглянуто два режими роботи міні-ТЕЦ на біогазі, а саме:

1. Базовий режим (24/0), при якому спалювання біогазу в міні-ТЕЦ проходить синхронно з його утворенням протягом доби (**Рис. 3.21.а**). Робота на номінальній потужності 2126 кВт – 24/24 годин на добу.
2. Режим роботи (6/6), при якому міні-ТЕЦ працює лише в години пікового навантаження в мережі (**Рис. 3.21.б**): у вечірній період з 18.00 год до 21.00 год та у ранковий період з 6.00 год до 9.00 год – всього 6 годин на добу. При цьому, потужність міні-ТЕЦ є вищою за номінальну потужність на деяку величину додаткової пікової потужності $N_{\text{пік}}$.

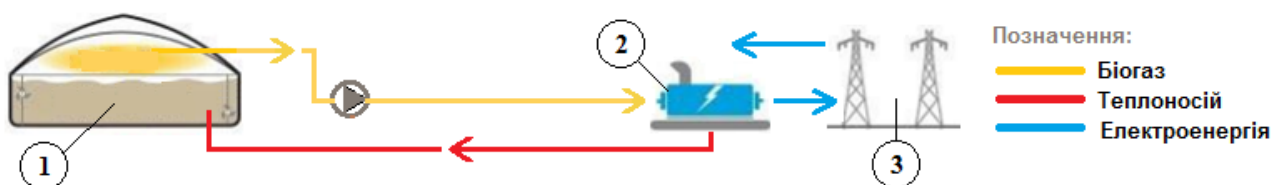


Рис. 3.21.а. Схема роботи міні-ТЕЦ на біогазі в базовому/піковому режимі 24/0

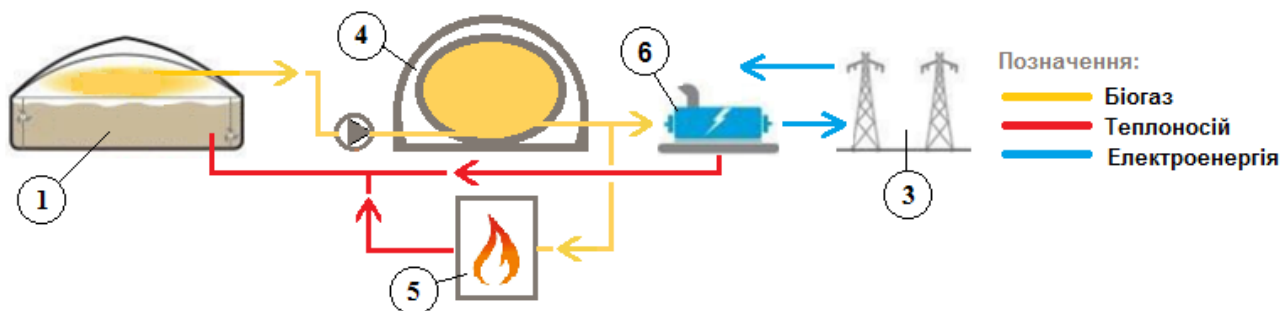


Рис. 3.21.б. Схема роботи міні-ТЕЦ на біогазі в базовому/піковому режимі 6/6

Позначення до **Рис. 3.21 а-б**: 1 – біореактор, де виробляється біогаз; 2 – міні-ТЕЦ на біогазі номінальної потужності 2126 кВт; 3 – об'єднана електромережа; 4 – додатковий буферний газгольдер; 5 – резервна газова котельня; 6 - міні-ТЕЦ на біогазі сумарною встановленою потужністю 2126 кВт + $N_{\text{пик}}$.

В моделі розрахунку враховано споживання біогазу на власні потреби біогазової станції (підтримання температури процесу бродіння) в години, коли не працює міні-ТЕЦ. При роботі міні-ТЕЦ, біогаз у котлі не споживається, оскільки передбачається споживання скидного тепла через теплообмінник.

Результати оцінки зміни об'єму буферного газгольдера для 2-го режиму роботи наведено на **Рис. 3.22**. На **Рис. 3.23** представлено результати оцінки задіяної базової (номінальної) та пікової потужності $N_{\text{пик}}$ міні-ТЕЦ протягом доби. Номінальне виробництво/споживання біогазу для міні-ТЕЦ потужністю 2126 кВт складає 880 $\text{м}^3/\text{год}$ при вмісті CH_4 57,66%. Споживання біогазу резервною газовою котельнею для покриття технологічних потреб в теплі складає 119 $\text{м}^3/\text{год}$, що оцінено з розрахунку річного споживання 30% виробленої теплової енергії в міні-ТЕЦ бруто.

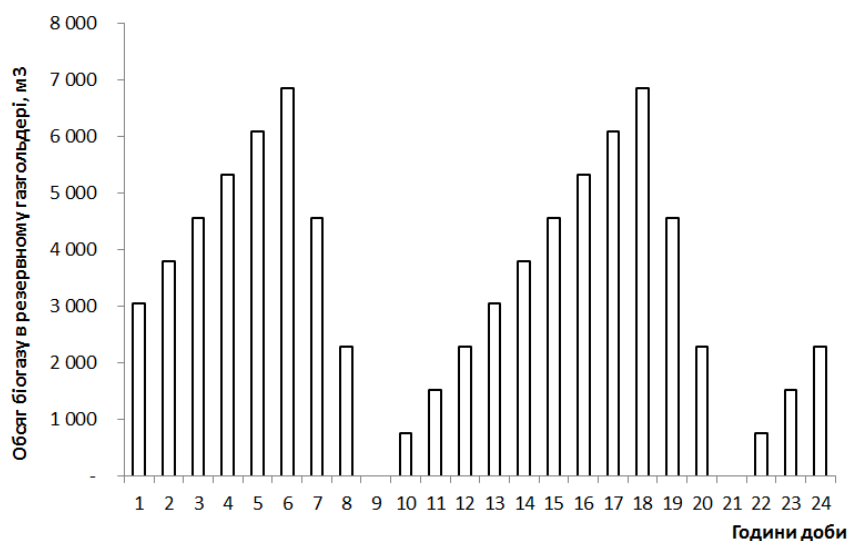


Рис. 3.22. Зміна об'єму біогазу в резервному газгольдері протягом доби в режимі роботи міні-ТЕЦ 6/6 годин (без урахування технологічного запасу).

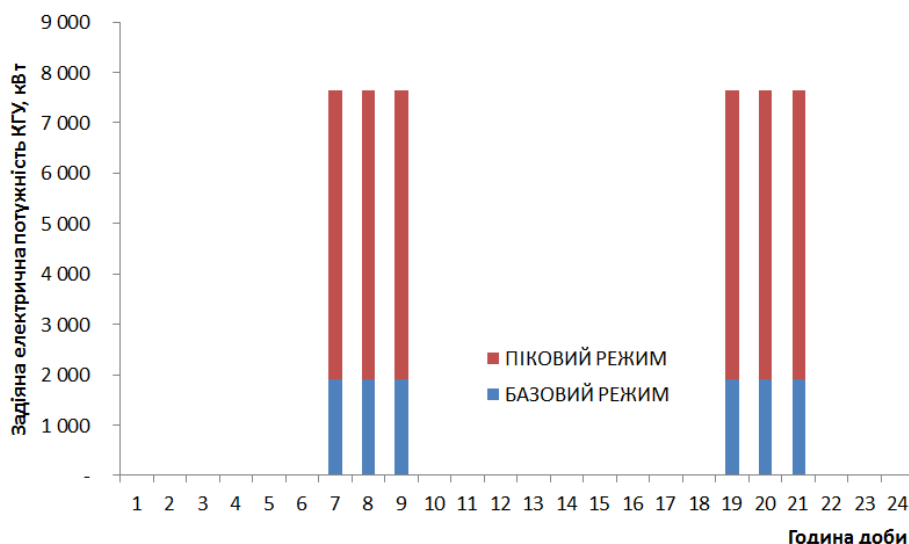


Рис. 3.23. Задіяна потужність протягом доби в режимі роботи міні-ТЕЦ 6/6 годин

В режимі роботи міні-ТЕЦ 6/6 годин максимальне накопичення біогазу в резервному газгольдері складе 6853 м^3 , а з врахуванням технологічного запасу 15% - 7880 м^3 . Додаткова до номінальної (2126 кВт) потужність міні-ТЕЦ складає в даному випадку 5517 кВт. Частина потенціалу встановленої потужності втрачається за рахунок споживання біогазу на виробництво тепла в газовій котельні.

Для оцінки економічних показників роботи біогазової станції в двох розглянутих режимах та визначення необхідної величини тарифу на електричну енергію, вироблену піковими потужностями на біогазі, приймемо наступні вхідні проектні та фінансові показники для проекту біогазової станції номінальною потужністю 2126 кВт, як показано в **Табл. 3.18**.

Табл. 3.18. Прийняті показники проекту біогазової станції потужністю 2126 кВт

ПРОЄКТНІ ПОКАЗНИКИ	
Об'єкт впровадження	Свиноферма на 20 тис. голів (гноївка з вмістом 7% сухих речовин)
Потенціал виходу CH_4 з сировини	Гноївка – 23,8 $\text{nm}^3 \text{CH}_4/\text{т}$ Силос кукурудзи – 104 $\text{nm}^3 \text{CH}_4/\text{т}$
Ціна на сировину / Споживання сировини	Гноївка – 0 євро/т / 56 049 т/рік Силос кукурудзи – 20 євро/т / 29 922 т/рік
Власне споживання електричної та теплової енергії біогазовою установкою	8% та 30% відповідно
Коефіцієнт використання встановленої потужності КГУ протягом року (КВВП)	90%
Річні операційні витрати на обслуговування БГУ та КГУ (без сировини)	4,5% (min 2,7... max 8,9%) від CAPEX
ФІНАНСОВІ ПОКАЗНИКИ	
Тариф на е/е до 1 січня 2030 р.	0,124 євро/кВт·год
Тариф на е/е з 1 січня 2030 р.	0,06 євро/кВт·год
Тариф на теплову енергію з біогазу	0,9 x 1400 грн/Гкал
Ставка дисконтування	8%
Ставка кредитування	8%
Період кредитування	8 років
Частка кредитних коштів в CAPEX	60%

Результати оцінки економічних показників проекту, в залежності від моделі та режиму роботи міні-ТЕЦ на біогазі, а також від обраної ринкової схеми реалізації електричної енергії, наведено в **Табл. 3.19**.

Табл. 3.19. Економічні показники в базовому та балансуєчому режимах роботи біогазової станції номінальною потужністю 2126 кВт.

ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ПРОЄКТУ				
Модель роботи	Базова		Пікова	
Ринкова схема	ЗТ	АУК	ЗТ	АУК
Режим роботи в базовому / піковому навантаженні	24 / 0	24 / 0	6 / 6	6 / 6
Базова/ пікова потужність КГУ, МВт _е	2 / 0	2 / 0	2 / 6	2 / 6
Піковий тариф, євро/кВт·год без ПДВ	-	-	0,266	0,266
CAPEX, млн євро	5,74	5,74	10,79	10,79
CAPEX, євро/кВт _{ел}	2 700	2 700	5 076 / 1 269	5 076 / 1 269
NPV, тис. євро	1 833	3 364	10 889	11 224
IRR, %	14,2%	15,3%	20,4%	20,4%
SPP, років	5,5	6,5	5,0	5,1

Примітки: Схема ЗТ – е/е по (0,1239 євро/кВт·год без ПДВ до 2030 р.); схема АУК – (0,9 x 0,1239 євро/кВт·год без ПДВ на 20 років).

В базовій моделі проєкту біогазової станції номінальною потужністю 2126 кВт показник IRR складає 14,2% та 15,3%, відповідно для схеми ЗТ та аукціону. Простий термін окупності при цьому складає 5,5 років та 6,5 років, відповідно. Інвестиції в проєкт оцінено в 5,74 млн євро, що є на рівні нижче середнього для подібних типів проєктів. Видно, що зниження тарифу на електричну енергію з біогазу, як для схеми аукціону на 10%, призводить до збільшення терміну окупності проєкту, але разом з тим збільшується загальна рентабельність проєкту (на 1,1%) та показник чистої приведеної вартості NPV (на 83,5%), за рахунок більш тривалого отримання прибутку від реалізації електроенергії по ціні, вищій ніж середня оптова ціна на ринку.

Економічні показники проєкту в балансуєчих моделях роботи міні-ТЕЦ оцінено виходячи з умови забезпечення планового показника IRR на рівні 20%, що є прийнятним для зацікавлення інвесторів в існуючих ринкових умовах в Україні. При цьому, такий плановий показник IRR забезпечувався підбором необхідної величини тарифу на електричну енергію з біогазу, оскільки остання приймається як єдине джерело доходу даного типу проєкту.

Інвестиції в проєкти балансуєчої моделі роботи суттєво збільшуються, у порівнянні з базовою моделлю. Основними чинниками підвищення вартості проєкту є необхідність встановлення додаткових пікових потужностей міні-ТЕЦ (домінуюча частка), а також додаткового буферного газгольдера та резервної

газової котельної. Так, CAPEX проєкту балансування в режимі 6/6 збільшується, у порівнянні з базовою моделлю, в 1,9 рази до 10,8 млн євро.

Для досягнення балансуєчими моделями проєктів планового показника IRR 20%, тариф на електричну енергію, вироблену піковими потужностями на біогазі, повинен бути вищим в 2,15 разів у порівнянні з діючим «зеленим» тарифом 0,1239 євро/кВт·год без ПДВ, і складати 0,2664 євро/кВт·год без ПДВ для режиму балансування 6/6. При цьому враховано, що електрична енергія, вироблена базовими потужностями, реалізується за «зеленим» тарифом або тарифом аукціону.

Регулювання шляхом закачування та наступного споживання біометану з мережі природного газу

При використанні біометану з мережі природного газу, можливості у балансуванні виробництва електричної енергії значно розширюються. Насамперед, не потрібно будувати додаткові буферні газгольдери, оскільки мережа природного газу сама собою буде слугувати таким накопичувачем. Власне можливість накопичення значних об'ємів газу за рахунок підземних сховищ природного газу відкриває нові можливості для ще більш гнучкого виробництва енергії з біогазу, рознесеного як у просторі, так і у часі.

Для того, щоб біометан потрапив в газову мережу, його виробник повинен буде отримати сертифікат походження на випущений обсяг біометану, приведений до одиниць вимірювання енергоемності, який автоматично фіксується в національній системі обліку (реєстрі). Після запровадження системи сертифікації біометану, в будь-якому місці, де є мережа природного газу та споживач тепла (наприклад, котельні, ТЕЦ), може бути підключена газова енергетична установка з наміром використовувати біометан.

При цьому, спалювати сертифікований обсяг біометану з мережі можливо без чіткої прив'язки до години доби, і навіть без прив'язки до чіткого добового режиму роботи. Відтак, балансування з використанням біометану з мережі природного газу можливе для більш широкого спектру ринків балансування, як то «ринок на добу вперед», «внутрішньодобовий ринок» або «балансування в реальному часі».

Розглянемо два можливих проєктних сценарії, а саме:

1. Використання нової когенераційної установки на біометані з мережі природного газу.
2. Використання існуючої кваліфікованої когенераційної установки, що працює на природному газі.

Враховуючи те, що вартість нової когенераційної установки на біогазі є співмірною з вартістю установки збагачення біогазу до біометану, загальна вартість проєкту БГУ + КГУ на біометані буде на 20-30% більшою, ніж проєкту БГУ + КГУ на «сирому» біогазі. Операційні затрати проєкту також будуть вищими на 20-40%, в залежності від вартості сировини. Очевидно, що для досягнення рентабельності проєкту на рівні IRR 20%, тариф на електричну енергію з біометану повинен бути вищим діючого «зеленого» тарифу на електроенергію з біогазу, навіть за умовою додаткового використання тепла.

Розрахунки показують, що для відносно великого проєкту когенерації на біометані з мережі природного газу потужністю 9,5 МВт_е, з утилізацією 60% теплової енергії за тарифом 1260 грн/Гкал без ПДВ, необхідна величина «зеленого» тарифу складає 0,131...0,174 євро/кВт·год без ПДВ, в залежності від вартості сировини (Рис. 3.24).

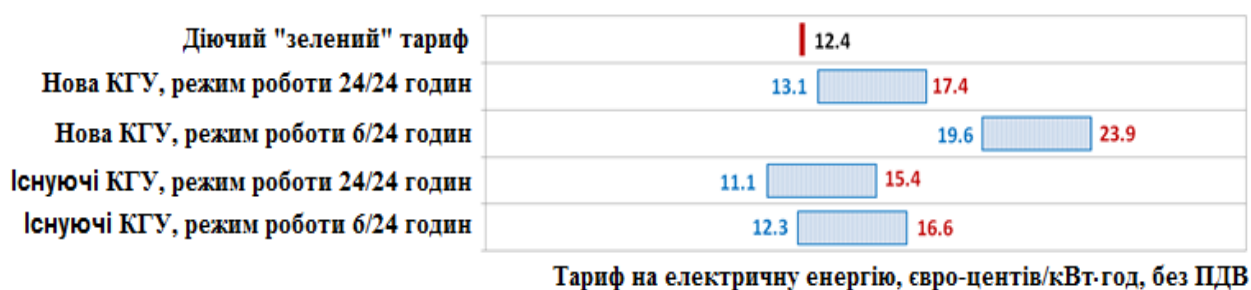


Рис. 3.24. Необхідна величина тарифу на електричну енергію з біометану

Когенерацію на біометані можливо використовувати в балансуєчому ринку, проте для енергетичної утилізації усього обсягу поданого в мережу природного газу біометану когенераційною установкою, її встановлена потужність повинна бути більшою, ніж при рівномірній роботі протягом доби. Так, наприклад, при роботі такої КГУ в режимі 6 годин з 24 протягом однієї доби (3 години в години найбільшого навантаження мережі зранку і 3 години – у вечірній час), її розрахункова потужність повинна бути в 4 рази більшою від базової. Відповідно, вартість нової КГУ при цьому буде пропорційно вищою.

Для забезпечення рентабельності проєкту когенерації на біометані з мережі природного газу потужністю 9,5 МВт_е, яка працюватиме в режимі 6/24 годин, з утилізацією 60% теплової енергії за тарифом 1260 грн/Гкал без ПДВ, необхідна величина «зеленого» тарифу складає 0,196...0,239 євро/кВт·год без ПДВ, в залежності від вартості сировини.

Таким чином, діючого «зеленого» тарифу на електроенергію з біогазу не достатньо в проєктному сценарії з використанням нової когенераційної установки на біометані з мережі природного газу в режимі рівномірної роботи протягом доби. Щодо доцільності проєктного сценарію з генерацією електричної

енергії в балансуєчому ринку наразі не можливо зробити однозначні висновки, оскільки балансуєчий ринок та ринок допоміжних послуг ДП «НЕК «Укренерго» ще не запрацював повноцінно.

В іншому проєктному сценарії передбачається, що біометан з мережі природного газу може бути спалено в кваліфікованих ТЕЦ/КГУ на природному газі. Це існуючі та діючі паротурбінні установки з енергоблоком на природному газі (ТЕЦ) або газопоршневі установки (КГУ). В Україні в 2018 році налічувалось 28 ТЕЦ на природному газі, з них 25 ліцензованих, а також 46 КГУ, з них 25 ліцензованих. Сумарна встановлена електрична потужність ТЕЦ та КГУ складає 3546 МВт_е, тепла – 18547 Гкал/год (20570 МВт_т). Усі генеруючі потужності на природного газу працювали в 2018 році в середньому 1855 годин, з КВВП 21,5%, що говорить про їх недовантаженість та періодичність роботи.

З точки зору рентабельності проєкту більш перспективним може бути робота саме КГУ на біометані, оскільки вони мають більший ККД електричний і є більш маневровими, у випадку підключення їх до балансуєчого ринку електроенергії. Втім це не виключає можливості використання і паротурбінних установок для роботи на біометані.

Організаційно, включення існуючих кваліфікованих КГУ в проєкт когенерації на біометані з мережі природного газу може відбуватись на умовах їх оренди та покриття усіх операційних витрат на обслуговування. В такому разі, при ставці річної орендної плати на рівні 5% вартості нової КГУ, необхідна величина «зеленого» тарифу для проєкту 9,5 МВт_е в режимі 24/24 годин з утилізацією 60% теплової енергії складає 0,111...0,154 євро/кВт·год без ПДВ, а при роботі в режимі 6/24 годин - 0,123...0,166 євро/кВт·год без ПДВ.

3.4. Висновки до розділу

1. Перспективним видом агробіомаси для України є ПП кукурудзи. Економічний енергетичний потенціал ПП кукурудзи в Україні у 2018 р. становив 18,6 млн т, або **3,6 млн т н.е.** Загалом, ПП кукурудзи має досить хороші паливні властивості, близькі до властивостей деревного палива. Для порівняння: у деревини температура плавлення золи складає в середньому близько 1200 °С, а у стебел кукурудзи – близько 1100 °С. Проаналізовано чотири технології збору ПП кукурудзи на базі різних машин, беручи до уваги наявне на ринку обладнання та результати польових випробувань у США та ЄС.

2. Виконано порівняння енергетичної ефективності та скорочення викидів парникових газів при використанні ПП кукурудзи у вигляді тюків, гранул та брикетів для виробництва теплової енергії. Отримано такі основні результати:

- Коефіцієнт перетворення енергії (невідновлюваної), що відповідає життєвому циклу використання ПП кукурудзи в якості палива для виробництва теплової енергії, знаходиться в діапазоні: 5,4-12,7 – для великих тюків; 4,6-6,5 – для гранул та 4,9-7,1 – для брикетів (при відстані транспортування готового палива до 150 км).
- Використання ПП кукурудзи у вигляді великих тюків при відстані транспортування сировини до 50 км забезпечує зниження споживання первинної енергії викопного палива у 10 та більше разів. Використання гранул та брикетів зменшує споживання первинної енергії викопного палива у понад 5 разів.
- Питомі викиди парникових газів при спалюванні біомаси для виробництва теплової енергії знаходяться в діапазоні 10-20 г CO₂ екв./МДж, що у 6-17 раз менше в порівнянні з використанням природного газу. Скорочення викидів парникових газів при використанні пожнивних решток у тюках в якості палива становить 83-91%; у гранулах 73-79%; у брикетах 75-81% за умови транспортування біомаси на відстані, рекомендовані для забезпечення сталого розвитку за енергетичними показниками (до 150 км).
- Гранулювання та брикетування ПП кукурудзи доцільне лише у межах допустимих значень показників енергетичної ефективності та у випадку необхідності їх транспортування на відстань більше 500-600 км у порівнянні з тюками.

3. Проаналізовані можливості застосування електрогенеруючих потужностей на біомасі, біогазі і біометані для балансування енергетичної системи України. Для ефективної роботи на ринку пікових електричних навантажень ТЕЦ на біомасі повинна бути дооснащена додатковим котлом, а необхідний тариф в години пік має становити 0,273-0,279 євро/кВт·год. БГУ повинна бути дооснащена додатковими електрогенеруючими потужностями та резервним газгольдером, а необхідний тариф має становити 0,266 євро/кВт·год. Найбільш перспективними для роботи в «пікових» режимах може бути робота КГУ на біометані, для яких необхідний тариф має становити 0,123...0,166 євро/кВт·год. Найбільш перспективними для роботи в «пікових» режимах може бути робота саме КГУ на біометані, оскільки вони мають більший ККД електричний і є більш маневровими. Можлива організація роботи існуючих КГУ на біометані. В такому разі, необхідна величина «зеленого» тарифу для проєкту 9,5 МВт_е в базовому режимі з утилізацією 60% теплової енергії складає **0,111...0,154 євро/кВт·год** без ПДВ, а при роботі в піковому режимі - **0,123...0,166 євро/кВт·год** без ПДВ. Нижні значення діапазонів відповідають нульовим значенням сировинної складової вартості біометану.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГІЇ З БІОЛОГІЧНИХ ВИДІВ ПАЛИВА

4.1. Розроблення технології та експериментальні дослідження процесів спалювання низькоякісних видів біопалива в топках з ретортною подачею і решітками допалювання

Ретортні топки створені в 1920-1930-х роках для спалювання класифікованого вугілля. В основі первинних конструкцій цього типу передбачалась одинична металева реторта (повітронепроникне корито), розташована на певній глибині під загальним дзеркалом горіння шару. Паливо подавалось в котел через передню частину реторти з розташованого над ним завантажувального ковша. Нова порція палива механічним шляхом за допомогою штовхача (конструкції Джонс-Еріта, Рилея, Тейлора) або за допомогою шнека (в ретортах Нібо і Ніссена) проштовхувалась в товщу лежачого в кориті шару. Шар рухався під натиском свіжого палива і поступово розвалювався по обидва боки реторти чи на шамотні плити, або на поверхні коротких похилих решіток.

У деяких топках Джонса подача повітря зводилась до схеми подібної схемі зустрічного фурменого дуття через вузькі щілини, що розташовуються у верхній частині горловини реторти. Надалі стали створювати вже порівняно розвинену решітку у вигляді решітчастого гребня, який розташований між двома ретортами.

Механізм процесу, що протікає в шарі на ретортній решітці, на сьогоднішній день ще недостатньо вивчений. Поглиблений експеримент, що розкриває розвиток окремих стадій процесу, для цих топків відсутній. Є порівняно багатий фактичний матеріал, що побічно підтверджує ряд наступних аналітичних положень.

У всіх топках з нижньою подачею палива основою процесу горіння є рух зернистого шару спочатку всередині реторти, потім у верхній зоні та зоні горіння, куди подається повітря. Схематично процеси у ретортній топці описані в [228, 229]. Зерниста маса свіжого палива, яка поступово просувається всередині реторти, під дією шнеку повільно виштовхується у верхні шари палива і подається до зони, куди підводиться вторинне повітря, і яка являє собою пояс шарового горіння. Однак, на відміну від інших шарових процесів, первинна теплова обробка паливної маси йде тут без механічного впливу повітряного потоку. Процес за характером повинен значно наближатися до чистого процесу коксування і сублімації. Саме цій обставині приписують здатність топки з нижньою подачею палива справлятися з сортами кам'яного вугілля, що порівняно сильно спікаються. Теоретично передбачається, що весь процес коксування (як попередній) завершується в межах реторти. Тут же завдяки

грубому натиску штовхача і подаванню свіжих порцій пального, з одного боку, та вазі шару палива, яке лежить вище, з іншого – має відбуватися і деяке, достатнє для відповідних випадків, руйнування (роздавлювання) кусків спеченого коксу.

Доспілий кокс поступово входить в зону горіння і розпалюється. По мірі того як розширюється догори горловина реторти і паливний потік, виходячи за межі бортів останньої, розвалюється по обидві її сторони, збільшується ширина паливного потоку, який здійснюється, і, отже, підйом шару сповільнюється. Це дозволяє повільному процесу розпалу й горіння коксу розвинути і досягти максимуму на порівняно короткому шляху (висоті) шару. Позитивним є те, що, на відміну від горизонтального або похило-рухомого шару, все дзеркало горіння (в основному) являє собою звернену до топкової камери зону розвинутого горіння коксу, тобто зону, яка виробляє найбільше теплової енергії, з відносно рівномірним питомим тепловиділенням коксу.

Так само своєрідно відбувається і розвиток процесу горіння летких, потік яких проникає в шар з горловини реторти. Потрапляючи у верхній зоні в товщу високотемпературного коксу і змішуючись з повітряним потоком, леткі інтенсивно горять ще в каналцях між кусками палива, значно посилюючи в свою чергу тепловий температурний ефект роботи самого шару. Зростання температури, по мірі просування пального до верхніх рівнів шару, повинно бути дуже різким. Такі умови, незважаючи на повільність руху частинок шару, повинні створювати прискорене розкладання в процесі коксування і скорочення зони пластичного стану пального, що неминуче при сортах вугілля. Можливо, що ця обставина також сприяє розширенню діапазону сортів здатного до спікання вугілля, для яких доцільно застосувати ретортну топку.

Разом з тим, більш-менш концентроване дуття, що легко сприяє винесенню дрібних частинок, обмежує застосування решітки для сортів вугілля, яке не спікається, або, в кращому випадку, призводить до зниження питомого теплового навантаження шару. Не менш істотним обмеженням є самий характер розпалювання шару, що в значній мірі залежить від виходу летких. На пісних сортах ($V_2 < 15 \div 20\%$) стійкого процесу створити не вдається, і вони виявляються непридатними для решіток цього типу.

Істотну роль в процесі, що розвивається, повинна грати зольність палива як в кількісному, так і в якісному відношенні. По ходу процесу, озолення і шлакування зосереджуються на верхніх рівнях шару. Можливо, що розм'якшений стан золи в певних випадках сприяє зменшенню виносу дрібних часток, навіть при використанні сортів пального, яке порівняно слабо спікається. Однак після певної межі (понад 15-20%) подальше збільшення зольності починає вимагати зниження інтенсивності процесу горіння, особливо при легкоплавких типах золи.

Значні обмеження щодо меж застосування ретортної решітки вносить вологість палива. Самий характер розвитку процесу не допускає велику вологість, тому що при цьому значно знижується температурний рівень коксової зони шару, а отже і середня інтенсивність його роботи (застосовна вологість, як правило, не вище 15%).

Реторти з нижньою подачею палива пред'являють підвищені вимоги до розміру кусків і вмісту дрібних частинок. Найкраще вони працюють на сортованому вугіллі. При спалюванні усередненого палива необхідно забезпечити дроблення великих кусків до розміру не більше 40 мм. Вміст дрібних частинок з розмірами 0-6 мм обмежується 50%. Підвищений відсоток дрібної фракції викликає погіршення роботи топкового пристрою.

Все викладене вище приводить до висновку про те, що ретортні решітки, які працюють на так званому принципі нижньої подачі палива, значно краще інших пристосовані для шарового спалювання сортів вугілля, яке спікається. Робота реторти відрізняється при цьому значною інтенсивністю в порівнянні з іншими типами механічних решіток. Реторта не може бути застосована для вологих і надмірно зольних палив, а також для сортів вугілля, яке не спікається, особливо для вугілля з сильно збідненою горючою масою [229].

Розрахункові характеристики ретортних топков.

Реторти з нижньою подачею палива підвищеної потужності працюють на вугіллі з навантаженнями робочого полотна $Q/R_1 = 1740 \div 2100$ кВт/м², де R_1 - проекція робочої площі реторти на горизонтальну площину без застосування допалювання. Надходження палива зниженої якості викликає зниження навантаження. До топков подається гаряче повітря температурою 175-200°C. Експлуатаційний досвід показує, що до вказаної межі підігрів повітря майже не впливає на знос решітки. Збільшення температури понад 200°C в існуючих конструкціях сприяє прискоренню зносу. Підведення нижнього дуття зазвичай виконується по секціям.

Одноретортні топки працюють на вугіллі з тепловими навантаженнями 990 - 1160 кВт/м². До цих топков, як правило, подається холодне повітря.

Навантаження топкового простору потужних топков відносять до їх об'єму і приймають на рівні 230 – 260 кВт/м³. Камера згоряння виконується відкритою без склепін, причому майже суцільно покривається настінним екраном. Нижня поверхня екрану в частині, що стикається з палаючим шаром, захищається від агресивної дії розплавленої золи спеціальними плитками.

Навантаження топкового простору одноретортних решіток в залежності від місцевих умов коливається в широких межах; в середньому вона може бути прийнята від 290 до 350 кВт/м³. У невеликих об'ємах для необхідного

охолодження газів виявляється достатньою променесприймаюча поверхня котла, тому топки другої групи, як правило, виконуються без екранів.

Основна теплова втрата шарової топки – втрата зі шлаком – при спалюванні кам'яного вугілля невелика (провал на решітках з нижньою подачею практично відсутній).

Помітно більше значення мають втрати зі шлаком при спалюванні вугілля у ретортах, що забезпечені перекидними колосниками допалювання, топок як підвищеної потужності, так і невеликих одноретортних. В межах навантаження решітки $Q/R_1 = 930 \div 1400$ кВт/м² ці втрати змінюються від 5 до 7,5%.

В реальних умовах експлуатації топки працюють з низькими надлишками повітря і невеликою хімічною неповнотою згоряння, як правило, без подачі вторинного повітря. Можливість отримання невеликого хімічного недопалу при відносно малих значеннях надлишку повітря пояснюється досить сприятливими умовами вигорання летких при спалюванні за схемою нижньої подачі палива, а також досить рівномірним заповненням факелу топкового об'єму. Розрахункові характеристики топкового процесу при спалюванні вугілля проектної якості наведені в **Табл. 4.1**.

Табл. 4.1. Розрахункові характеристики топок з нижньою подачею палива [230]

Найменування показників	Позначення	Розмірність	Топки підвищеної потужності	Промислові одноретортні топки
1. Видиме теплове навантаження решітки	Q/R_1	тис. ккал/м ² год	1500 - 1800	850 - 1000
2. Видиме теплове навантаження об'єму	Q/V	тис. ккал/м ³ год	200 - 225	250
3. Температура дуття	t_0	°C	175 - 200	25
4. Коефіцієнт надлишку повітря в кінці топки	α_m		1,25	1,3
5. Втрата від хімічної неповноти згоряння	q_3	%	1 - 0,5	1
6. Втрата зі шлаком (топки з шахтою-	$q_4^{шл}$	%	2	1,5 - 2
7. Втрата зі шлаком (топки з колосниками	$q_4^{шл}$	%	6	5 - 6,5
8. Втрата з винесенням	$q_4^{вин}$	%	2	1,5 - 2

Історично склалося так, що у вітчизняній практиці в силу ряду причин ретортні топки не знайшли застосування. У зарубіжній практиці ретортні топки

широко застосовувалися для спалювання класифікованого вугілля. В умовах енергетичної кризи їх стали застосовувати і для спалювання різних відходів. Фірми, що виробляють ретортні топки для спалювання вугілля, виробляють і ретортні топки для спалювання деревної тирси і тріски, паливних гранул і зернових відходів [231]. Конструктивно самі реторти майже не відрізняються, проте в науковій і технічній літературі не наводяться дані щодо розрахункових характеристик ретортних топок при спалюванні деревного палива різної вологості. Відсутні і дані про вплив різних чинників на емісію забруднюючих речовин при роботі ретортних топок на деревному паливі.

У вітчизняній практиці є досвід спалювання вологих деревних відходів в топках з затискаючою решіткою, які більше придатні для кускового палива, ніж дрібнофракційного [232]. В Україні такі топки також не знайшли широкого застосування.

У зв'язку з викладеним вище актуальним завданням є визначення розрахункових характеристик ретортних топок при роботі на різних видах деревного палива, що розрізняються вологістю і фракційним складом. У даній роботі розрахункові характеристики ретортних топок визначалися експериментальним шляхом.

Експериментальні дослідження.

Експериментальні дослідження були проведені на експериментальному котлі потужністю 100 кВт. В якості палива використовувались відходи деревини, тирса, а після модифікації котла - подрібнена солома, малі тюки соломи, стебла кукурудзи, торф (**Рис. 4.1**). Як показали результати дослідження механізмів горіння в експериментальному котлі можна отримати прийнятні показники емісії.

Перша серія експериментів була проведена з дрібнофракційним деревним паливом - сосною тирсою з меблевого виробництва. Розподіл фракцій деревного палива був наступним: фракція розміром менше 0,8 мм становила 17% від загальної ваги, фракція від 0,8 до 1,7 мм – 17%, від 1,7 до 3 мм – 29%, від 3,0 до 5,0 мм – 22%, від 5,0 до 7,0 мм – 7%, і фракція розміром більше 7 мм – 8%. Тирса не містили кори. Вміст золи в тирсі – 0.48% від сухої речовини. Експерименти проведено з зразками палива різного вмісту вологи – від 12% до 48%. Дослідження проведено при різних способах організації реагування палива і повітря, які можуть реалізовуватися в ретортах різної конструкції і схематично показані на **Рис. 4.2**.

Перший спосіб («класична» реторта) полягав в спалюванні тирси у вигляді насипної гірки палива, що формується безпосередньо над ретортою, з палаючим верхнім шаром (**Рис. 4.2 а**). Розподіл повітря був таким: 92% припадало на

первинне повітря, яке рівномірно подавалося під шар палива, а 8% становило вторинне повітря, яке подавалось в полум'я над паливом. При цьому загальний коефіцієнт надлишку повітря становив 1,4.



а)



б)

Рис. 4.1. Стенди ІТТФ НАНУ для дослідження технологій спалювання біологічних видів палива: а) деревні тріска і тирса; б) подрібнені стебла кукурудзи.

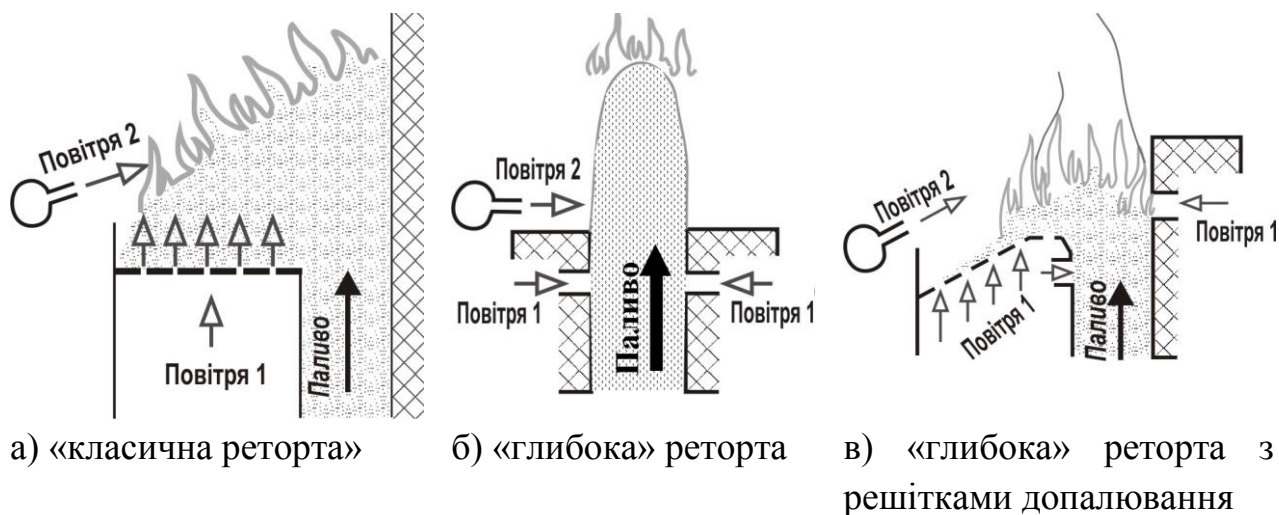


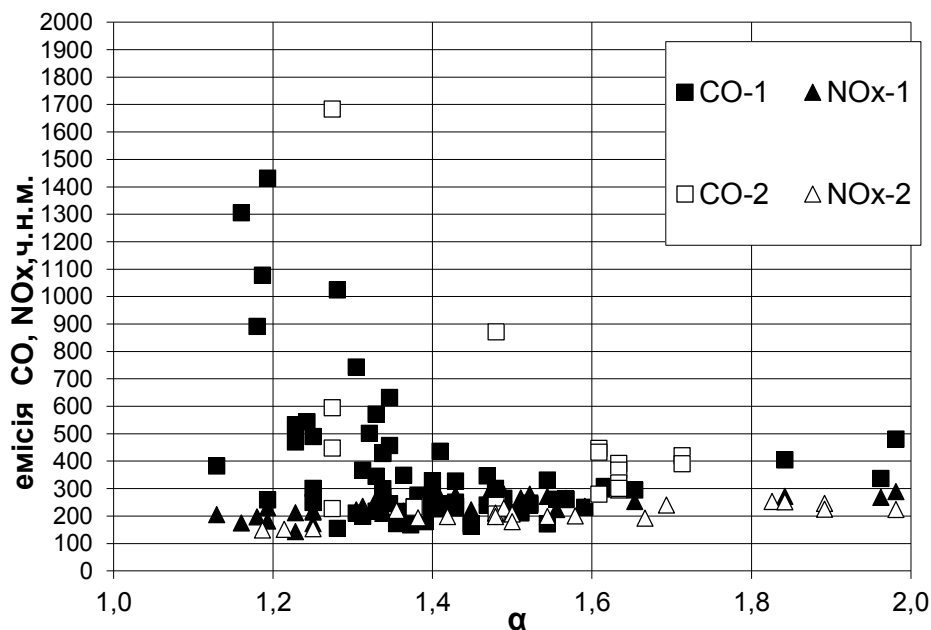
Рис. 4.2. Види конструкції реторт.

Такий режим спалювання вдалося досягти при використанні деревної тирси вологістю до 30% і максимальною витратою палива до 15 кг/год. Він відповідає тепловому навантаженню 260 кВт/м² при вологості палива 30% і 370 кВт/м² при вологості палива 12%. При стабільному верхньому займанні палива емісія CO була рівною приблизно 1850 ppm (ч.н.м.), а емісія NO_x – близько 75 ppm (тут і

далі в розділі емісії CO і NO_x наведені в перерахунку на вміст O₂ 0% в сухих димових газах). Однак при спалюванні дрібнодисперсної тирси досягнення стабільності такого режиму було складним - дуже часто траплялося загасання горіння верхнього шару і перехід до режиму нижнього займання (горіння нижніх шарів палива). Це явище супроводжувалося появою білого диму над паливом, емісія CO набагато перевищувала 2000 ppm.

Для забезпечення інтенсивного спалювання палива в режимі верхнього займання було вирішено максимально утримувати тепло, що виділяється, в спеціально організованій зоні займання – в горловині «глибокої» реторти (Рис. 4.2 б). Такий режим полягав в інтенсивному займанні деревини, виході летючих і їх змішуванні з повітрям в каналі горловини реторти, при цьому газова суміш допалювалася в топці над ретортою. Було досліджено два випадки розподілу підведеного повітря. У першому випадку все повітря подавалося через сопла в горловину реторти. У другому випадку 90% становило первинне повітря, яке надходило через сопла в горловину реторти, і 10% – вторинне повітря, що подавалося у полум'я над ретортою.

Встановлено, що в «глибокій» реторті спалювання тирси можливо при максимальній витраті палива 9,9 кг/год (вологість 14,8%), 10,5 кг/год (вологість 29,3%) і 13 кг/год (вологість 45%). Ці результати відповідають інтенсивності горіння 723 кВт/м², 614 кВт/м² і 557 кВт/м². Отримано наступні результати щодо емісій: для першого випадку розподілу повітря емісія CO була нижче, а емісія NO_x вище в порівнянні з другим випадком розподілу повітря (Рис. 4.3).



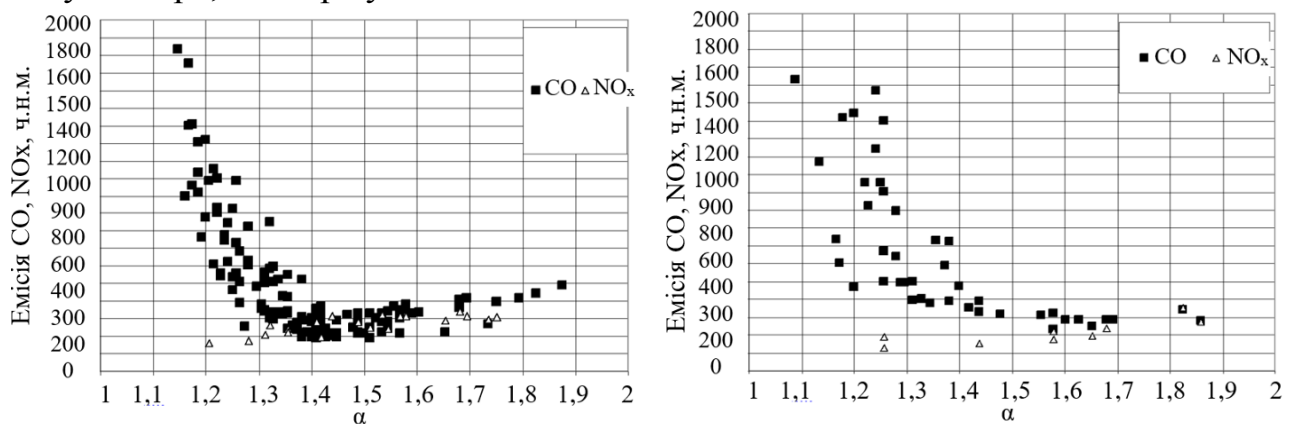
CO-1 і NO_x-1 – все повітря поступає через форсунки реторти;

CO-2 і NO_x-2 – первинне повітря 90%, вторинне повітря 10%.

Рис. 4.3. Емісії CO і NO_x при спалюванні сухої деревної тирси (W 14,8%) у «глибокій» реторті.

Це можна пояснити тим, що вторинне повітря призводить до зниження температури в топці, таким чином, знижуючи швидкість реакції окислення CO.

На **Рис. 4.4** представлено дані про емісію CO і NO_x при спалюванні вологої деревної тирси у глибокій реторті для випадку введення всього повітря через сопла реторти. При збільшенні вологості палива емісія NO_x стає менше, а емісія CO, навпаки, зростає при однакових коефіцієнтах надлишку повітря (α). Щодо мінімальної емісії CO, є оптимальні співвідношення для всіх випадків, вони знаходяться в діапазоні $\alpha=1,4-1,6$. Збільшення α до 1,8-1,9 призводить до помірного зростання CO, тоді як зменшення коефіцієнта надлишку повітря нижче 1,3 призводить до різкого збільшення емісій CO, які при $\alpha=1,15$ можуть перевищувати 2000 ppm. Спостерігалася загальна тенденція зниження емісії NO_x при зменшенні коефіцієнта надлишку повітря, що пов'язано зі зменшенням об'єму повітря, яке бере участь у процесі горіння палива. Як відомо, оксиди азоту NO_x при спалюванні біомаси в основному утворюються шляхом окислення азоту повітря, що бере участь в спалюванні.



а) деревні відходи середньої вологості (W=29,3%)

б) деревна тирса високої вологості (W=45%)

Рис. 4.4. Залежність емісії CO та NO_x від коефіцієнту надлишку повітря при спалюванні деревного палива різної вологості у «глибокій» реторті.

При спалюванні у «глибокій» реторті був відзначений серйозний недолік - можливість скупчення коксу а також великих шматків інертних матеріалів (метал, камінь) в її горловині і, в результаті цього, нерегулярність її подальшої роботи. Для усунення цього недоліку і забезпечення можливості самоочищення реторти розроблено третій тип реторти – «глибоку» реторту з решітками допалювання (**Рис. 4.2 в**). Основна ідея полягає в тому, щоб забезпечити інтенсивне горіння палива з виштовхуванням великих шматків деревини і негорючих частинок на решітку для їх допалювання та подальшого видалення з топки. Розподіл повітря був таким: через сопла реторти 55-70%, через сопла,

розташовані над паливом 10%, решта повітря підводилося знизу колосникової решітки. У такому режимі вдалося досягти найбільшої інтенсивності горіння.

Для сухого деревного палива (тирси) вологістю 12,1% гранична витрата палива була 24 кг/год, що відповідає інтенсивності горіння 1255 кВт/м². Для тирси середньої вологості (W 31,8%) витрата палива становила 23,3 кг/год, а інтенсивність горіння – 942 кВт/м². Для вологої тирси (W 49,5%) витрата палива складала 27,6 кг/год, а інтенсивність горіння – 539 кВт/м². Залежність емісії CO та NO_x від коефіцієнту надлишку повітря при спалюванні деревного палива різної вологості у «глибокій» реторті з решітками допалювання показана на **Рис. 4.5**.

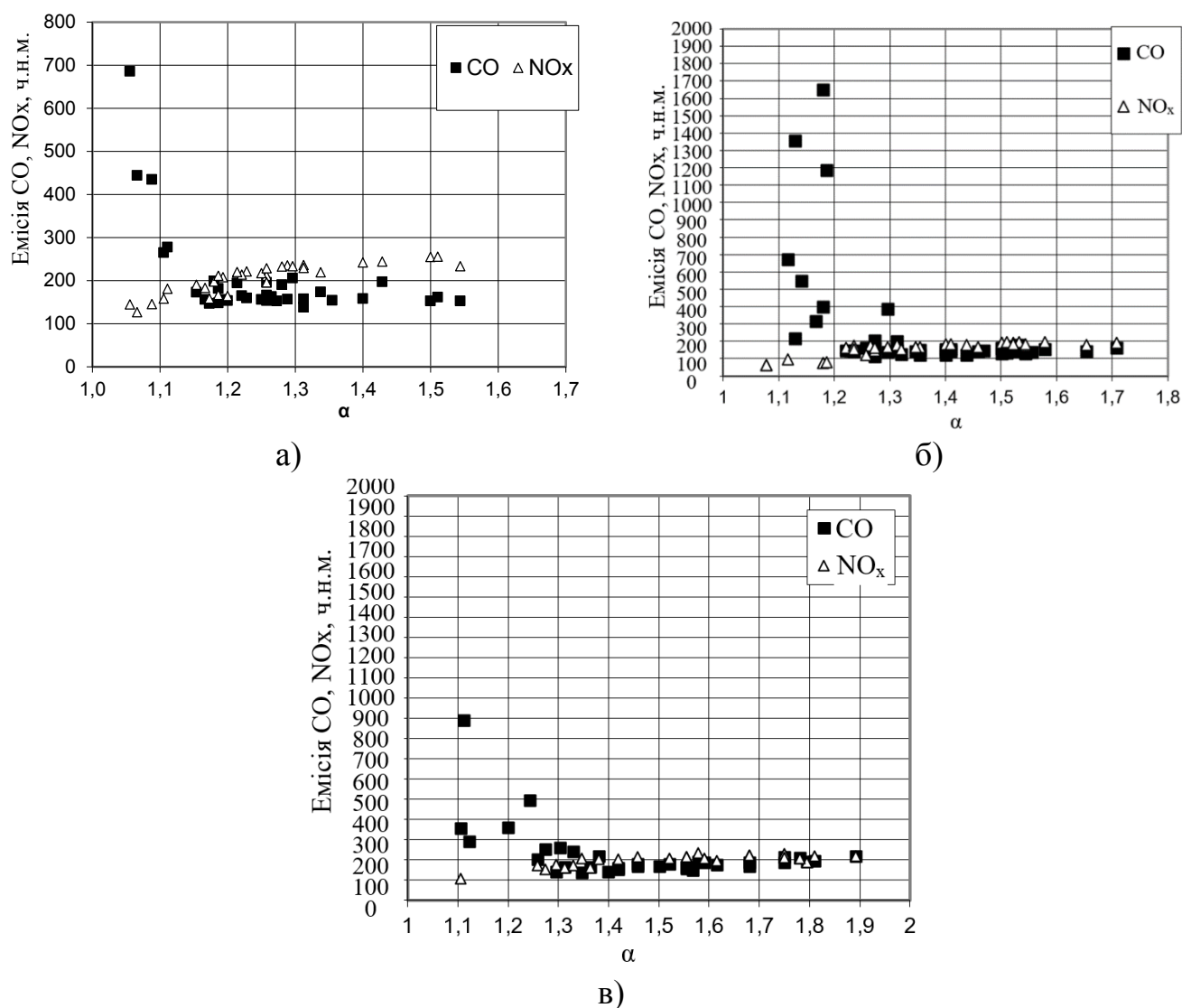


Рис. 4.5. Залежність емісії CO та NO_x від коефіцієнту надлишку повітря при спалюванні деревного палива різної вологості у «глибокій» реторті з решітками допалювання. а) суха тирса (W=12,1%), б) тирса середньої вологості (W=31,8%), в) волога тирса (W=49,5%).

У всіх випадках горіння у реторті з решітками допалювання було стабільним (без порушень) і рівномірним. Тільки при великому вмісті вологи в паливі спостерігалася невелика зона білого диму над паливом при низьких значеннях коефіцієнта надлишку повітря.

Узагальнюючі графіки інтенсивності горіння тирси і деревної тріски в залежності від вологості представлено на **Рис. 4.6**. Можна зробити висновок, що «глибока» реторта з решітками допалювання дозволяє досягати високої інтенсивності горіння в широкому діапазоні вологості палива.

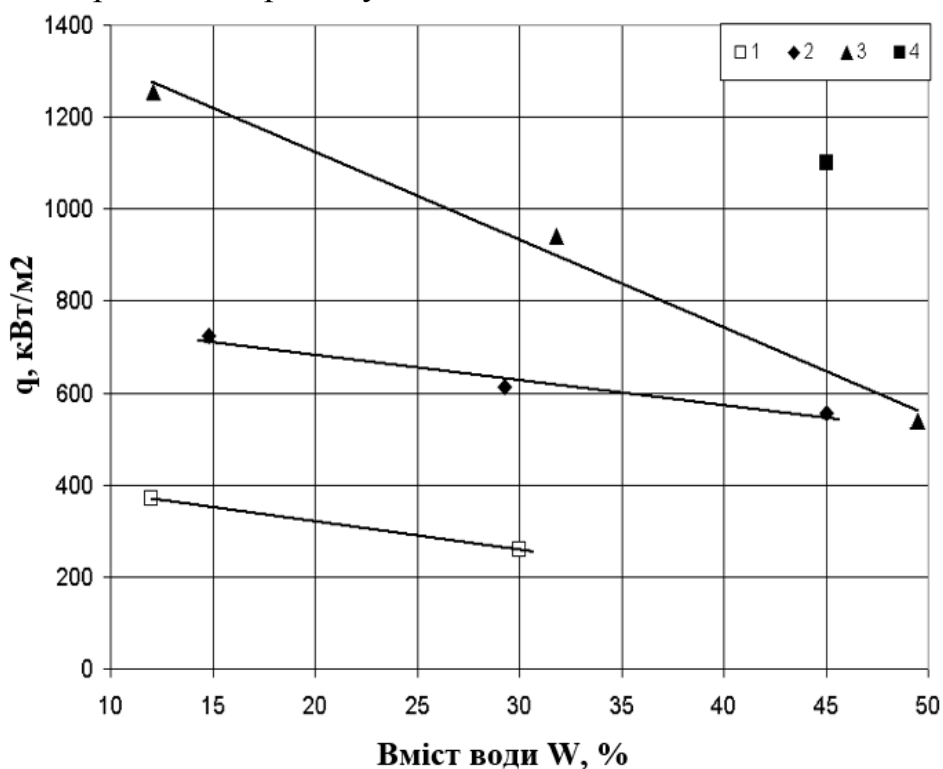


Рис. 4.6. Інтенсивність горіння деревного палива як функція його вологості. 1 – тирса в «класичній» реторті; 2 – тирса в «глибокій реторті»; 3 – тирса в «глибокій» реторті з решітками допалювання; 4 – тріска в «глибокій» реторті з решітками допалювання.

Зроблено висновок, що реторта з решітками допалювання є найкращою конструкцією для підтримки верхнього горіння при спалюванні подрібненого деревного палива різної вологості. Для такої реторти рекомендовані наступні значення інтенсивності горіння деревного палива:

- для сухої тирси ($W=31,8\%$) – 940 кВт/м^2 ;
- для вологої тирси ($W=49,5\%$) – 540 кВт/м^2 ;
- для вологої тріски ($W=45\%$) – 1100 кВт/м^2 .

Емісії CO будуть мінімальними при використанні «глибокої» реторти з решітками допалювання, особливо яскраво це виражається при малих коефіцієнтах надлишку повітря. Емісії NO_x практично не залежать від

конфігурації реторти і незначно збільшуються при збільшенні коефіцієнта надлишку повітря.

Визначено, що у діапазоні потужності 0,1-1 МВт_т для спалювання деревного палива доцільно використовувати котли з топковим пристроєм ретортного типу. Класична реторта дозволяє стійко працювати тільки з паливом вологістю до 35%. Збільшення вологості вимагає модифікації конструкції.

За результатами проведених досліджень розроблено технологію спалювання відходів деревини в котлах з топковим пристроєм ретортного типу з решітками допалювання, яка дозволяє використовувати деревне паливо з вологістю до 50%. При цьому паливо може мати неоднорідний фракційний склад, а максимальний розмір його частинок визначається пропускною спроможністю шнекового живильника. Розроблена технологія спалювання відходів деревини дає можливість збільшити інтенсивність горіння в 3-4 рази при зменшенні емісії оксиду вуглецю в 8-10 разів у порівнянні з відомими технологіями.

За результатами проведених досліджень розроблено конструкцію водогрійного деревноспалювального котла потужністю 100 кВт з топковим пристроєм ретортного типу (**Рис. 4.7**). Реторта встановлюється в нижню частину топки котла та працює наступним чином: 1) за допомогою шнекового живильника біопаливо подається по каналу 1 та підпалюється вручну як тільки з'являється в топці котла; 2) первинне повітря подається по патрубку 10 в камеру 3 та далі по соплам потрапляє у топку котла і таким чином забезпечує стабільне горіння біопалива; 3) Паливо, потрапляючи у топку котла, поступово згорає під дією первинного повітря та «витискається» свіжими порціями біомаси на похилу колосникову решітку, яку оснащено отворами для подачі вторинного повітря; 4) в свою чергу вторинне повітря надходить в цю зону топки по патрубку 11; 5) через патрубок 12 подається третинне повітря на решітку допалювання 9 для забезпечення повного згорання палива; 6) для запобігання перегрівання реторта обладнана водоохолоджувальною сорочкою, в яку вода потрапляє по патрубку 13.

Аналіз екологічної ефективності котла з топковим пристроєм ретортного типу показав, що застосування реторти з решітками допалювання дозволяє зменшити рівень емісії забруднюючих речовин до 50% в порівнянні з раніше використовуваними конструкціями топкових пристроїв.



Показники	Значення
Теплова потужність, кВт	350
Коефіцієнт корисної дії, %	83
Паливо: тюки соломи прямокутні та круглі, м	1,3x1,3x1,8 до Ø 1,8
Маса одного завантаження, кг	200-250
Час згорання, год.	3
Потреба у біопаливі, т/сезон	380
Заміщення природного газу, тис. м ³ /сезон	171

Рис. 4.8. Соломоспалювальний котел потужністю 350 кВт встановлений в с. Стави, Київська обл.

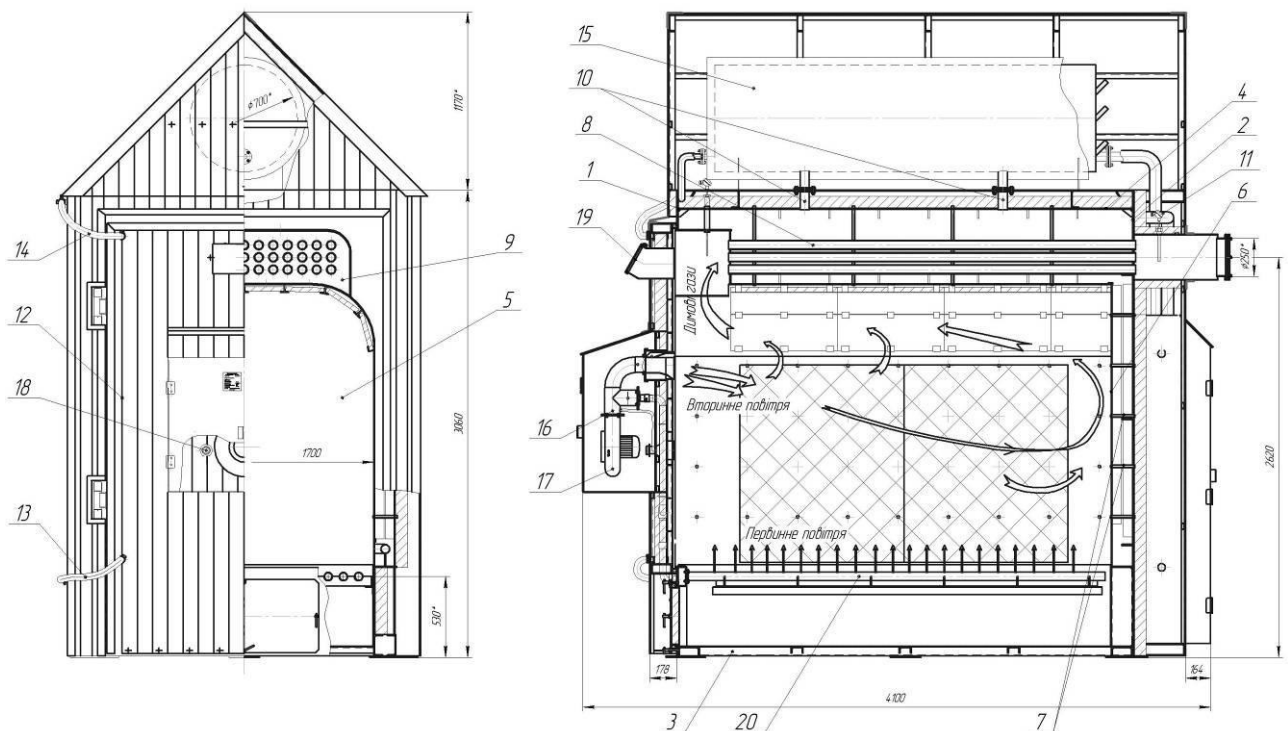


Рис. 4.9. Теплогенератор ТС-350 жаротрубно-димогарного типу.

1 – передня стінка; 2 – задня стінка; 3 – опорна рама; 4 – зовнішня стінка водяної «сорочки» топкового об’єму; 5 – топка; 6 – задня стінка топки; 7 – дистанційні анкери; 8 – димогарна труба; 9 – передня трубна дошка; 10 – патрубки подачі води до розширювального баку; 11 – патрубок подачі води до теплової мережі; 12 – двері; 13 – патрубок подачі води до водяної «сорочки» дверей; 14 – патрубок виходу води з дверей; 15 – бак розширювальний; 16 – патрубок під вентилятор; 17 – повітряний вентилятор; 18 – оглядове вічко; 19 – вибуховий клапан; 20 – решітка з труб для подачі первинного повітря.

Діаграма потоків повітря при спалюванні цілого тюка соломи у топці водогрійного котла періодичної дії представлена на **Рис. 4.10**.

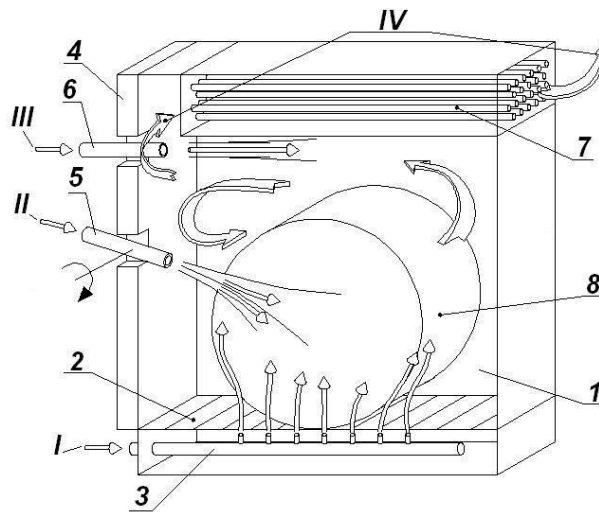


Рис. 4.10. Діаграма потоків повітря при спалюванні цілого тюка соломи у топці водогрійного котла періодичної дії.

I - первинне повітря, II - вторинне повітря, III - третинне повітря, IV - продукти згорання; 1 - топка котла, 2 - колосникова решітка, 3- сопла первинного дуття, 4 - двері топки, 5 - поворотні сопла вторинного дуття, 6 - сопла третинного дуття, 7 - конвективний пучок, 8 - тюк соломи.

Проведення експериментальних досліджень.

Експериментально досліджено теплопродуктивність, експлуатаційні показники та емісійні характеристики теплогенератора при періодичному спалюванні тюків соломи.

Проведено дослідження режимів спалювання тюків соломи в експериментальних зразках теплогенераторів, а саме:

- шляхом підбору швидкості набігання потоку повітря на тюк досягнуто стабільне вигорання тюка без погасання полум'я.
- проведено експериментальний підбір кута нахилу сопел дуття з метою усунення неповного згорання тюка соломи у виявленій «мертвій зоні» між струменями повітря по осі топки.
- досліджено режими пошарового спалювання соломи із різною швидкістю повертання сопел та виявлено спосіб спалювання зі швидким повертанням сопел та спосіб зі ступеневим повертанням сопел, які є найбільш прийнятними як для забезпечення більш стабільних показників поточної теплової потужності котла, так і для досягнення менших значень емісії CO.

Завдяки проведеним експериментальним дослідженням різних аспектів спалювання соломи та модифікації конструкції теплогенератора досягнуто стабільність процесу горіння тюка, що дозволило перейти до експериментального визначення теплопродуктивності та емісійних характеристик створеного котла з розрахунковою теплопродуктивністю 350 кВт.

Для проведення експериментів використовувалася солома спресована у круглі тюки діаметром 1,5 м та довжиною 1,2 м. Тюки соломи зважувалися за допомогою динамометра. Максимальна вага тюка сухої соломи складала близько 200...220 кг, але мінімальна вага деяких нещільно спресованих тюків складала лише 120 кг. З середини кожного тюка відбиралися проби соломи для подальших лабораторних досліджень вологості та зольності.

При виконанні експерименту в топку котла завантажувався один тюк соломи з визначеною масою. В системі управління котла налаштовувалася швидкість повертання сопел таким чином, щоб маса соломи, що за одиницю часу охоплюється вторинним повітрям, дорівнювала розрахунковій витраті соломи 110 кг/год., що відповідає передбаченому в проєкті споживанню палива при номінальній потужності котла. При масі тюка 200 кг повертання сопел повинно виконуватись протягом 1,5 с кожні 120 с. Таким чином, час спалювання тюка складає 90 хвилин. Для тюків з іншою масою час повертання сопел повинен відповідно збільшуватись або зменшуватись, пропорційно масі тюка, що забезпечує споживання соломи при спалюванні на рівні близькому до 110 кг/год.

Спалювання тюків соломи здійснювалось при постійній витраті вторинного повітря 430 $\text{нм}^3/\text{год}$, постійній витраті третинного повітря 22 $\text{нм}^3/\text{год}$. Подача первинного повітря 90 $\text{нм}^3/\text{год}$ вмикалася лише при досягненні соплами вторинного дуття крайнього нижнього положення для забезпечення випалювання залишку соломи та коксозольного залишку, що знаходяться на колосниковій решітці.

Протягом спалювання тюка проводилося вимірювання та запис параметрів, що характеризують роботу теплогенератора. Витрату первинного, вторинного та третинного повітря визначали перед експериментом на основі замірів швидкості відповідних потоків за допомогою анемометрів та замірів розмірів поперечного перерізу відповідних сопел. Вимірювання температури води на вході та виході з котла здійснювалися штатними термоперетворювачами опору системи управління котла та контролювали за показаннями скляних лабораторних термометрів, встановлених у гільзи на вході та виході котла. Температуру атмосферного повітря вимірювали скляним лабораторним термометром, встановленим в тіні. Температура продуктів згорання на виході із топки та на виході із котла вимірювалася штатними термоелектричними перетворювачами

системи управління котла. Хімічний аналіз продуктів згорання на вміст O_2 , CO_2 , CO , NO_x здійснювався за допомогою газоаналізатора testo-300 LL2.

Проектні розрахункові дані про масу води в котлі, проектні дані про масу сталі, що контактує з водою, були використані при розрахунку теплової потужності теплогенератора. З використанням отриманих експериментальних даних розраховувалися теплові втрати та коефіцієнт корисної дії котла, а також теплову потужність котла в період відсутності теплового навантаження, тобто коли теплогенератор не живить опалювальну систему школи.

Характерною особливістю котлів для спалювання цілих тюків соломи є нестационарність процесу горіння палива та теплового режиму котла і приєднаної системи теплопостачання. Котел періодично зупиняють для видалення золи та завантаження тюків соломи. Після завантаження тюків в топку котла та розпалювання соломи, протягом 20...30 хвилин відбувається поступове зростання потужності котла від нуля до 120...140% номінальної потужності, а в подальшому потужність котла зменшується до номінальної і при догоранні коксозольного залишку потужність знижується до 30...20 % від номінальної. Як правило, котли для спалювання цілих тюків соломи мають водяну сорочку ємкісного типу зі значним об'ємом води, що забезпечує акумулювання теплової енергії, що виділяється при згоранні соломи, та певне згладжування коливань параметрів теплоносія в котлі та приєднаній тепловій мережі.

Створення та забезпечення належної експлуатації водогрійних котлів дії з періодичним спалюванням цілих тюків соломи потребує проведення їх теплотехнічних випробувань — приймальних та режимно-налагоджувальних. Існуючі методики теплотехнічних випробувань котлів [233, 234, 235] зорієнтовані переважно на випробування котельних установок у режимах зі стабільним горінням палива. В чинних нормативних документах наголошується, що теплотехнічні та екологічні показники котлів повинні визначатися в умовах сталого безперервного горіння, але не в пусковий та зупиночний періоди. У зв'язку з цим існуючі методики теплотехнічних випробувань котлів не придатні для випробування котлів з періодичним спалюванням тюків, робота яких являє собою послідовність пускових, перехідних та зупиночних процесів.

Відома методика теплотехнічних випробувань котлів потужністю до 85 кВт в частині що стосується спалювання твердого палива [236] використана в якості основи для розробки викладеної нижче методики теплотехнічних випробувань котлів з періодичним спалюванням цілих тюків соломи. Нижче викладається методика теплотехнічних випробувань адаптована до котлів ємкісного типу з періодичним спалюванням цілих тюків соломи. Методика базується на методах вимірювань та аналізів, що доступні в польових умовах при налагодженні та випробуваннях котлів потужністю до 1 МВт. В теплотехніці використовуються

два підходи до визначення коефіцієнта корисної дії котлів: по прямому та зворотному тепловому балансу.

Методика визначення ККД котла періодичної дії по прямому тепловому балансу

При теплотехнічних випробуваннях котла періодичної дії значення вимірюваних величин змінюються протягом періоду випробувань. Періодом випробування вважаємо період від розпалювання завантаженої у топку наважки палива до завершення його згорання τ_{per} . Період спалювання тюків можна вважати завершеним при зростанні концентрації кисню в продуктах згорання вище 15 % об., як правило при цьому потужність котла зменшується до 20% від встановленої, а візуально оглядаючи топку можна відмітити відсутність яскравого полум'я від згорання летючих речовин при наявності окремих язиків синього полум'я над тліючим коксозольним залишком.

Оскільки процеси в котлі періодичної дії є нестационарними, то період випробувань τ_{per} можна розділити на ряд інтервалів часу τ_{int} , бажано рівних, під час яких процес горіння можна розглядати як квазістационарний. Для кожного інтервалу фіксують притаманні йому експериментальні дані, які використовують для розрахунків поточних показників для всіх інтервалів часу та усереднених показників для усього періоду випробувань.

Прямий метод визначення коефіцієнту корисної дії котла базується на визначенні відношення корисної теплової потужності, одержаної в котлі, до теплової потужності, яку можна було б одержати при повному згоранні спожитого палива.

Корисна тепла потужність котла $Q_{1,i}$ за кожен інтервал часу визначається як сума теплових потужностей, пов'язаних з нагріванням води, що пройшла через котел $Q_{w,i}$, нагріванням води, що знаходиться у котлі $Q_{ws,i}$ та нагріванням конструкцій котла, що контактують з водою $Q_{s,i}$:

$$Q_{1,i} = Q_{w,i} + Q_{ws,i} + Q_{s,i}, \quad (4.1)$$

В наведеному рівнянні не враховано акумулювання енергії залишком золи та палива у топці котла, що вносить певні неточності в визначення поточної потужності. Зважаючи на незначну зольність соломи (до 5% мас.) при повному її вигоранні таке спрощення не буде мати істотного впливу на показники роботи котла усереднені за весь період спалювання.

Теплову потужність $Q_{w,i}$, що була сприйнята водою, яка пройшла через котел, можна визначити за відомим виразом (практично це здійснюють за допомогою лічильника теплової енергії):

$$Q_{W,i} = G_W c_W (\overline{t_{out,i}} - \overline{t_{in,i}}), \quad (4.2)$$

де:

G_W — витрата води через котел;

c_W — питома масова теплоємність води;

$\overline{t_{out,i}} = \frac{t_{out,i} + t_{out,i+1}}{2}$ — середня за інтервал часу температура води на виході з

котла;

$\overline{t_{in,i}} = \frac{t_{in,i} + t_{in,i+1}}{2}$ — середня за інтервал часу температура води на вході у котел.

$t_{in,i}, t_{in,i+1}$ — температура води на вході до водогрійного котла спочатку та наприкінці інтервалу часу, °С;

$t_{out,i}, t_{out,i+1}$ — температура води на виході з водогрійного котла спочатку та наприкінці інтервалу часу, °С;

Теплову потужність $Q_{WS,i}$, що була сприйнята водою, яка знаходиться в об'ємі котла, можна визначити за виразом:

$$Q_{WS,i} = \frac{m_W c_W}{\tau_{int,i}} (t_{out,i+1} - t_{out,i}), \quad (4.3)$$

де

m_W — маса води в теплогенераторі;

$\tau_{int,i}$ — тривалість поточного інтервалу часу.

Теплову потужність, що сприйнята на підвищення температури металу котла, що контактує з котловою водою, $Q_{S,i}$ визначається за формулою:

$$Q_{S,i} = \frac{m_S c_S}{\tau_{int,i}} (t_{out,i+1} - t_{out,i}), \quad (4.4)$$

де:

m_S — маса сталевих конструкцій котла, що контактують з водою;

c_S — питома теплоємність сталі поверхонь нагріву котла.

Для кожного інтервалу часу $\tau_{int,i}$ буде визначено значення поточної теплової потужності котла $Q_{1,i}$. Середня теплова потужність котла за період спалювання однієї наважки палива буде становити:

$$\overline{Q_1} = \frac{\sum_1^n Q_{1,i} \tau_{int,i}}{\tau_{per}}. \quad (4.5)$$

Витрату палива за період випробувань можна розрахувати за формулою:

$$B = \frac{m_f - m_{un}}{\tau_{per}}, \quad (4.6)$$

де:

m_f — маса палива, завантаженого в топку котла;

m_{un} — маса незгорілої соломи, що залишилась у топці після періоду випробувань;

τ_{per} — тривалість періоду випробувань.

Коефіцієнт корисної дії водогрійного котла при спалюванні цілих тюків соломи по прямому балансу визначається за формулою:

$$\eta_d = \frac{\overline{Q_1}}{B \cdot Q_H^p}, \quad (4.7)$$

де:

Q_H^p — нижча теплота згорання соломи при її фактичній зольності та вологості.

Для визначення коефіцієнту корисної дії котла по прямому балансу за період випробувань τ_{per} , необхідно робити вимірювання величин, що використовуються, на початку і в кінці кожного інтервалу часу τ_{int} .

Найбільшу складність являє визначення маси соломи, що не згоріла m_{un} . При проведенні теплотехнічних випробувань проблематичним є експериментальне визначення нижчої теплоти згорання кожної завантаженої наважки палива (соломи) Q_H^p . Для партії соломи однорідної за видовим складом (пшенична, ячмінна, житня), бажано доставленої з одного поля, з різних частин кількох тюків відбирають збірну пробу і усереднюють у поліетиленовому мішку. Зі збірної проби відбирають аналітичні проби для лабораторного визначення теплоти згорання, вмісту вологи та золи, які в подальшому будуть використовуватись в якості базових довідкових даних для даної партії соломи — $Q_{H,R}^p, W_R, A_R$. Якщо вважати, що теплота згорання горючої речовини соломи є сталою величиною, то знаючи фактичний вміст вологи W_A та золи A_A , визначення яких навіть в польових умовах є нескладним завданням, можна розрахувати фактичну теплоту згорання Q_H^p для кожної наважки соломи, що буде завантажуватися у топку котла, по відомій залежності [237].

Перевага прямого методу полягає у відносній простоті визначення коефіцієнту корисної дії. Однак прямиий метод не дозволяє виявити фактори, що мають найбільший вплив на значення досягнутої ефективності котла.

Методика визначення ККД котла періодичної дії по зворотному тепловому балансу

При визначенні ККД за зворотним тепловим балансом необхідно визначити всі складові теплових втрат котла. Для кожного інтервалу часу протягом періоду

випробування коефіцієнт втрат тепла з фізичним теплом димових газів може бути знайдено по формулі:

$$q_{2,i} = \frac{I_{fg,i} - \alpha_{fg,i} \cdot I_a^o}{Q_H^p} \cdot (1 - q_4), \quad (4.8)$$

де:

$I_{fg,i}$ — ентальпія продуктів згорання 1 кг соломи при вимірній температурі газів та надлишку повітря на виході з котла;

I_a^o — ентальпія теоретично необхідної кількості повітря для спалювання 1 кг соломи;

$\alpha_{fg,i}$ — коефіцієнт надлишку повітря, що відповідає складу продуктів згорання після котла;

q_4 — коефіцієнт втрат тепла через механічну неповноту згорання.

Коефіцієнт втрат тепла через хімічну неповноту згорання твердого палива визначається, головним чином, наявністю в продуктах згорання водню, метану та монооксиду вуглецю, і для кожного інтервалу часу визначається на основі результатів газового аналізу продуктів згорання за формулою:

$$q_{3,i} = (r_{H_2,i} \cdot Q_{H,H_2} + r_{CO,i} \cdot Q_{H,CO} + r_{CH_4,i} \cdot Q_{H,CH_4}) \frac{v_{fg,i}^d}{Q_H^p} \cdot (1 - q_4), \quad (4.9)$$

де

$r_{H_2,i}, r_{CO,i}, r_{CH_4,i}$ — об'ємна частка водню, оксиду вуглецю та метану в сухих продуктах згорання;

$Q_{H,H_2}, Q_{H,CO}, Q_{H,CH_4}$ — нижча теплота згорання водню, оксиду вуглецю, метану;

$v_{fg,i}^d$ — розрахунковий об'єм сухих продуктів згорання на 1 кг робочої маси палива при поточному значенні коефіцієнта надлишку повітря за котлом. Значення $\alpha_{fg,i}$ визначаються за результатами аналізу продуктів згорання, а значення $v_{fg,i}^d$ можна розрахувати відповідно до методики викладеної у [237].

Коефіцієнт втрати тепла через механічну неповноту згорання неможливо виокремити для кожного інтервалу. При використанні сухої соломи та належній організації процесу після завершення горіння в топці залишається шлакозольний залишок. Шлакозольний залишок можна розглядати як паливо, що повністю не згоріло і може містити незначну кількість летючих, а вміст вуглецю може становити до 10% мас. З певною похибкою можна сказати, що саме вміст вуглецю $c_{C,ash}$ визначає величину втрати енергії. Вміст вуглецю в шлакозольному залишку можна виміряти за стандартною методикою [238]. В польових умовах при випробуваннях та налагодженні малопотужних котлів доцільно скористатися спрощеним методом, що ґрунтується на попередньому прожарюванні наважки

коксозольного залишку без доступу повітря та наступним озоленням в атмосфері повітря при температурі 700...800 °С. Зменшення маси наважки можна з певною похибкою приймати за масу вуглецю. Коефіцієнт втрати енергії через механічну неповноту згорання для всього періоду випробувань можна розрахувати за спрощеною формулою:

$$q_4 = \frac{C_{c,ash} \cdot m_{ash} \cdot Q_c}{B \cdot Q_H^p \cdot \tau_{per}}, \quad (4.10)$$

де

$C_{c,ash}$ — вміст вуглецю в шлакозольному залишку, визначається за методикою [238];

m_{ash} — загальна маса шлакозольного залишку в топці після згорання соломи;

Q_c — теплота згорання вуглецю.

Зазвичай втрати тепла в оточуюче середовище визначаються розрахунково, як сума втрат конвекцією від зовнішніх поверхонь водогрійного котла [236]. Такий підхід прийнятний для котлів безперервної дії встановлених у приміщеннях, коли величина цих втрат відносно стабільна і є незначною. Котли для спалювання цілих тюків соломи характеризуються тим, що їх встановлюють переважно на відкритому повітрі. В цьому разі втрати в оточуюче середовище визначаються не лише конвективною тепловіддачею, а й променевим теплообміном з оточуючими предметами та небосхилом. Під дією вітру через нещільності ізоляції та обшивки відбувається вентиляція атмосферним повітрям простору під обшивкою та теплоізоляції. Ці обставини призводять до зростання теплових втрат котла, а через нестабільність умов їх пряме експериментальне визначення стає практично неможливим. У зв'язку з цим втрати тепла в оточуюче середовище можна визначити опосередкованим розрахунково-експериментальним методом.

В усталеному режимі потік теплових втрат в оточуюче середовище від котлової води крізь зовнішні поверхні котла в оточуюче середовища можна визначити за рівнянням теплопередачі:

$$Q_{s,i} = \sum_1^n k_i F_i (t_w - t_e), \quad (4.11)$$

де:

k_i — коефіцієнт теплопередачі від котлової води до зовнішнього повітря через i -тий елемент котла.

F_i — площа i -того елемента котла;

t_w — поточна температура води в котлі;

t_e — температура зовнішнього повітря.

Однак для застосування цієї залежності необхідно експериментально визначити величину комплексу $\sum_1^n k_i F_i$. Для вирішення поставленого завдання розглянемо нестационарний процес охолодження котла без спалювання палива та відключеному тепловому навантаженні. За деякий період часу $d\tau$ водогрійний котел втрачає певну кількість теплової енергії:

$$d\tilde{Q}_s = \sum_1^n k_i F_i (t_w - t_e) d\tau, \quad (4.12)$$

З іншого боку втрата такої кількості теплової енергії обумовлює зниження температури конструкцій водогрійного котла та води, що міститься в ньому, на величину dt_w :

$$d\tilde{Q}_s = (m_s c_s + m_w c_w) dt_w, \quad (4.13)$$

де:

m_s, c_s — маса та питома теплоємність сталевих елементів котла, що контактують з водою ;

m_w, c_w — маса та питома теплоємність води, що заповнює котел.

Порівнюючи вирази (4.12) та (4.13) можна визначити необхідний комплекс:

$$\sum_1^n k_i F_i = \frac{(m_s c_s + m_w c_w) dt_w}{(t_w - t_e) d\tau}, \quad (4.14)$$

У рівнянні (4.14) змінною величиною є температура води у котлі t_w . Якщо зміни t_w є невеликими, то рівняння (4.14) може бути записано по методу кінцевих різниць:

$$\sum_1^n k_i F_i = \frac{(m_s c_s + m_w c_w)(t_{w1} - t_{w2})}{\left(\frac{t_{w1} + t_{w2}}{2} - t_e\right)\tau}, \quad (4.15)$$

де:

t_{w1}, t_{w2} — початкова та кінцева температури води при охолодженні котла, необхідно щоб температура води були у діапазоні робочих температур котла 50...90 °C ;

τ — проміжок часу між вимірами початкової та кінцевої температури води;

\bar{t}_e — середня температура оточуючого атмосферного повітря при охолодженні котла.

Значення комплексу $\sum_1^n k_i F_i$, що було знайдене експериментально, може використовуватись для розрахунку втрат в оточуюче середовище $Q_{5,i}$ за рівнянням (4.11) та $q_{5,i}$ методом послідовних наближень за рівнянням:

$$q_{5,i} = \frac{Q_{5,i}}{Q_{1,i}} \cdot \eta_{ind,i}, \quad (4.16)$$

Втрата тепла зі шлаком визначається для всього періоду випробувань за відомою залежністю:

$$q_6 = \frac{c_{ash} \cdot B_{ash} \cdot t_{ash}}{B \cdot Q_H^p \cdot \tau_{per}}, \quad (4.17)$$

де: $c_{ash}, B_{ash}, t_{ash}$ — питома теплоємність, маса шлаку та його температура в момент завершення випробування.

Таким чином, в результаті випробувань можна отримати значення коефіцієнтів теплових втрат $q_{2,i}, q_{3,i}, q_{5,i}$ для кожного інтервалу протягом періоду випробувань, а значення q_4, q_6 як середнє для всього періоду випробувань. Значення коефіцієнта корисної дії котла по зворотному тепловому балансу для кожного інтервалу часу методом послідовних наближень можна визначити за формулою:

$$\eta_{ind,i} = 1 - (q_{2,i} + q_{3,i} + q_4 + q_{5,i} + q_6). \quad (4.18)$$

Для визначення середнього за період випробувань коефіцієнта корисної дії котла по зворотному тепловому балансу $\overline{\eta_{ind}}$ необхідно врахувати його значення за всі інтервали часу при відповідних поточних потужностях котла:

$$\overline{\eta_{ind}} = 1 - \frac{\sum_1^n Q_{1,i} \tau_{int,i} \left(\frac{1}{\eta_{ind,i}} - 1 \right)}{\sum_1^n \frac{Q_{1,i}}{\eta_{ind,i}} \cdot \tau_{int,i}}. \quad (4.19)$$

Для всього періоду випробувань котла можна розрахувати середнє значення коефіцієнта втрат тепла з фізичним теплом димових газів $\overline{q_2}$:

$$\overline{q_2} = \frac{\sum_1^n \frac{Q_{1,i}}{\eta_{ind,i}} \cdot q_{2,i} \cdot \tau_{int,i}}{\sum_1^n \frac{Q_{1,i}}{\eta_{ind,i}} \cdot \tau_{int,i}}. \quad (4.20)$$

Аналогічним чином можна розрахувати середні за період випробувань коефіцієнти втрат енергії через хімічну неповноту згорання $\overline{q_3}$ та втрати в оточуюче середовище $\overline{q_5}$.

Опираючись на результати випробувань, приймають середню теплову потужність, витрату палива та коефіцієнт корисної дії котла за прямим балансом.

Визначення коефіцієнту корисної дії за зворотним балансом служить для контролю вимірювань та виконаних розрахунків. Допустима величина розбіжності значень коефіцієнта корисної дії котла за прямим та зворотнім балансом приймається за вказівками нормативних документів.

Визначені за зворотним тепловим балансом середні та поточні значення складових теплових втрат котла $\overline{q_3, q_{3,i}, q_4, q_6}$ дозволяють оцінити досконалість організації горіння палива на всіх етапах згорання тюка від розпалювання до завершення горіння, а значення втрат $\overline{q_2, q_{2,i}, q_5, q_{5,i}}$ дозволяють оцінити теплотехнічну досконалість конструкції котла і її відповідність реалізованим режимам роботи. Досить складна методика визначення коефіцієнта корисної дії котла за зворотним тепловим балансом дає орієнтири щодо можливих напрямів вдосконалення конструкції та режимів роботи котла впродовж циклу спалювання тюка соломи.

При розрахунку по зворотному балансу середнє значення коефіцієнту корисної дії теплогенератора за весь період спалювання тюка сухої соломи складає 78%. При розрахунку по прямому балансу коефіцієнт корисної дії теплогенератора складає 76%. Порівняння отриманих даних свідчить про достатньо хороше співпадіння результатів .

Результати експериментів

Експериментальні дані, що були отримані при спалюванні круглих тюків сухої соломи вагою 130 кг (при вологості $W=18\%$) представлені у **Табл. 4.2** та на **Рис. 4.11**. З представлених даних видно, що основний період спалювання тюка соломи під впливом струменів повітря вторинного дуття відбувався протягом 48 хвилин, а потім було увімкнено подавання первинного повітря для вигорання залишків соломи.

На початку спалювання тюка в топці та на виході із теплогенератора відмічалось різке зростання температури газоподібних продуктів згорання, що свідчило про стрімке збільшення інтенсивності процесу спалювання. В подальшому температура газів поступово знижувалась. В основний період спалювання тюка температура газоподібних продуктів згорання на виході з теплогенератора була досить близькою до розрахункової, що складає 180°C .

На початковому етапі теплогенератор демонстрував підвищену теплову потужність 405...410 кВт, тобто вона була набагато більша, ніж проєктна теплова потужність. Далі відбувалося поступове падіння теплової потужності котла та перехід до допалювання залишків соломи з подачею первинного повітря. Цей період характеризувався зменшенням теплової потужності теплогенератора до 150...110 кВт. Середня потужність теплогенератора за 48 хв. роботи складає 352,2 кВт. Через 48 хвилин у топці залишалась невелика кількість соломи, яку

допалювали за рахунок подачі первинного повітря. Допалювання відбувалося зі значним утворенням продуктів неповного згорання при великій концентрації кисню в продуктах згорання (16,6% об.). Через 50 хвилин солома, що була завантажена в топку, практично вигоріла та теплогенератор міг бути завантажений новою порцією палива.

Можна зробити висновок, що інтенсивність горіння, температура газоподібних продуктів згорання та теплова потужність теплогенератора в основний період горіння тюка сухої соломи є близькими до розрахункових параметрів. Істотним недоліком теплогенератора є те, що тривалість періоду догорання становить більше 30% від тривалості циклу горіння завантаженої соломи, а теплопродуктивність котла в цей період становить лише 28% від проектного значення.

Табл. 4.2. Експериментальні дані для сухої соломи (W=18%), що спалюється в теплогенераторі ТС-350.

Час год.: хв.	Температура води на виході з котла, °С	Температура газів на виході з топки, °С	Температура димових газів, °С	Положення сопел, %	Потік первинного повітря, м³/год	Потік вторинного повітря, м³/год	Потік третинного повітря, м³/год	O ₂ , % об.	CO ₂ , % об.	CO, ppm	Nox, ppm	CO, перераховане при O ₂ =0%, ppm	Коефіцієнт надлишку повітря, α	Теплова потужність теплогенератора, кВт
12:08	58.0	120	100	48	0	430	22							
12:14	62.8	453	183	54	0	430	22	2.1	18.27	19500	52	21667	1.11	405.9
12:18	66.0	464	182	58	0	430	22							410.2
12:20	67.6	455	182	60	0	430	22	1.9	18.46	14726	49	16191	1.10	410.2
12:24	70.7	436	179	64	0	430	22							405.9
12:26	72.3	456	177	66	0	430	22	2.1	18.27	15676	43	17418	1.11	405.9
12:28	73.9	455	170	68	0	430	22							405.9
12:30	75.3	443	162	70	0	430	22	4.1	16.34	2564	49	3186	1.24	363.0
12:32	76.7	434	182	72	0	430	22							363.0
12:34	78.0	426	192	74	0	430	22	5.7	14.79	4447	50	6104	1.37	328.6
12:36	79.3	404	179	76	0	430	22							327.9
12:38	80.3	380	169	78	0	430	22	9.0	11.6	8440	36	14770	1.75	257.7
12:40	81.3	348	152	80	0	430	22							256.6
12:42	81.9	300	140	81	0	430	22	13.6	7.15	7387	43	20963	2.84	158.9
12:44	82.5	281	135	82	0	430	22							158.7
12:46	83.1	260	127	83	0	430	22	14.0	6.77	6124	44	18372	3.00	150.3
12:50	84.3	225	125	85	0	430	22							150.1
12:52	84.7	206	124	86	0	430	22	15.9	4.93	5783	29	23812	4.12	109.5
12:58	86.0	170	117	89	90	430	22							109.3
13:00:00 –почалась подача тепла до школи								Середня теплова потужність протягом 50 хв.:						353.2
13:00	86.0	164	115	90	90	430	22	16.6	4.25	4922	34	23400	4.77	113.3
13:02	86.0	167	114	90	90	430	22							113.1
13:04	86.0	167	114	90	90	430	22							113.1
13:06	86.0	171	113	90	90	430	22							113.1
13:08	86.0	168	112	90	90	430	22							113.1

Отримані значення коефіцієнта надлишку повітря та емісії CO в перерахунку на сухі нерозведені продукти згорання з концентрацією кисню 0%, наведені на **Рис. 4.11**. З наведених даних слідує, що проєктні значення коефіцієнту надлишку повітря 1,1...1,4 були досягнуті на першому етапі горіння тюка, але в подальшому вони зросли до 3...4,1, тобто значно перевищили розрахункове значення 1,4. В середньому, для циклу спалювання одного тюка соломи коефіцієнт надлишку повітря складав 2,1. Таке значення коефіцієнта надлишку повітря високе і необхідно продовжувати роботу щодо його зниження з метою покращення взаємодії палива та повітря в топці соломоспалювального теплогенератора ТС-350.

Найнижчі значення емісії CO 3100-6100 чнм (в перерахунку на продукти згорання з вмістом кисню 0%об.) спостерігалась при значеннях коефіцієнту надлишку повітря 1,24 – 1,37, тобто протягом періоду, що був найбільш наближеним до розрахункових умов горіння. На початковому та кінцевому етапах спалювання тюків сухої соломи емісія CO складала 20000 ррм. Середнє значення емісії CO для всього періоду спалювання тюка складає 17350 чнм. У відповідності з чинним стандартом [239] для котлів третього класу допускається емісія CO 19200 чнм (або 24000 мг/нм³). Можна стверджувати, що за значенням емісії CO теплогенератор ТС-350 задовольняє вимогам, що встановлені для котлів третього класу. Для котлів другого класу допустимою є емісія 8000 чнм (10000 мг/нм³). Розглядаючи основний період горіння, можна відмітити, що емісія складала 3100-6100 чнм. Це дає підстави ставити завдання щодо подальшої орієнтації на досягнення вимог для котлів другого класу при подальшій доводці котла ТС-350. При роботі котла ТС-350 емісія оксиду азоту складала лише 30-50 чнм, що менше допустимої емісії для газових котлів першого класу.

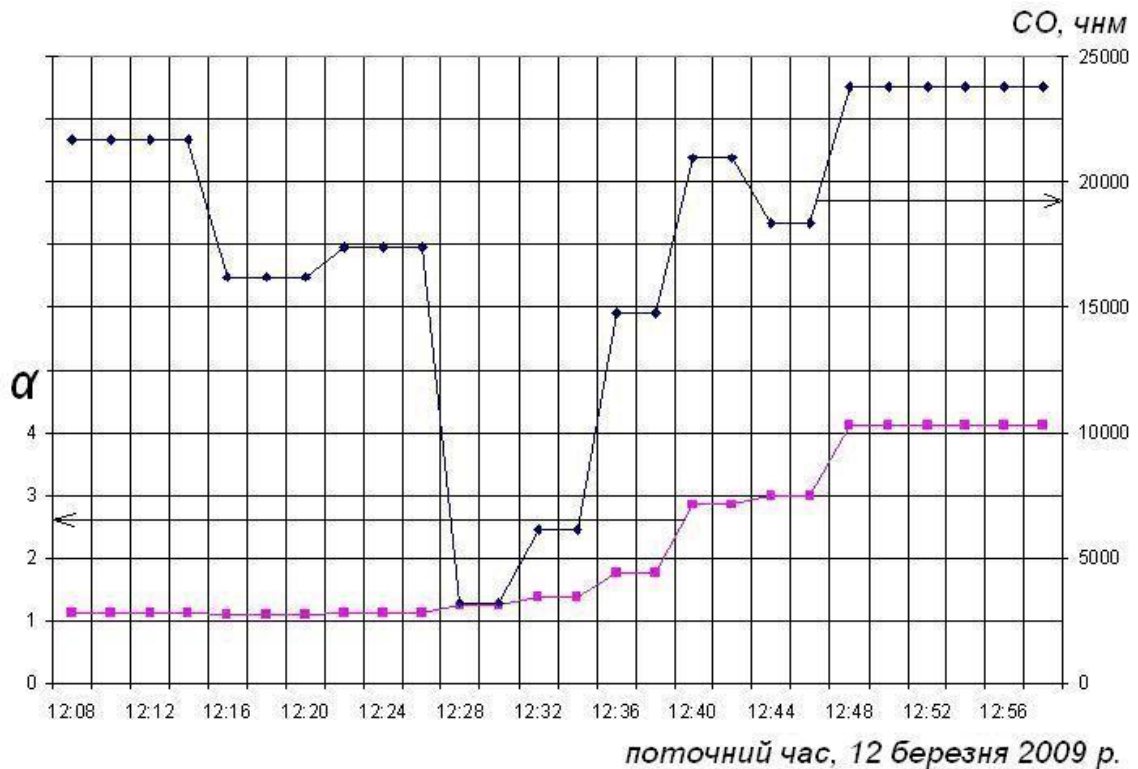
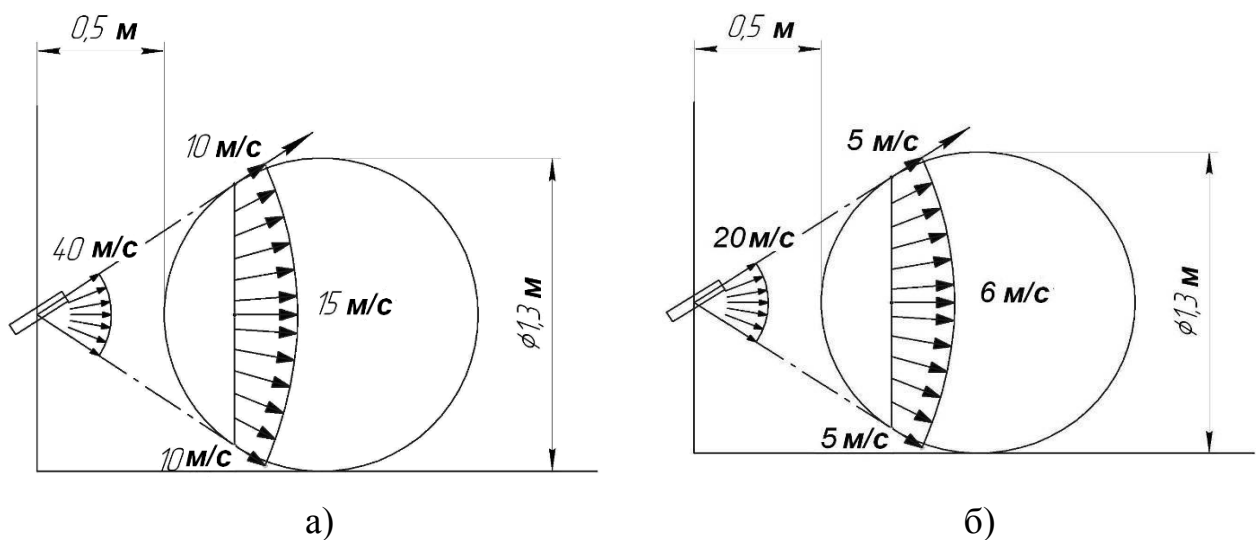


Рис. 4.11. Зміна величин коефіцієнту надлишку повітря та емісії CO протягом циклу спалювання одного тюка сухої соломи.

В ході холодних випробувань встановлено, що фактична швидкість струменів вторинного повітря на зрізі дугтьових сопел становила 39-41 м/с. При встановленні тюка соломи на відстані 0,5 м від зрізу сопел, швидкість повітряного потоку, що набігає на тюк соломи становила від 10 до 15 м/с, отримане поле швидкостей показано на **Рис. 4.12 а**.

При гарячих пусках котла для зменшення швидкості струменя дугтьового повітря та забезпечення його розрахункової витрати поперечний переріз сопел було збільшено. Крім того, була змінена форма сопла з круглої діаметром 45 мм на прямокутну 70x40 мм з вертикальною орієнтацією більшої осі сопла (**Рис. 4.13**). Прямокутний переріз сопла формує плаский струмінь витягнутий по вертикалі, який гаситься повільніше ніж круглий і проникає на більшу відстань, що має забезпечувати рівномірне горіння тюка при зміщенні фронту горіння від початку тюка до його кінця. По центру сопел установили вертикальні поворотні лопатки, які дозволяють відхилити струмені повітря від осі сопла в горизонтальній площині.



а) в початковій конструкції котла;
 б) після реконструкції сопел вторинного дуття.

Рис. 4.12. Швидкість повітря на виході із сопел та швидкість набігання струменя повітря на тюк при повороті сопла вторинного дуття.



Рис. 4.13. Початкова конструкція круглого сопла вторинного дуття (зліва) та реконструйоване сопло вторинного дуття зі зниженою швидкістю повітря (справа).

В результаті після реконструкції сопел вторинного дуття швидкість повітряного струменя на зрізі сопла була зменшена до 22-23 м/с, а швидкість набігання струменя на тюк соломи становила 5-6 м/с (Рис. 4.12 б). При таких швидкостях струменів дуттьового повітря при спалювання сухої соломи було стабільним без погасання летючих речовин, що виділяються з масиву соломи.

При дослідженні спалювання тюків соломи було виявлено, що майже третина тюка соломи, що знаходиться на поздовжній осі топки, залишалась незгорілою і не руйнувалася під дією струменів дуттьового повітря. Вимірювання поля швидкостей показало, що по вісі топки між струменями

повітря утворюється «мертва» зона з дуже низькою швидкістю повітря. Візуалізація струменів повітря за допомогою диму дозволила виявити, що струмені повітря після виходу з сопел поступово змінюють напрям і «прилипають» до бокових стінок топки, звертаючи у вільний проміжок між тюком і боковими стінками топки (Рис. 4.14 - 4.15). В результаті цього вигорання частини тюка по центру топки значно уповільнювалося.

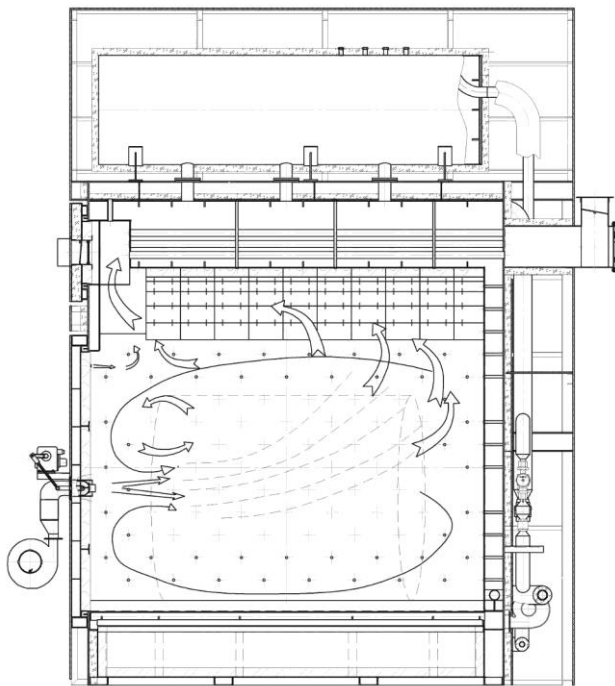


Рис. 4.14. Характер руху потоків повітря та продуктів згорання в топці котла.

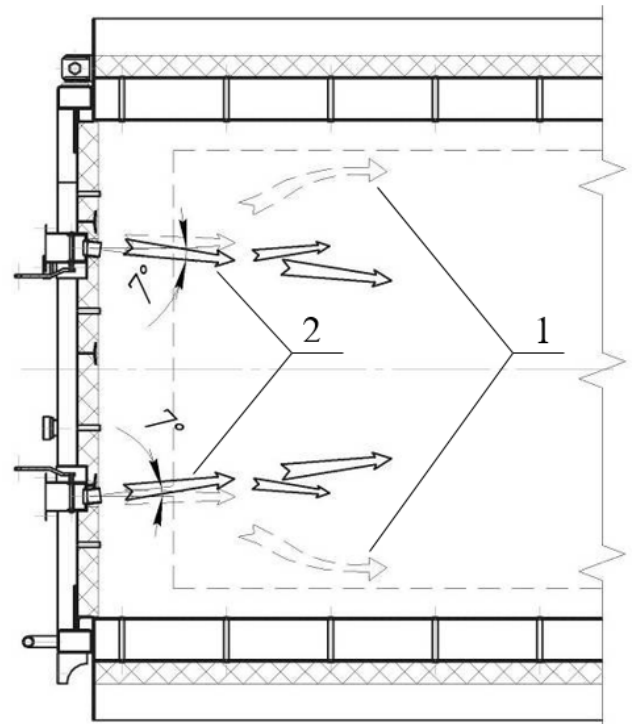


Рис. 4.15. Напрямок повітряних потоків в топці до (1) та після (2) розвертання сопел.

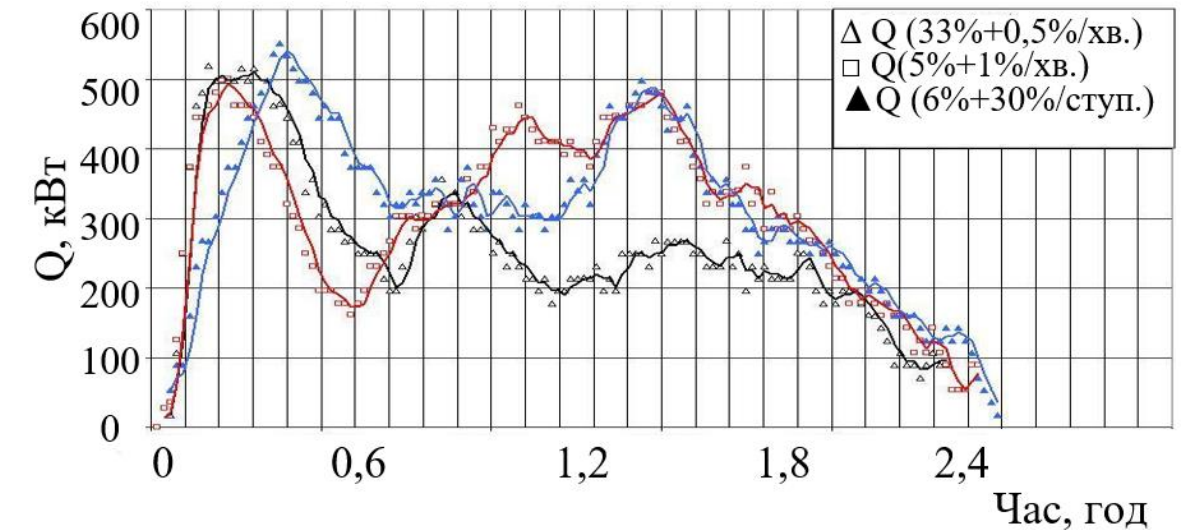
Для більш рівномірного вигорання тюка соломи здійснено поворот струменів дуттьового повітря в горизонтальній площині у напрямку до центру топки. З цією метою сопла перевстановлювали на головці розподілу повітря з наближенням на кілька градусів до центральної вісі топки. Експериментально визначено, що оптимальне значення кута розвороту сопел становить $6-7^\circ$. Заміри аеродинаміки потоків при холодній топці показали, що між струменями по центру топки швидкість повітря збільшилась і не спостерігалось відхилення потоків до бокових стінок топки. Це рішення дозволило зробити вигорання тюка більш рівномірним по ширині топки.

Під час тривалої перевірки працездатності теплогенератора ТС-350 було досліджено вплив швидкостей повертання сопел на якість спалювання тюків

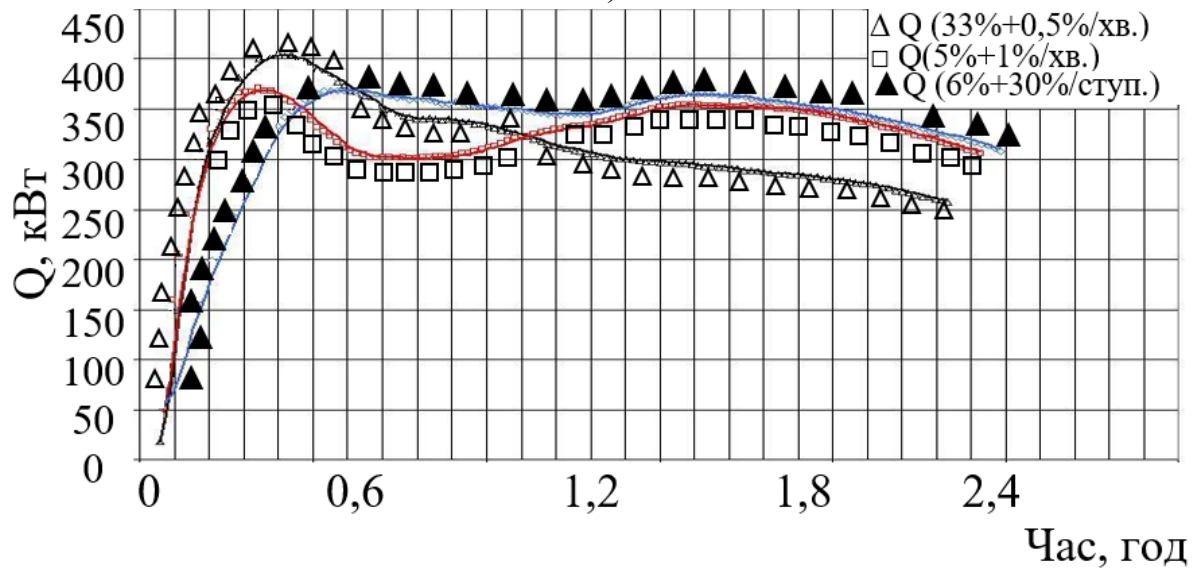
соломи. Підхід щодо зміни швидкості повороту сопел вторинного дуття виявився дієвим для впливу на теплопродуктивність котла та його емісійні характеристики. При швидкому повертанні сопел спостерігалось формування характерної «гірки соломи» - поступового підвищення висоти шару соломи від середини до найвіддаленішої від сопел частини тюка та покращення результатів спалювання. Було вирішено організувати таку «гірку соломи» від самого початку спалювання тюків. Для досягнення цього систему управління котла запрограмували на швидке повертання сопел, з середньою швидкістю 1.0%/хв. Для цього на контролері задається мінімальний і максимальний кут повертання сопел а також час за який сопло має пройти від мінімального до максимального значення, ці кути підібрані в залежності від розмірів завантаженого в топку палива (величини тюка/тюків). Такий підхід гарантує те, що поверхня тюка соломи завжди буде знаходитись під впливом повітряних струменів із сопел. Організовано ніби поглажування струменем повітря по поверхні незгорівшої частини тюка. Альтернативний (ступеневий) поворот сопел здійснюється кожні 30 хвилин на кут що складає 30% від кута між крайніми позиціями відхилення сопел.

Спостереження за роботою котла показали, що безпосередньо перед соплами солома вигорає і зона спалювання уступом переміщується від початку до кінця тюка. На наступному етапі, після повертання сопел, процес розпочинається спочатку. Для спалювання 220 кг соломи, що були завантажені у топку у вигляді маленьких тюків, знадобилося лише три нетривалих послідовних повертання сопел. Перший поворот сопел здійснювався від 0% до 30...35%, другий – від 30...35% до 60...70%, третій – від 60...70% можливої амплітуди повертання сопел від найвищої до найнижчої позиції сопел. Зроблено висновок, що в місцях дії струменів повітря на тюк виникає інтенсивне реагування соломи та повітря з глибоким проникнення повітря та розжарених продуктів згорання у солом'яну матрицю.

Результати розрахунків поточної теплової потужності котла при пошаровому спалюванні тюків соломи з різними способами подачі вторинного дуття представлені на **Рис. 4.16 а**. З представлених даних можна побачити, що відразу після запалювання тюка при всіх способах спалювання починається підвищення теплової потужності практично від нульового значення до величини, що значно перевищує (більше ніж на 50%) рівень розрахункової потужності. Це можна пояснити тим, що на початковій стадії загоряється значна площа зовнішнього шару тюка.



а)



б)

Рис. 4.16. Дослідження режимів пошарового спалювання соломи в теплогенераторі 350 кВт із різною швидкістю повертання сопел.

а) Поточна теплова потужність; б) Середня теплова потужність;

1) сопло встановлюється на 33% від мінімального значення положення сопла і далі повертається зі швидкістю 0,5%/хв, поки не дійде до максимального значення (кута) положення сопла; 2) сопло встановлюється на 5% від мінімального значення положення сопла і далі повертається зі швидкістю 1%/хв, поки не дійде до максимального значення (кута) положення сопла; 3) сопло встановлюється на 6% від мінімального значення положення сопла і далі повертається тільки тричі на 30% можливої амплітуди повертання сопел від найвищої до найнижчої позиції сопел.

Після обгорання поверхні тюка реагуюча поверхня знаходиться лише у зонах дії струменів вторинного повітря і, відповідно, відбувається зменшення потужності котла. При повільному повертанні сопел зниження теплової потужності теплогенератора є дуже значним – поточна потужність знижується до 50% від номінальної, а при швидкому повертанні сопел до 60%. При ступінчастому повертанні сопел поточна потужність котла зменшується лише до 85% від номінальної. Після спаду теплової потужності відбувається поступове її відновлення. Відновлення теплової потужності відбувається швидше при швидкому повертанні сопел, ніж при повільному повертанні сопел. При ступеневому повертанні сопел теплова потужність котла відновлюється практично до найвищого рівня при наступному повертанні сопел.

На **Рис. 4.16 б** показана середня теплова потужність котла при різних способах спалювання соломи. З наведених даних ми можемо зробити висновок, що більш стабільна середня теплова потужність теплогенератора забезпечується при швидкому повертанні сопел на 1%/хв. та при ступеневому повертанні сопел.

Емісія CO і твердих часток протягом циклу спалювання одного завантаження тюків соломи в теплогенераторі 350 кВт представлена на **Рис. 4.17 – 4.18**.

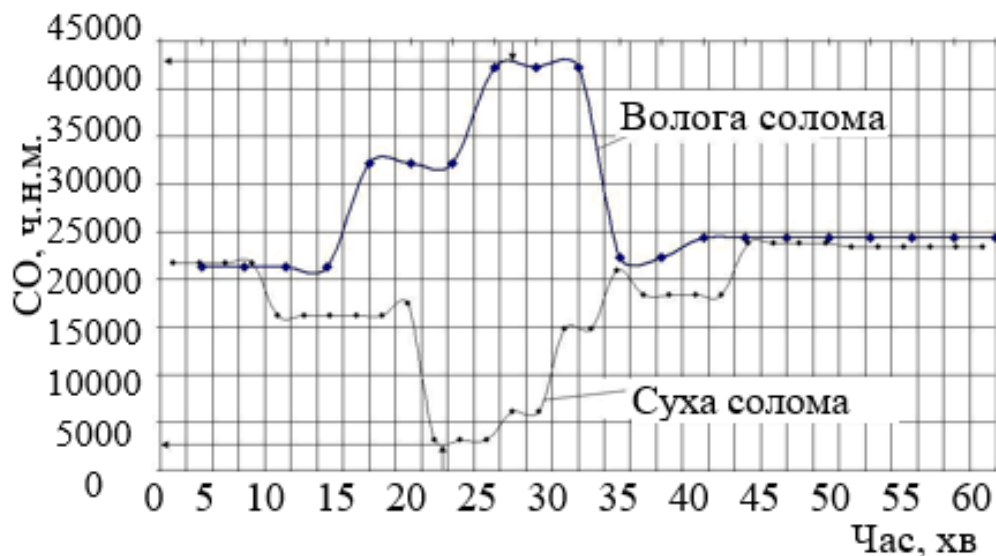


Рис. 4.17. Емісія CO при спалюванні тюків вологої ($W=30\%$) та сухої ($W=18\%$) соломи.

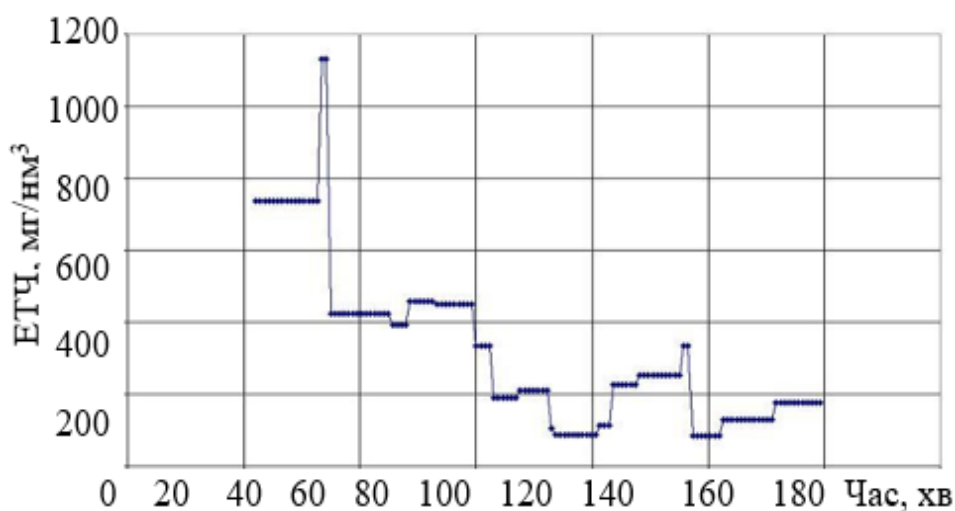


Рис. 4.18. Емісія твердих часток протягом циклу спалювання одного завантаження тюків соломи у теплогенераторі 350 кВт при швидкому повертанні сопел (в перерахунку на сухі продукти згорання з вмістом 6% об. O_2).

При швидкому повертанні сопел отримано значне скороченні емісії СО при порівняно невеликому значенні коефіцієнту надлишку повітря. Досягнуто значне підвищення температури газоподібних продуктів згорання на виході з топки. Це можна пояснити тим, що зона горіння значно менша, але з високою інтенсивністю горіння. При цьому променевий теплообмін з водоохолоджуваними поверхнями топки відносно низький, через що теплота зберігається у газоподібних продуктах згорання.

За характеристиками емісії СО теплогенератор ТС-350 задовольняє вимогам міждержавного стандарту ГОСТ 30735—2001, що встановлений для котлів третього класу. Згідно досягнутих результатів є підстави вважати можливим подальше досягнення вимог для котлів другого класу при технічній доводці котла ТС-350. За отриманим середнім коефіцієнтом корисної дії 76-78%, теплогенератор відповідає вимогам ГОСТ 30735-2001 для котлів другого класу, що працюють на твердому паливі.

Розроблено, досліджено та виготовлено дослідно-промислові зразки соломоспалювальних котлів потужністю 100, 250 та 350 кВт (**Рис. 4.19 – 4.20**). Підтверджено їх високі енергетичні та екологічні показники.



Показники	Значення
Теплова потужність, кВт	250
Коефіцієнт корисної дії, %	81
Паливо: тюки соломи круглі, м	до Ø 1,5
Маса одного завантаження, кг	200-250
Час згорання, год.	3
Потреба у біопаливі, т/сезон	270
Заміщення природного газу, тис. м ³ /сезон	122

Рис. 4.19. Соломоспалювальний котел потужністю 250 кВт в с. Халча, Київська обл.



Показники	Значення
Теплова потужність, кВт	100
Коефіцієнт корисної дії, %	78
Паливо: тюки соломи прямокутні, м	0,8x0,8x1,0
Маса одного завантаження, кг	35
Час згорання, год.	1-2
Потреба у біопаливі, т/сезон	115
Заміщення природного газу, тис. м ³ /сезон	49

Рис. 4.20. Соломоспалювальний котел потужністю 100 кВт.

Також розроблено рекомендації щодо проектування та організації експлуатації котельні при її дооснащенні котлом для спалювання тюків соломи. Рекомендації містять вимоги щодо організації забезпечення тюкованою соломною, технічні рішення з узгодження водно-хімічного та гідравлічного режиму соломоспалювального котла та наявних котлів і теплової мережі, рішення з узгодження їх температурних графіків, балансування теплової потужності котла та теплового навантаження теплової мережі, наведено рекомендовані схеми включення соломоспалювального котла та існуючих газових або вугільних котлів, наведено рекомендовані технічні рішення щодо захистів та автоматизації котельні, оснащеної соломоспалювальним котлом.

4.3. Розроблення технології та експериментальні дослідження процесів спалювання малих тюків соломи в водогрійних котлах ретортно-сигарного типу

Створений та виготовлений топковий пристрій лоткового типу для безперервного спалювання малих тюків соломи був випробуваний в Інституті технічної теплофізики на стенді №1-04, призначеному для дослідження горіння твердого палива.

Стенд складається з таких основних вузлів та деталей: експериментальний топковий пристрій, блок теплообмінний з топковою камерою, вентилятор, циклон, димосос, система оборотного водопостачання, система електроживлення і управління, прилади для вимірювання параметрів процесу горіння і контролю за станом обладнання. На **Рис. 4.21** показано вигляд експериментального стенду для дослідження процесів горіння твердого палива.



Показники	Значення
Теплова потужність, кВт	50 - 100
Коефіцієнт корисної дії, %	85
Паливо: тюки соломи прямокутні, м	0,9*0,5*0,4
Маса одного завантаження, кг	12-15

Рис. 4.21. Загальний вигляд реконструйованого експериментального стенду з лотковим топковим пристроєм.

Наявна комплектація та конструкції експериментального стенду забезпечували досягнення технічних характеристик, наведених у **Табл. 4.3**.

Табл. 4.3. Технічні дані експериментального стенда.

1	Поверхня нагріву теплообмінного блоку, м ²	
1.1	- Радіаційної камери м ²	4,8
1.2	- Першого конвективного пучка м ²	4,4
1.3	- Другого конвективного пучка м ²	3,4
2	Об'єм топкового простору, м ³	0,977
3	Ступінь екранування топкової камери	0,8
4	Розрахунковий коефіцієнт забруднення променесприймальних поверхонь топки	0,36
5	Теплова потужність теплообмінного блоку, не більше, кВт	90
6	Витрата води через теплообмінний блок, м ³ /год.	4,5
7	Робочий тиск води на виході з блоку	атмосферний
8	Максимальна температура води на виході з блоку, °С	80
9	Розрахункова витрата газів через теплообмінний блок, не більше, нм ³ /год.	270
10	Розрахункова температура газів на вході в блок, не більше, °С	750
11	Розрахункова температура газів на виході з блоку, °С	175
12	Розрідження газів в радіаційній камері теплообмінного блоку, Па	20-30
13	Тип пристрою подачі твердого палива	лотковий
14	Площа дзеркала горіння зони горіння з зоною допалювання, м ²	0,282
15	Тиск дуттьового повітря, Па	1300
16	Витрата дуттьового повітря в зону горіння, м ³ /год.	0-41
17	Витрата дуттьового повітря в зону допалювання, м ³ /год.	0-10
18	Витрата третинного повітря, м ³ /год.	0 - 30
19	Ємкість розширювального бака, м ³	0,36
20	Споживання води з водопроводу	
20.1	- Первинне заповнення системи, кг	900
20.2	- При експлуатації стенду, не більш, кг/год.	10
21	Розрахунковий вміст пилу в очищених продуктах згорання, мг/нм ³	40
22	Електричне живлення стенду	3 фази, 380 В
23	Встановлена електрична потужність стенду, кВт	9,0
24	Споживана електрична потужність, кВт	5,0
25	Режим роботи	повторно-короткочасний

Технологічна схема експериментального стенду зі змонтованим топковим пристроєм лоткового типу показана на **Рис. 4.22**. Стенд складається з блоку теплообмінного з топковою камерою 1, в нижній частині якої встановлений експериментальний топковий пристрій 3, оснащений колосниковою решіткою 4, яка сполучена з лотковим пристроєм 5 для безперервної подачі малих тюків соломи в об'єм топки.

Патрубок виходу димових газів з теплообмінного блоку через заслінку регулювання тяги 6 газходами сполучений з циклоном 7 і димососом 8, вихлоп якого прямує в канал відведення димових газів 9. Для подачі повітря під колосникову решітку призначений дуттьовий вентилятор 10 з розподільним трубопроводом, на якому встановлені витратомірні діафрагми 11, 13, 15, 17, 19, 21, 43 із регулювальними кранами 12, 14, 16, 18, 20, 22, 44.

Поза приміщенням на рівні, вищому за теплообмінний блок 1, встановлений розширювальний бак 23 з водовказівною трубкою. Вихідний водяний патрубок теплообмінного блоку 1 сполучений трубопроводом 24 з розширювальним баком 23, причому на цьому трубопроводі запірні пристрої не встановлюються. Вихлопний трубопровід 25 має діаметр 50 мм і з'єднує розширювальний бак з атмосферою, причому на цьому трубопроводі також не встановлюються запірні пристрої. Нижній патрубок розширювального бака трубопроводом 26 з краном 27 підключений до вхідного патрубка 46 теплообмінного блоку 1. Трубопровід 28 з'єднує розширювальний бак з повітряним калорифером 29. Калорифер оснащений двома повітряними осьовими вентиляторами 30. Вихідний патрубок калорифера 29 сполучений зі всмоктуючим трубопроводом основного 32 і резервного 36 циркуляційних насосів, які оснащені запірними кранами 31, 34, 35, 38 і зворотними клапанами 33 і 37. На подавальному трубопроводі встановлений фільтр 39, лічильник теплової енергії 40, запірний кран 41. Подавальний трубопровід підключений до вхідного патрубка 46 теплообмінного блоку 1. Вода з водопроводу поступає через кран 42 для первинного заповнення системи і періодичного її поповнення. Зольний ящик 45 призначений для видалення золи після закінчення експериментів. Стенд оснащений щитом електроживлення і управління 51.

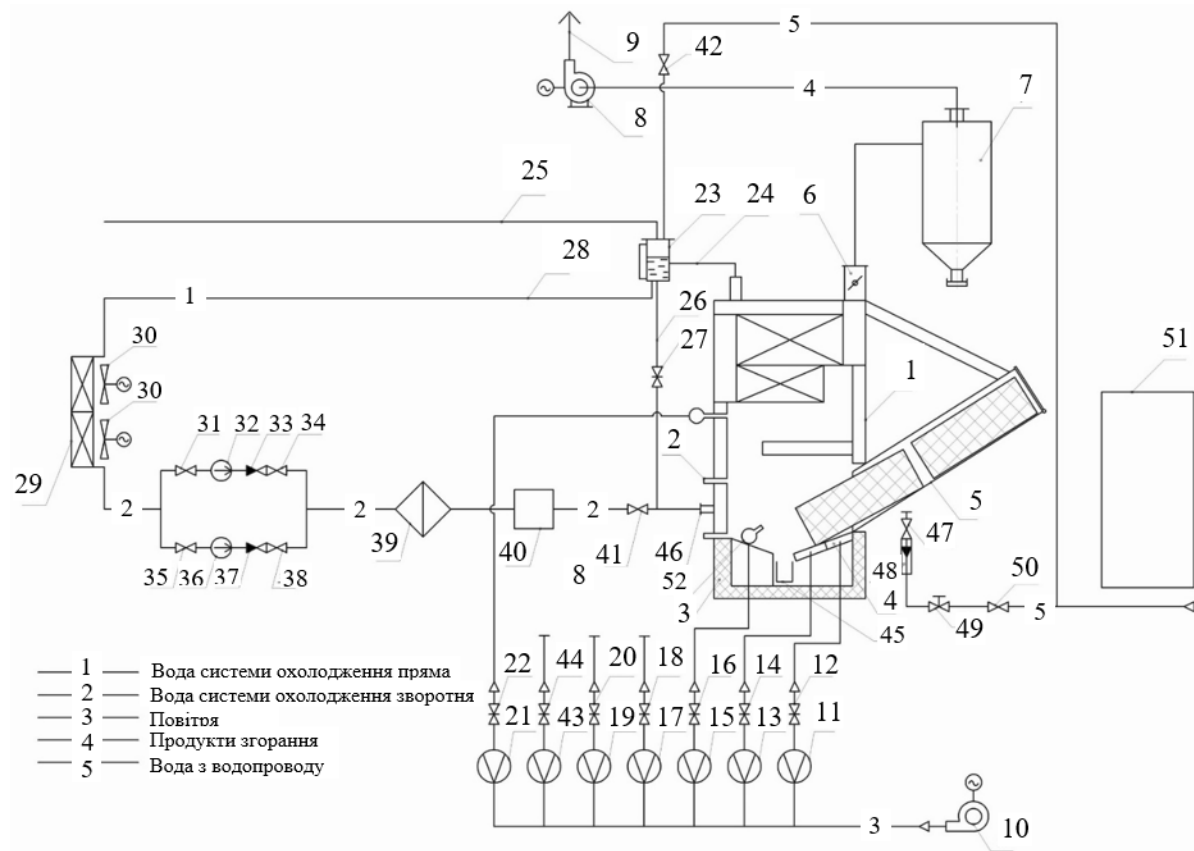


Рис. 4.22. Схема експериментального стенда:

- 1 – блок теплообмінний; 2 – оглядове віконце; 3 – топковий пристрій; 4 – колосникова решітка; 5 – лотковий пристрій; 6 – заслінка тяги;
 7 – циклон; 8 – димосос; 9 – канал відведення продуктів згорання; 10 – вентилятор дугтьовий; 11, 13, 15, 17, 19, 21, 43 – діафрагми
 витратомірні; 12, 14, 16, 18, 20, 22, 27, 31, 34, 35, 38, 41, 42, 44, 50 – крани; 23 – розширювальний бак; 24 – вихідний патрубок;
 25 – вихлопний трубопровід; 26, 28 – трубопроводи; 29 – калорифер; 30 – вентилятор осьовий; 32, 36 – циркуляційні насоси;
 33, 37 – зворотні клапани; 39 – фільтр; 40 – лічильник теплової енергії; 45 – зольний ящик; 46 – вихідний патрубок; 47 – вентиль ротаметра;
 48 – ротаметр; 49 – клапан електромагнітний; 51 – щит електроживлення і управління, 52 – сопла вторинного повітря.

Слід зазначити, що характеристики стенду не дозволяють випробовувати лотковий топковий пристрій на максимальній розрахунковій потужності. Обмежуючим фактором є недостатній тиск повітря, що створюється дуттьовим вентилятором і як наслідок неможливість подати повітря у зону горіння у кількості, що відповідає розрахунковій потужності топкового пристрою. Іншими обмежуючими факторами є обмежена максимальна теплова потужність стенду – 80 кВт та максимальна температура нагріву води – 80 °С, причому перевищення цих показників на стенді обмежене правилами державного нагляду у сфері котлобудування. У зв'язку з цим, топковий пристрій випробовувався на частковій потужності, що не створювало перешкод для перевірки його працездатності та емісійних характеристик.

Для спостереження за роботою експериментального стенду, проведення експериментів і отримання експериментальних даних передбачено використання таких приладів:

1) корисна теплова потужність теплообмінного блоку визначається за допомогою лічильника теплової енергії ультразвукового SONOHEAT-T 2WR5453;

2) для вимірювання розрідження в топці – тягонапоромір ТНЖ;

3) для вимірювання тиску у водяному об'ємі теплообмінного блоку – манометр М0-1,6;

4) для вимірювання тиску повітря і розрідження по тракту димових газів – використання U-подібних дифманометрів;

5) для вимірювання витрати повітря, що подається в окремі зони топкового пристрою, – вимірювальні діафрагми з U-подібними дифманометрами і індивідуальними тарувальними кривими;

6) для вимірювання концентрацій кисню, двоокису вуглецю, окислу вуглецю, і сумарного змісту оксидів азоту в продуктах згорання – газоаналізатор TESTO300 в комплекті з газовідбірним зондом;

7) для контрольних вимірювань концентрацій кисню та двоокису вуглецю – газоаналізатор хімічний КГА-100 разом з апаратом для відбору та зберігання проб газів (апарат Коро);

8) для вимірювання температури води в системі оборотного водопостачання – термоперетворювачі опору платинові, що входять до складу лічильника теплової енергії ультразвукового, скляних лабораторних термометрів ТЛ-2, ТЛС-2, ТТЖ-М, СП-В;

9) для вимірювання температури димових газів по газовому тракту теплообмінного блоку передбачено використання термопар ТХА-0515 в

комплекті з багатоканальним регулятором температури ПКРТ-0103;

10) для вимірювання температури в топці та на колосниковій решітці використані термопари безкорпусні типу ХА, закладені в цеглу футерування, і підключені до багатоканального регулятора температури ПКРТ-0103;

11) для реєстрації температур багатоканальний регулятори температури ПКРТ-0103 через вихід RS232 підключений до персонального комп'ютера де дані записувалися у вигляді текстових файлів;

12) для вимірювання витрати палива використовувалися секундомір "Слава" і ваги пружинні "Bruth";

13) для визначення вологості палива – сушильна шафа і ваги лабораторні "Acculab" VIC-212;

14) для визначення зольності палива, шлакозольного залишку і леткої золи – муфельна піч ПМ-8 з керованим нагрівом до 850 °С і ваги лабораторні "Acculab" VIC-212.

Методика експериментальних досліджень роботи топкового пристрою лоткового типу для безперервного спалювання малих тюків соломи

Для проведення досліджень використовували тюковану житню солому. Паливо (малі тюки соломи) поміщали в лоток топкового пристрою 5 (Рис. 4.22). Перший тюк під дією власної ваги сповзає по лотку в топку, де зупиняється упершись в колосникову решітку 4. Конструкція та кут нахилу лотка, а також кут нахилу колосникової решітки 4, підбирались таким чином щоб в об'ємі топки знаходилася тільки частина тюка, яка і буде горіти.

В зону горіння колосникової решітки надходить первинне повітря, що подається вентилятором 10 по повітропроводу через діафрагму 11 з регулюванням витрати повітря краном 12. У місці введення первинного повітря утворюється зона займання і починається горіння палива. Леткі продукти розкладання палива і продукти згорання проходять через шар палива, що горить, і виходять в топковий простір.

За задумом коксозольний залишок з верху гори палива під власною вагою має зсипатися і остаточно вигорати в зоні допалювання колосникової решітки 4, під яку подається частина первинного повітря через діафрагму 13 з встановленням витрати повітря краном 14. Зола має переміщатися по колосниковій решітці 4, остаточно вигорати, охолоджуватись і зсипатися в зольний ящик 45.

Продукти неповного згорання над шаром палива мають змішуватися з вторинним повітрям, що подається через діафрагму 15, кран 16 та сопла

вторинного дуття 52, і реагувати у футерованій зоні топки з вигоранням летких. Потім продукти згорання проходять під нагрітим вогнетривким склепінням топки, розвертаються на 180°, проходять під водоохолоджуваною аркою топки. Продукти згорання, охолоджені в топковій камері до температури нижче 650 °С, поступають в димогарні труби першого конвективного пучка теплообмінного блоку, де охолоджуються до температури близько 300 °С, і через поворотну камеру поступають в димогарні труби другого конвективного пучка, де охолоджуються до температури не вище 170 °С. Потім продукти згорання через заслінку регулювання тяги 9 по газоходу поступають у відцентровий циклон 7, де очищуються від твердих частинок. З циклону продукти згорання димососом 8 подаються в канал відведення продуктів згорання 9.

За рахунок тепла, яке віддали димові гази, в теплообмінному блоці 1 нагрівається вода, що подається насосом 32 (або 36) у вхідний патрубок 46. Нагріта вода з вихідного патрубка по трубопроводу 24 повертається в розширювальний бак 23, а потім поступає для охолодження в повітряні калорифери 29. При роботі устаткування відбувається поступове підвищення температури води. При досягненні водою температури 50 °С включаються вентилятори 30, що продувають атмосферне повітря через міжтрубний простір калориферів 29.

Створення необхідного температурного режиму у топці здійснюється шляхом регулювання витрати палива і повітря відповідно до програми експерименту.

Регулювання витрати повітря по зонах горіння здійснюють за допомогою кранів, розташованих на відповідних трубопроводах. Витрата палива має встановитися такою, що відповідає даній витраті повітря.

Підпалювання палива здійснюють за допомогою факела, що вводиться в топку при відкритих дверях топкової камери.

Спостереження за процесами горіння палива ведуть через оглядове віконце 2 з термостійкого скла.

Вимірювання температури продуктів згорання по тракту теплообмінного блоку здійснюють за допомогою термопар ТХА, вмонтованих у вогнетривке склепіння, встановлених в гнізда на виході з топки, в поворотній камері, за теплообмінним блоком, закарбованих у метал колосникової решітки і підключених до багатоточкового регулятора температури ПКРТ-0103 з виходом на персональний комп'ютер. У ході експериментів здійснювалося вимірювання температури у 8 точках по газовому тракту котла:

T1 – температура газів на виході із топки;

T2 – температура газів у поворотній камері котла;

T3 – температура газів за котлом;

T4 – температура продуктів згорання над зоною горіння;

T5 – температура вогнетривкого склепіння;

T6 – температура продуктів згорання на виході з-під вогнетривкого склепіння;

T7 – температура металу колосникової решітки у зоні горіння;

T8 – температура металу колосникової решітки у зоні догорання.

Контроль поточного складу газоподібних продуктів згорання (вміст CO) здійснювали один раз на 5-8 хвилин за допомогою газоаналізатора TESTO 300 шляхом відбору проб зондом, який вводять в потік продуктів згорання через спеціальні отвори на корпусі теплообмінного блоку.

Для вимірювання усереднених значень концентрацій кисню та двоокису вуглецю проби продуктів згорання відбирали протягом 10-15 хвилин у газові бюретки апарату для відбору та зберігання проб газів (апарат Коро). Потім виконували хімічний аналіз відібраних проб хімічним газоаналізатором КГА-100.

Проби палива масою 200 г відбирали перед його завантаженням у топковий пристрій і зберігали у герметичній тарі. В подальшому здійснювали визначення вологості соломи, виходу летючих речовин та зольності за стандартними методиками.

Проби зольного залишку масою по 100 г відбирали із зольного ящика 45 у щільні коробки після виключення стенда. Проби золи використовувались для визначення характеру золи, її насипної маси, вмісту незгорілого вуглецю.

Характеристики використаної соломи як палива

Для проведення експериментальних досліджень використовували тюковану житню солому, придбану в с-г підприємстві ТоВ "Войтівське" (с. Зоря, Броварського району Київської області). Тюкована житня солома зберігалась у господарстві під навісом. Солома мала сірий колір характерний для соломи вимоченої дощем, прілий запах. Розміри тюків були 570×450×1000 мм. Середня маса одного тюка становила близько 10 кг. Питома вага тюкованої соломи становила від 41 до 45 кг/м³.

Ваговим методом з просушуванням зразків соломи в сушильній шафі встановлено, що її вологість становила 15,6% мас. При визначенні вологості соломи орієнтувались на положення [240].

Ваговим методом з використанням муфельної печі, орієнтуючись на методику, викладену у [241], визначено вміст золи в робочій масі палива: зольність соломи на робочу масу становила $A^p = 1,45\%$ мас. і в розрахунку на суху масу $A^c = 1,7\%$ мас.

Базуючись на одержаних експериментальних даних про вологість та зольність досліджених зразків соломи та опираючись на дані [242], розрахунковими методами оцінили теплотворну здатність соломи як палива:

нижчу – $Q_H^p = 14425$ кДж/кг (3445 ккал/кг),

вищу – $Q_B^p = 15948$ кДж/кг (3809 ккал/кг),

а також теоретично необхідну для горіння кількість повітря $V_B^o = 3,78$ м³/кг та інші показники палива, необхідні для розрахунку режимів роботи експериментального стенду.

Цілі тюки були деформовані і не входили у лоток топкового пристрою, а тому тюк ділили на три частини і зв'язували у вигляді невеличких тючків розміром 570×450×330 мм, маса яких становила 3,2 -3,5 кг.

Результати експериментальних досліджень

Перший пуск експериментального стенду з топковим пристроєм лоткового типу для безперервного спалювання малих тюків соломи продемонстрував принципову працездатність способу роботи топкового пристрою з самоподачею тюків соломи у зону горіння під дією сили тяжіння по похилому лотку. Тривалість роботи становила близько однієї години протягом яких було спалено 19 кг соломи.

У зону горіння подавалося 42 м³/год повітря, а у зону догорання 10 м³/год. Під час горіння відбувалася самоподача соломи із лотка у зону горіння під дією сили тяжіння, але характер подачі відрізнявся від наших попередніх уявлень. Пересування тюків соломи було нерівномірним – або з забіганням тюка на зону допалювання, або з незначними переміщеннями на зону горіння.

В результаті, при забіганні тюка відбувався бурхливий вихід летючих з великої кількості свіжої соломи, що надійшла на колосникову решітку. Вивільнені летючі речовини не встигали згорати у топковому об'ємі і викидалися з димовими газами в атмосферу. Емісія СО становила до 4500 чнм. Подача третинного повітря через сопла при холодній топці не забезпечує вигорання летючих, а, навпаки, струмені третинного повітря гасили полум'я летючих речовин над палаючим тюком соломи.

При недостатньому переміщенні тюка горіння відбувалося лише над частиною зони горіння, при цьому повітря, що надходило через отвори не

покриті соломною, не приймало участі у горінні і спричиняло значне охолодження газів, що реагують. В результаті емісія CO була дещо нижчою, але залишалась високою – на рівні 1800 ppm.

В результаті цих процесів полум'я та температура у топці були нестабільними. Характер зміни температур у топці та по газовому тракту котла ілюструється даними наведеними на **Рис. 4.23**.

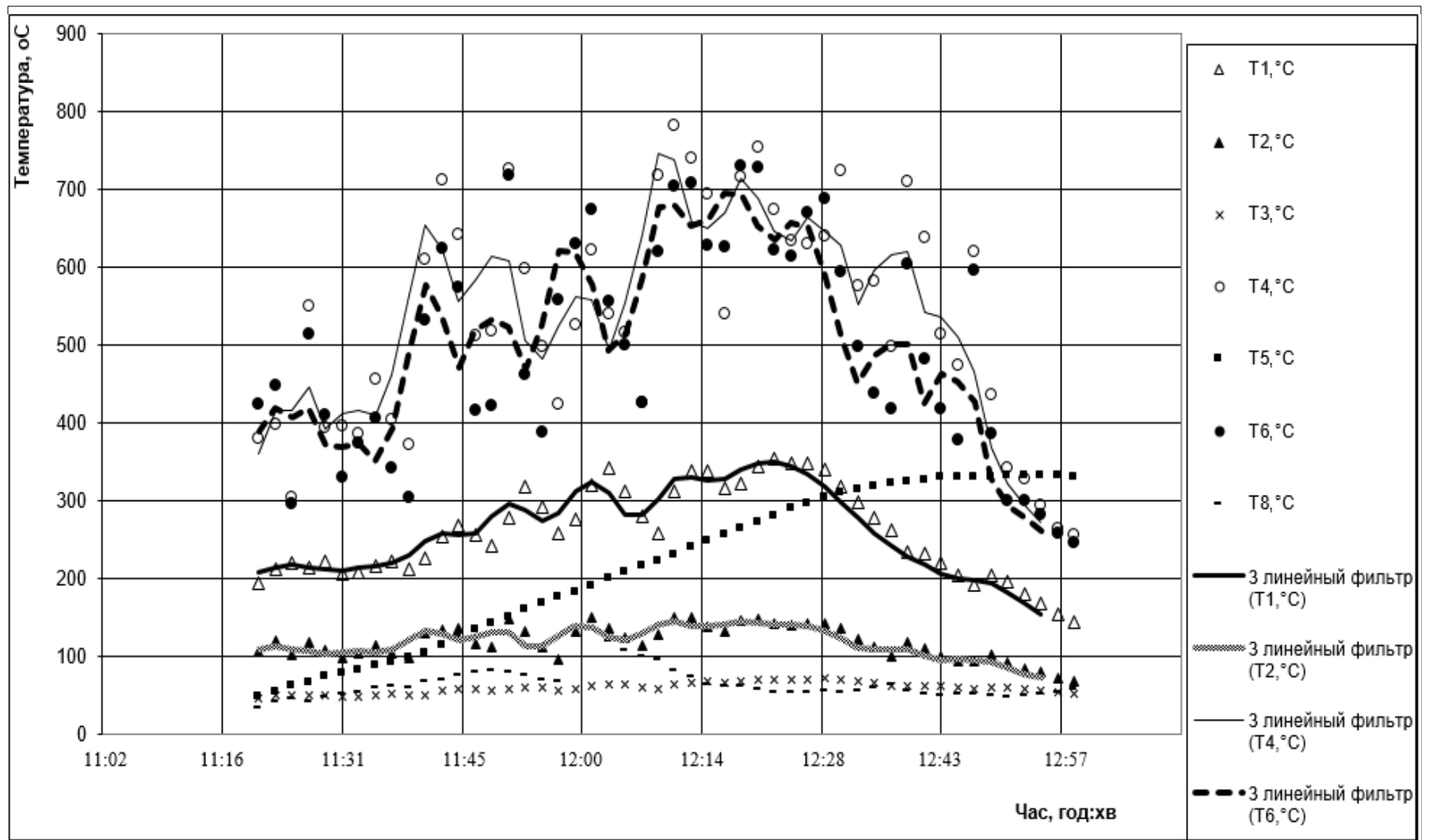


Рис. 4.23. Графік зміни температур по газовому тракту котла

В ході спостережень відмічено, що після пересування тюка спочатку спостерігався вихід летючих з соломи у вигляді сизих пасм і їх горіння над тюком (**Рис. 4.24 а**). Потім на поверхні тюка появлялися окремі кратери горіння по яких яскраві язички полум'я підіймалися від колосникової решітки, прорізаючи всю товщу соломи з формуванням окремих каналів діаметром до 40-60 мм. В зонах, прилеглих до утворених каналів, щезали пасма диму, що свідчить про якісне вигорання летючих у зоні впливу утворених каналів (**Рис. 4.24 б**). Поступово з вигоранням соломи навколо каналів відбувалося руйнування структури соломи, обвалювання окремих частин тюка, відбувалося пересування тюка і цикл повторювався.



а)



б)

Рис. 4.24. Розвиток горіння тюка на лотковому топковому пристрої.

На основі цих спостережень можна зробити припущення, що для забезпечення стабільнішого та більш рівномірного горіння тюків необхідно:

- обмежити переміщення тюка з метою недопущення його забігання на зону допалювання;
- площу зони горіння необхідно зменшити з метою зменшення кількості соломи, що знаходиться на ній, досягнення більш рівномірного пересування тюків;
- на колосниковій решітці у зоні горіння отвори підводу повітря слід розташувати в одну лінію з кроком не більше 60 мм з тим, щоб утворені повітряними струменями канали горіння зливалися і формували вертикальну поверхню горіння, яка ніби зрізає солому від тюка шар за шаром.

Було виконано реконструкцію топкового пристрою та проведено порівняльні дослідження горіння.

У колосниковій решітці отвори для виходу дуттьового повітря діаметром 10 мм розмістили в один ряд з кроком 60 мм. В результаті площу зони горіння зменшили до $0,036 \text{ м}^2$, а площу живого перерізу отворів для повітряного дуття зменшили до $0,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, але відносна площа отворів дуття збільшилась до 2% від площі зони горіння.

На колосниковій решітці між зоною горіння та догорання на віддалі 30 мм від ряду отворів дуття зони горіння встановили два упори з метою зупинки тюка соломи, що опускається з подавального лотка. Упори являють собою тонкі вертикальні пластини висотою 120 мм, встановлені по напрямку переміщення тюка (Рис. 4.25). За задумом упори повинні зупиняти тюк соломи, але не створювати перешкод для переміщення зольного залишку у зону догорання.



Рис. 4.25. Вид колосникової решітки з встановленими упорами.

Проведені експерименти зі спалювання тюків соломи на реконструйованому лотковому топковому пристрої підтвердили наші припущення. Дійсно, горіння відбувалося зі злиттям окремих факелів і формуванням суцільного фронту горіння, що ніби пошарово зрізав соломку від тюка (Рис. 4.26 а, б), при цьому палаюча соломка розжарювалась до білого світіння і над фронтом горіння здіймався факел вигоряючих летючих речовин.

Шматки вигорілого коксозольного залишку періодично відколювалися від тюка і падали на зону догорання (Рис. 4.26 в, г). Пересування тюка стало більш рівномірним і горіння стабільнішим, але менш виражена циклічність горіння зберігалась.

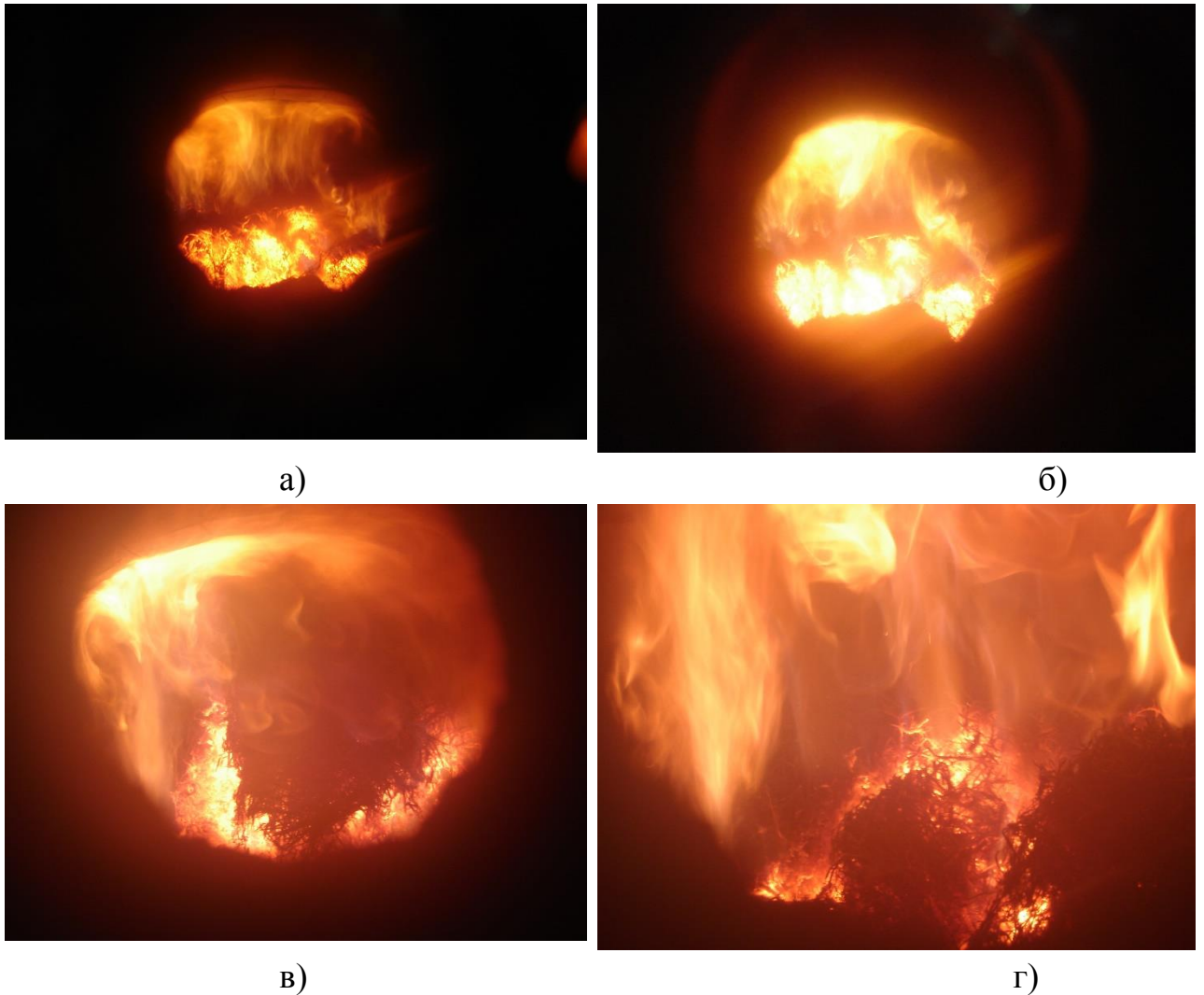


Рис. 4.26. Розвиток горіння тюка на лотковому топковому пристрої:
 а, б – злиття окремих факелів у суцільний фронт горіння; в, г – відділення та осідання шлакозольного залишку по висоті тюка соломи.

Характер зміни температур у топці та по газовому тракту котла при випробуваннях реконструйованого топкового пристрою ілюструється даними наведеними на **Рис. 4.27**.

З наведених даних видно, що температури в топці, зафіксовані за допомогою термопар Т4 і Т6, коливаються в широких межах, що пояснюється як циклічністю горіння палива, так і відхиленням полум'я від місця встановлення термопар. Температура газів на виході з топки яка реєструється термопарою Т1, що не зазнає впливу полум'я і інтегрально характеризує процеси у топці, є відносно стабільнішою, але її коливання вказують на циклічність процесу.

В ході випробувань реконструйованого експериментального лоткового пристрою встановлені наступні показники:

- середнє за дослід споживання соломи як палива становило 17,9 кг/год;

- температура дуттьового повітря 20 °С;
- температура димових газів після котла 72-75 °С;
- концентрація кисню у димових газах 13,6% об.;
- концентрація діоксиду вуглецю у димових газах 6,2% об.;
- концентрація монооксиду вуглецю у димових газах 2450 ppm;
- вміст вуглецю у зольному залишку 2,83% мас.

На основі одержаних експериментальних даних за методиками, викладеними в [237], розраховано коефіцієнт розбавлення сухих продуктів згорання $h = 2,65$, коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 2,84$ і з їх використанням розраховані складові теплових втрат котла з топковим пристроєм:

- втрата теплоти від механічної неповноти згорання палива $q_4 = 0,1\%$;
- втрата теплоти від хімічної неповноти згорання палива $q_3 = 2,25\%$;
- втрата теплоти в оточуюче середовище від нагрітого котла $q_5 = 2,07\%$;
- втрата теплоти з димовими газами $q_2 = 10,0\%$;
- втрати теплоти зі шлаком прийняли $q_6 = 0$.

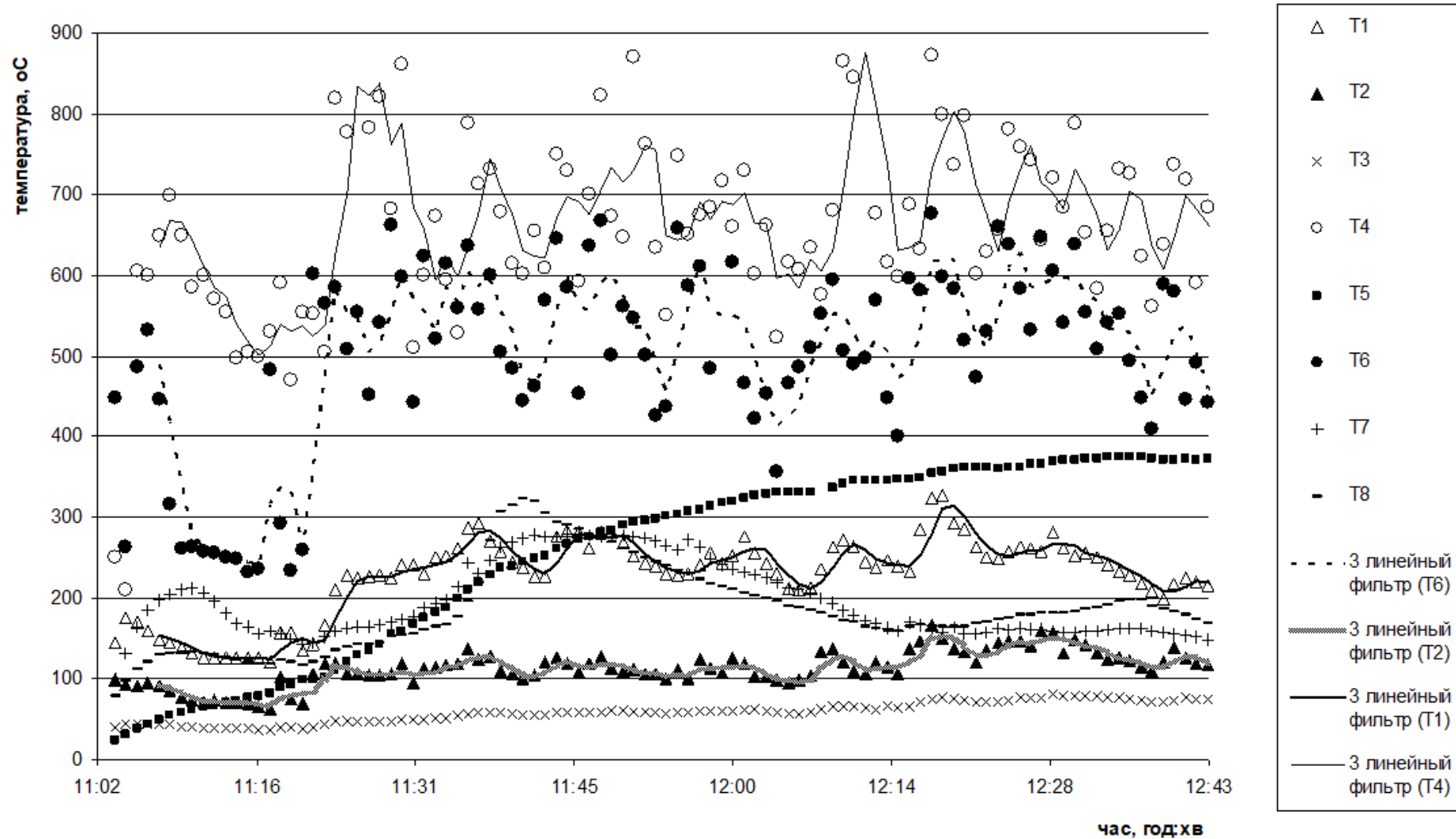


Рис. 4.27. Графік зміни температур по газовому тракту котла при випробуваннях реконструйованого лоткового топкового пристрою.

На основі отриманих експериментальних даних розраховано за балансовим методом ККД котла з дослідженим топковим пристроєм, який склав $\eta = 85,5\%$, при корисній тепловій потужності котла q_1 61,3 кВт і сумарних теплових втратах котла та експериментального топкового пристрою 14,42%.

Корисна тепла енергія, вироблена при спалюванні соломи в топковому пристрої, використовувалась для розігріву конструкцій котла та нагріву води, що циркулювала в контурі охолодження. Витрата води в контурі становила 4500 кг/год (1,25 кг/с). При проходженні через котел температура води збільшувалась на 5°C і була досягнута її температура на виході із котла 70 °C. Періодичне завантаження палива та нерівномірність вигорання тюка не мали помітного впливу на стабільність температури води на виході з котла. Після вигорання тюків соломи, завантажених у подавальний лоток, здійснювали завантаження нової порції тюків. Для цього зупиняли вентилятор дуття, прикривали засувку тяги і відкривали піддувало топки – в результаті забезпечувалась активна вентиляція топки при тиску в ній близькому до атмосферного. Потім відкривали завантажувальний люк подавального лотка і завантажували тюки соломи. Після закриття завантажувального лотка поступово відкривали засувку тяги, включали вентилятор дуття та зачиняли піддувало. У топці відбувалося займання соломи від залишкового жару і через 10-15 секунд відновлювалося стабільне горіння соломи. Тривалість операцій завантаження тюків соломи становила 4-5 хвилин і виконувалась одним оператором. При завантаженні соломи не спостерігалось зниження температури води на виході із котла.

У відомих соломоспалювальних котлах повторне завантаження соломою дозволяється лише після остигання котла до температури нижче 50 °C, а створений топковий пристрій можна дозавантажувати паливом незалежно від температури води в котлі, що є істотною перевагою створеного топкового пристрою для безперервного спалювання малих тюків соломи.

Слід зазначити, що за балансними розрахунками підвищення температури води у котлі мало становити 11,7 градусів, а не 5 градусів, як це спостерігалось в ході експериментів. Це свідчить про те, що при досягненні стабільного горіння в топці стабільний тепловий режим котла ще не був досягнутий і відбувалося поступове підвищення температур конструкцій котла та води у ньому. Для досягнення стаціонарних умов роботи котла необхідно було значно збільшити тривалість експерименту, але це було неможливо через обмеженість запасів соломи у лабораторії. В інституті немає вільного приміщення для організації складування соломи у кількості необхідній для довготривалих експериментів.

З аналізу експериментальних даних можна зробити висновок, що у зоні горіння при подачі повітря 42 м³/год коефіцієнт надлишку повітря становив $\alpha_1 =$

0,62. Сумарна кількість повітря, що надходило у зони горіння ($42 \text{ м}^3/\text{год}$) та допалювання ($10 \text{ м}^3/\text{год}$), забезпечувала коефіцієнт надлишку повітря $\alpha_2 = 0,76$. Це свідчить, що в ході експериментів надходження повітря у зону горіння та допалювання було недостатнім. Решта повітря в обсязі близько $140 \text{ м}^3/\text{год}$ надходила в топку неорганізовано під дією розрідження створеного димососом. Це повітря брало участь у хімічних реакціях горіння, але інтенсивність його перемішування з реагуючими газами була недостатньою.

Швидкість повітряних струменів, що витікали з отворів колосникової решітки становила $16,7 \text{ м/с}$. З огляду на низьке значення коефіцієнта надлишку повітря у зоні горіння $\alpha_1 = 0,62$ можна вважати таку швидкість недостатньою.

Уникнути надлишкових присосів повітря у існуючому стенді за рахунок балансування дуття та тяги практично неможливо, оскільки це потребує встановлення швидкодіючої автоматичної системи регулювання дуття та тяги. Створення такої системи у складі експериментального стенду технічно можливе, але у промислових котлах призведе до значного зростання їх вартості.

Більш доцільним може стати перевід котла на роботу під наддувом, що виключило б присоси повітря по тракту котла і дозволило б контролювати процес горіння лише шляхом подачі повітря вентилятором. Таке технічне рішення є реальним стосовно заново створюваних промислових котлів з газощільною топкою, але в існуючому експериментальному стенді це рішення реалізувати було неможливо.

Теплове напруження дзеркала горіння становило 2005 кВт/м^2 по нижчій теплоті згорання та 2220 кВт/м^2 по вищій теплоті згорання соломи. Ці значення теплового напруження дзеркала горіння свідчать про високу досягнуту інтенсивність горіння тюка соломи на колосниковій решітці під дією струменів первинного повітря.

Об'єм топкової камери фактично був розділений вогнетривким склепінням на високотемпературну зону всередині футерування та низькотемпературну зону між склепінням та охолоджуваними водою стінками котла. При загальному об'ємі топки $0,977 \text{ м}^3$ об'єм високотемпературної зони становив $0,32 \text{ м}^3$. Слід зазначити, що полум'ям (тобто реагуючою сумішшю летючих речовин та повітря) був зайнятий не весь об'єм високотемпературної зони – в нижній вихідній частині зони спостерігався "мертвий" (не зайнятий полум'ям) об'єм. З вирахуванням "мертвого" об'єму фактичний активний об'єм високотемпературної зони становив $0,243 \text{ м}^3$. Теплове напруження активного об'єму топки становило 297 кВт/м^3 по нижчій та 328 кВт/м^3 по вищій теплоті згорання соломи.

Зважаючи на значну емісію монооксиду вуглецю, можна вважати, що

теплове напруження топкового об'єму в умовах проведених експериментів було великим, або активний об'єм топкового простору був недостатнім.

При випробуваннях подавального лотка відмічено, що тюки соломи ковзали вільно з прискоренням по чистій поверхні сталевих листів лотка. Після першого пуску на стінках подавального лотка конденсувалися піролізні смоли з утворенням твердої матової плівки по якій тюки спускалися з затримками. Це можна пояснити тим, що коефіцієнт тертя між листом, покритим смоляною плівкою, та соломною значно вищий ніж для чистої сталі та соломи. Питання про визначення коефіцієнта тертя між листом покритим смоляною плівкою та соломною потребує окремого дослідження.

Як при першому, так і при другому пусках на колосниковій решітці у зоні догорання відбувалося накопичення вигорілої золи, яку видаляли при періодичних чистках.

Розроблення рекомендацій щодо використання результатів експериментів

При розробці експериментального топкового пристрою його теплова потужність прийнята до 100 кВт. При такій потужності пристрій не підпадає під дію чинних нормативних документів у сфері котлобудування та котлонагляду. Такий підхід дозволяє уникнути невинуватих матеріальних витрат та затрат часу пов'язаних з отриманням дозволів державної інспекції з охорони праці на розробку обладнання, його виготовлення та проведення досліджень. Для досліджень горіння та відпрацювання технології спалювання тюків соломи величина потужності стенду не має принципового значення. Результати досліджень, що були отримані при створенні малопотужного експериментального зразка, стануть основою для конструювання промислових топкових пристроїв більшої потужності з застосуванням методів моделювання.

Виходячи з одержаних експериментальних даних, при розрахунку геометричних характеристик топки слід забезпечити:

- теплове напруження дзеркала горіння не вище 2000 кВт/м^2 по нижчій теплоті згорання соломи;
- теплове напруження активного топкового об'єму не вище 300 кВт/м^3 . Для дослідно-промислового котла рекомендується прийняти теплове напруження топкового об'єму близько 200 кВт/м^3 і після перевірки емісійних характеристик топки уточнити його значення;
- конфігурацію топкового об'єму слід витягувати у вертикальному напрямку і таким чином забезпечити максимальне заповнення топкового

- об'єму полум'ям. Для цього бажано застосувати П- подібне компонування котла чи елементи такого компонування;
- рух продуктів згорання по всьому перерізу топки без утворення „мертвих” зон.

При конструюванні дослідно-промислового топкового пристрою необхідно на межі зони горіння та допалювання встановити упори, що охолоджуються котловою водою. Зону допалювання слід влаштувати нижче на 0,3 – 0,5 м від рівня зони горіння, що має забезпечити вільне переміщення коксозольного залишку з однієї зони на іншу.

Швидкість повітряних струменів, що витікають з отворів колосникової решітки у зоні горіння, слід збільшити до 25 м/с. Витрата повітря через отвори зони горіння повинна бути достатньою для протікання реакцій горіння при взаємодії периферії повітряного струменя та соломи. При цьому в ядрі потоку повинна залишитися кількість кисню достатня для догорання летючих речовин у просторі над тюком. Питання про взаємодію струменя повітря та соломи при горінні потребує проведення окремого детального дослідження.

При конструюванні подавального лотка дослідно-промислового топкового пристрою кут нахилу лотка слід прийняти більше 40-45° після проведення відповідних досліджень щодо визначення коефіцієнта тертя між листом покритим смоляною плівкою та соломною.

При виборі аеродинамічної схеми котла доцільно застосувати подачу дуттьового повітря вентиляторами та видалення димових газів за рахунок розрідження створюваного димовою трубою. Це дозволить уникнути складної системи автоматичного регулювання тяги та забезпечити контроль за процесом горіння лише шляхом керування подачею дуттьового повітря.

З урахуванням потенційного ринку, доцільно розпочинати виробництво котельних установок потужністю до 100 кВт. Як перший крок щодо практичного використання результатів роботи рекомендується виготовлення дослідно-промислового зразка соломоспалювального котла з топковим пристроєм для неперервного спалювання малих тюків соломи, провести доробку конструкції та коригування документації на котел, а також проведення детальних експериментальних досліджень роботи котла та його доводку з метою використання як прототипу для подальшого серійного виробництва.

Для підтвердження довготривалих технічних характеристик котла рекомендується провести його дослідну експлуатацію протягом одного опалювального сезону. Створений котел та результати його дослідної експлуатації має розглянути міжвідомча комісія, яка й прийме рішення про

завершеність розробки котла та можливість переходу до виробництва установочної серії.

Соломоспалювальний котел з топковим пристроєм лоткового типу рекомендується застосовувати в опалювальних котельнях комунальної енергетики, особливо об'єктів сільської соціальної сфери (школи, лікарні, адміністративні будівлі).

4.4. Експериментальні дослідження анаеробного збродження ПП АПК (солома, стебла кукурудзи, лушпиння соняшника)

Використання лігно-целюлозної сировини аграрного походження для виробництва біогазу вважається технологією виробництва біопалив 2-го покоління, оскільки для цього не використовуються спеціально вирощені культури, а поживні рештки є побічним продуктом виробництва основної сільськогосподарської продукції, призначеної для харчування та на корм. З цієї точки зору, енергетичне використання поживних решток є перспективним напрямком в відновлюваній енергетиці. Окрім цього, перетворення частини органічної речовини поживних решток в біогаз з подальшим поверненням в поля практично всього спектру макро- та мікроелементів зі збродженою масою відповідає засадам циркулярної економіки сталого розвитку.

Проведені в роботі дослідження виходу біогазу з поживних решток підтверджують перспективність цього напрямку як з економічної, так і з технологічної точок зору. Розробка технологічних засад використання лігно-целюлозної сировини аграрного походження для виробництва біогазу дозволить значно розширити потенціал виробництва біогазу на національному рівні, і створити альтернативу використанню спеціально вирощуваному силосу кукурудзи, біогаз з якої є біопаливом 1-го покоління.

Загальна мета досліджень полягає у встановленні експериментальним шляхом ряду показників виходу біогазу при збродженні зразків поживних решток, а саме:

- питомого виходу біогазу (метану) на одиницю внесеної маси субстратів та на одиницю внесеної маси СОР;
- вмісту у біогазі CH_4 та CO_2 ;
- швидкості виходу біогазу (метану);
- кінетичних констант швидкості.

Експериментальні дослідження виконано в 6 послідовних етапів, кожен з яких має свою мету та задачі. На 1-му етапі проведено пошукове дослідження ефективності виробництва біогазу при періодичному збродженні зразка

соломи пшениці в гранульованій формі, що повинно було показати принципову можливість такого зброджування та оцінити ефективність використання лабораторного інокуляту для біодеструкції лігно-целюлозної сировини.

Метою 2-го етапу досліджень було порівняння показників виходу біогазу для зразків соломи пшениці, в залежності від ступеня та способу їх попередньої обробки. Випробовувались зразки необроблених стебел соломи, механічно подрібненої соломи та гранульованої форми соломи. При цьому, для дослідження для всіх зразків використано солому з однієї виробничої партії, що дозволило отримати релевантні дані для порівняння.

Мета 3-го етапу полягала у встановленні ступеня інгібуючого впливу органічної речовини соломи в гранульованій формі на метаболізм бактерій та архей інокуляту лабораторного. Відомо, що розпад органічної речовини при анаеробному зброджуванні протікає в 4 послідовних етапи з формуванням проміжних продуктів біохімічних реакцій. При цьому, проміжні продукти реакцій кожного окремого етапу є джерелом живлення бактерій наступного етапу. Враховуючи той факт, що різні етапи протікають з різною швидкістю, за певних умов може створюватись дисбаланс між накопиченням та споживанням таких продуктів, а накопичені продукти реакцій можуть спричиняти інгібуючий вплив на окремі популяції бактерій та архей. Утворення стартових сумішей інокуляту зі зразками сировини при різній її початковій концентрації в сумішах дозволяє отримати ефект такого дисбалансу та встановити ступінь впливу на кінетику процесу виділення біогазу. За певної концентрації такий ефект може виявитись незворотнім, що проявиться у повному пригніченні процесу виділення біогазу.

4-й етап досліджень проведено з метою встановлення показників виходу біогазу зі зразків стебел кукурудзи та порівняння їх з такими при зброджуванні зразків соломи пшениці. Для даного етапу використано механічно подрібнені стебла кукурудзи та їх гранульована форма, отримана в промислових умовах.

На 5-му етапі проведено дослідження показників виходу біогазу зі зразків стебел кукурудзи в гранульованій формі, отриманих в лабораторних умовах. Результати даного етапу дозволяють отримати додаткову інформацію про вихід біогазу з пожнивних решток кукурудзи та порівняти їх з результатами попереднього 4-го етапу досліджень.

Метою 6-го етапу є дослідження показників виходу біогазу з інших видів пожнивних решток, зокрема з лушпиння соняшника в гранульованій формі, а також порівняння показників для дослідних сумішей зразків з інокулятом та дигестатом діючої біогазової станції. Одночасно отримано нові дані щодо виходу

біогазу зі зразків соломи пшениці, відібраних за відмінних від попередніх серій умов.

Отримані результати дозволяють прогнозувати вихід біогазу з поживних решток, а також є вихідними даними для подальшого моделювання процесу анаеробного зброджування в біореакторах.

Опис дослідної установки.

Експериментальні дослідження виконано в лабораторії відділу теплофізичних проблем систем тепlopостачання Інституту технічної теплофізики НАН України. Дослідна установка виконана у вигляді ряду систем біореакторів періодичної дії. Одиначна система дослідної установки складається з біореактора об'ємом 2 дм³ та зовнішньо розташованого евдіометра граничним об'ємом накопичення біогазу 1,6 дм³ (Рис. 4.28). Одиначні системи розміщено групами по 7 одиниць в окремих ємностях з теплоносієм (водою). На Рис. 4.29 представлено загальний вид дослідної установки.

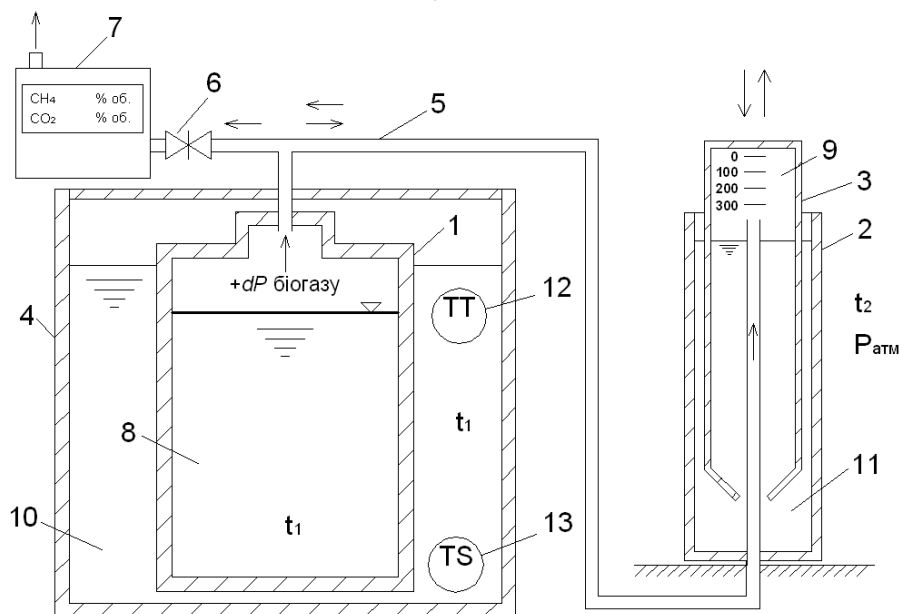


Рис. 4.28. Принципова схема одиначної системи дослідної установки анаеробного зброджування біомаси:

1 - ємність біореактора; 2 - нерухома частина евдіометра; 3 - рухома частина евдіометра; 4 - ємність з теплоносієм; 5 - трубка з ПВХ для подачі біогазу в евдіометр; 6 - газовий запірний кран; 7 - газоаналізатор; 8 - робоче середовище біореактора; 9 - внутрішній простір евдіометра з біогазом; 10 - теплоносій (вода); 11 - 5% водний розчин *NaCl*; 12 - ртутний термометр; 13— терморегулятор.



Рис. 4.29. Загальний вид дослідної установки анаеробного збродження біомаси.

Для біореактора використано скляну ємність. Герметизація біореактора виконана за допомогою капронової кришки з відповідним штуцером. Відвідний штуцер, за допомогою гнучкої ПВХ трубки, з'єднано з алюмінієвою трубкою, герметично вмонтованою в днище нерухомої частини евідіметра $D_y=100$ мм, виконаної з пластика. Нерухому частину евідіметра заповнено 5% водним розчином $NaCl$, для запобігання розчиненню газів та спотворенню результатів вимірювання обсягу та складу біогазу. Аналіз складу біогазу виконується в газоаналізаторі (7) шляхом відкачування біогазу з евідіметра через відвідну трубку, на якій вмонтовано корковий газовий кран (6).

Нагрівання та контроль температури води в ємностях (4), в яких розташовані біореактори, здійснюється за допомогою електричного обігрівача, обладнаного терморегулятором, типу Aquael Easyheater (потужність 100 Вт, похибка контролю температури $\pm 1^\circ\text{C}$). Для відведення та розподілу тепла від обігрівача використано крильчаткову помпу зануреного типу, що працює в безперервному режимі. Вимірювання температури здійснюється за допомогою лабораторного ртутного термометра.

Методи та прилади.

Аналіз фізико-хімічного складу сировини

Для вимірювання величин показників фізико-хімічного складу зразків органічних матеріалів, використовувались наступні прилади та методи:

- при вимірюванні вмісту сухої речовини – сушильна шафа ThermoLab СНОЛ 58/350, ваги лабораторні Acculab ALC-150.3-U (клас точності – $\pm 0,001$ г); метод аналізу – згідно з ГОСТ 26713-86.

- при вимірюванні сухої органічної речовини – муфельна піч ThermoLab СНОЛ 7.2/1100, фарфорові бюретки, ваги лабораторні Acculab ALC-150.3-U (клас точності – $\pm 0,001$ г); метод аналізу – DIN 12880.

Вимірювання об'єму виділеного біогазу

Вимірювання об'єму біогазу, виділеного між фіксаціями показів, виконувалось шляхом візуального зчитування показів евдіометрів. Абсолютна похибка зчитування складає ± 10 см³. Фіксація показів здійснювалась 1-2 рази на добу. Об'єм утвореного біогазу приведено до нормальних умов (273 К, 1013 мбар) для сухого газу. Фіксація об'єму виділеного біогазу проводилась до моменту, коли середньодобова швидкість біогазу не перевищувала 0,02 максимальної досягнутої швидкості за період спостереження. Обсягом біогазу, що міг виділитись після цього моменту, при оцінці показників виходу біогазу знехтувано.

Аналіз складу біогазу

Вміст в біогазі CH₄ та CO₂ вимірювався з допомогою портативного цифрового газоаналізатора Landtec GEM-500, шляхом відбору з евдіометра накопиченого біогазу після проведеної фіксації його об'єму.

Визначення показників виходу біогазу

Статистичний аналіз результатів експериментальних досліджень здійснено з використанням програми MS Excel (версія 14.0.6023.1000). Для визначення показників та оцінки похибок вимірювань використано методику, наведену в роботі [243].

Вимірювання температур та тиску

Вимірювання температури води в басейні з біореакторами виконано за допомогою лабораторного ртутного термометра (ГОСТ 2823-73 ТТ (15)). Температура повітря в лабораторному приміщенні та тиск атмосферного повітря фіксувались з допомогою портативної метеостанції марки VITEC VT-6401 ВК.

Механічне подрібнення

Подрібнення сухої стеблової маси пожнивних решток виконано в лабораторному млині марки Retsch SM-100 з використанням сита з розміром чарунок 2 мм.

Методика досліджень.

Загальний порядок проведення та аналізу результатів кожної серії експериментальних досліджень складається з наступних етапів:

- відбір проб інокуляту та зразків органічних матеріалів;
- аналіз фізико-хімічного складу (СР, СОР) інокуляту та зразків органічних матеріалів;
- моделювання компонентного складу суміші інокуляту та досліджуваних зразків органічних матеріалів, відповідно до задач серії досліджень;
- утворення дослідних сумішей та ініціація процесу метанового бродіння в періодичному режимі при температурі $36\pm 1^{\circ}\text{C}$;
- фіксація об'ємів та складу виділеного біогазу, температурних показників, тиску атмосферного повітря, часу замірів даних протягом періоду спостережень;
- статистичний аналіз результатів експериментальних досліджень.

Метод метанового бродіння

Для дослідження процесу метанового бродіння зразків органічних матеріалів у роботі використано метод періодичного зброджування при температурі $36\pm 1^{\circ}\text{C}$, з врахуванням рекомендацій, викладених у стандарті VDI 4630. Ініціацію процесу метанового бродіння здійснено шляхом повного змішування порції зразку органічного матеріалу з інокулятом (суспензія, що містить стартову популяцію життєздатних метан-утворюючих бактерій).

Тривалість зброджування

Період від моменту герметизації дослідної суміші в реакторі та постановки його в робочі умови до моменту останньої фіксації показів виділеного біогазу прийнято за період спостережень для кожної окремої дослідної суміші.

Інокулят

В дослідженнях використано інокулят, отриманий в лабораторних умовах, як продукт метанового бродіння різних видів органічних матеріалів в послідовних серіях досліджень. Суміш інокулятів з різних серій утворено лише з тих тестових зразків, які показали ефективне виділення біогазу з прогнозованим виходом метану, що дозволяє уникати потрапляння незброженої органічної речовини інших видів матеріалів в дослідні суміші.

В серії 6 досліджень паралельно з інокулятом лабораторним використано також зброжену масу (дигестат) біогазової установки «МХП Еко Енерджи» в м. Ладижин (1-а черга). Характеристики використаних типів інокуляту для різних серій досліджень наведено в **Табл. 4.4.**

Табл. 4.4. Вміст СР та СОР у використаних зразках інокуляту/дигестату

№	Назва органічного матеріалу	Код матеріалу	Вміст СР (% до с.м.)	Вміст СОР (% до СР)	№ серії досліджень
1	Інокулят лабораторний	I	2,11	71,8	Серії 1
2	Інокулят лабораторний	I	2,30	72,27	Серія 2
3	Інокулят лабораторний	I	1,40	61,33	Серія 3
4	Інокулят лабораторний	I	1,44	61,33	Серія 4
5	Інокулят лабораторний	I	2,01	68,01	Серія 5
6	Інокулят лабораторний	I	1,91	63,49	Серія 6
7	Дигестат з біогазової станції	Д	12,45	71,67	Серія 6

Субстрати

Для дослідження відібрано зразки різних видів рослинних решток після збору урожаю деяких культур (пшениця, кукурудза, соняшник), що традиційно вирощуються в Україні. Досліджено зразки соломи пшениці, стебло-листової маси кукурудзи, а також лушпиння соняшнику, у нативній, механічно подрібненій та гранульованій формах (Табл. 4.5).

Табл. 4.5. Види досліджених поживних решток та способи їх обробки.

№ п/п	Сільсько-господарська культура	Види досліджених поживних решток	Спосіб попередньої обробки	Лінійні розміри часток
1	Пшениця	Солома	Без обробки	50...100 мм
			Механічне подрібнення	< 2 мм
			Механічне подрібнення	0,1...7 мм
			Гранулювання	0,1...5 мм
2	Кукурудза	Стебло-листова маса	Механічне подрібнення	< 2 мм
			Гранулювання	0,1...5 мм
3	Соняшник	Лушпиння	Гранулювання	0,1...5 мм

Перелік досліджених в даній частині роботи зразків органічних матеріалів та вміст в них СР та СОР наведено в **Табл. 4.6.**

Табл. 4.6. Вміст СР та СОР в досліджених зразках органічних матеріалів.

№	Назва органічного матеріалу	Код матеріалу	Вміст СР (% до с.м.)	Вміст СОР (% до СР)	№ серії досліджень
1	Товарна гранула з соломи пшениці	ПСП	91,9	94,25	Серії 1-3
2	Солома пшениці подрібнена	СП_п	89,0	91,54	Серія 2
3	Солома пшениці не подрібнена	СП_н/п	89,0	91,54	Серія 2
4	Товарна гранула зі стебел кукурудзи	ПСК	90,17	93,08	Серія 4
5	Стебла кукурудзи подрібнені	СК	90,07	94,09	Серія 4
6	Гранули зі стебел кукурудзи	ПСК	90,53	89,41	Серія 5
7	Гранули з соломи пшениці	ПСП	92,17	94,38%	Серія 6
8	Січка соломи пшениці	СС	79,35	95,50	Серія 6
9	Гранула з лушпиння соняшнику	ПЛС	91,04	97,26	Серія 6

Зразки гранул з соломи пшениці ПСП для серій досліджень 1-3, а також зразки соломи неподрібненої СП_н/п, було надано ТОВ «Він-Пелета» (м. Турбів, Вінницька обл.). Зразок соломи подрібненої СП_п отримано зі зразка СП_н/п шляхом подрібнення в млині Retsch SM-100 з вихідною фракцією лінійними розмірами < 2 мм. Зразок гранул зі стебел кукурудзи ПСК для серії досліджень №4 надано приватним виробником гранул з м. Балта, Одеської обл. Зразок стебел кукурудзи подрібнених отримано шляхом подрібнення в млині Retsch SM-100 з вихідною фракцією лінійними розмірами < 2 мм сухих стебел кукурудзи сорту КВС-380, відібраних з полів в с. Северинівка, Київської обл. в листопаді місяці. Зразок гранул зі стебел кукурудзи ПСК для серії досліджень №5 отримано в лабораторії кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І.Мартиненка НУБіП, м. Київ. Зразки гранул соломи пшениці, січки солом'яної та лушпиння соняшнику надано компанією «МХП Еко Енерджи».

Дослідні суміші

Загалом досліджено 19 сумішей з використанням 7 видів сухої рослинної біомаси від 3-х культур (пшениці, кукурудзи та соняшнику). Стартові характеристики досліджених сумішей наведено в **Табл. 4.7**.

Табл. 4.7. Стартові характеристики досліджених сумішей

№ п/п	Код дослідної суміші	Код досліджуваного матеріалу	Початкова концентрація СОР матеріалу в реакторі, $C_{vss,0}$, гСОР/л	Відношення маси СОР матеріалу до маси СОР інокуляту (дигестату), $гСОР/гСОР$
<i>1-а серія досліджень</i>				
1	ПСП _{7,5}	ПСП	7,5	0,5
<i>2-а серія досліджень</i>				
2	ПСП _{8,2}	ПСП	8,2	0,5
3	СП_п _{8,2}	СП_п	8,2	0,5
4	СП_н/п _{8,2}	СП_н/п	8,2	0,5
<i>3-я серія досліджень</i>				
5	ПСП _{2,06}	ПСП	2,1	0,24
6	ПСП _{3,09}	ПСП	3,1	0,36
7	ПСП _{9,19}	ПСП	9,2	1,09
8	ПСП _{17,16}	ПСП	17,2	2,06
9	ПСП _{32,54}	ПСП	32,5	3,99
10	ПСП _{61,30}	ПСП	61,3	7,86
<i>4-а серія досліджень</i>				
11	СК_п _{32,3}	СК_п	32,3	3,79
12	ПСК _{32,0}	ПСК	32,0	3,79
<i>5-а серія досліджень</i>				
13	ПСК _{10,0}	ПСК	10,0	0,74
<i>6-а серія досліджень</i>				
14	ПСП _і _{6,84}	ПСП _і *	6,84	0,57
15	СС _і _{6,18}	СС _і	6,18	0,51
16	ПЛС _і _{6,61}	ПЛС _і	6,61	0,55
17	ПСП _д _{6,88}	ПСП _д **	6,88	0,19
18	СС _д _{6,18}	СС _д	6,18	0,18
19	ПЛС _д _{6,57}	ПЛС _д	6,57	0,19

* індекс «і» позначає суміші досліджуваного матеріалу з інокулятом

** індекс «д» позначає суміші досліджуваного матеріалу з дигестатом

Результати досліджень.

Кумулятивний вихід біогазу та CH₄.

Результати оцінки питомого кумулятивного виходу біогазу та метану з досліджених видів поживних решток в усіх серіях досліджень показано в Табл. 4.8. Число повторів кожної дослідної суміші складало 2-3 одиниці. За результатами по 2-3 дублюючим реакторам оцінено стандартне відхилення. Видно, що відхилення показників для окремої дослідної суміші коливається в досить широкому діапазоні від менше 1% до майже 21%. При цьому для більшості дослідних сумішей таке відхилення не перевищувало 10%.

Табл. 4.8. Показники кумулятивного виходу біогазу та CH₄

№ п/п	Код дослідної суміші	Кількість врахованих повторів дослідних проб <i>n</i> од.	Вихід біогазу на одиницю маси субстрату $Q_{bg,rS,j}$ лн./кг	Вихід CH ₄ на одиницю маси субстрату $Q_{CH_4,rS,j}$ лн.CH ₄ /кг	Вихід біогазу на одиницю маси СОР субстрату $Q_{bg,VSS,j}$ лн./кгСОР	Вихід CH ₄ на одиницю маси СОР субстрату $Q_{CH_4,VSS,j}$ лн.CH ₄ /кгСОР	Середня концентрація CH ₄ у виділеному біогазі $\bar{C}_{CH_4,T}$ % об.
<i>1-а серія досліджень</i>							
1	ПСП _{7,5}	3	422,4 (<i>s</i> = 17,4)	256,5 (<i>s</i> = 24,3)	490,6 (<i>s</i> = 20,2)	297,9 (<i>s</i> = 28,2)	60,6 (<i>s</i> = 3,6)
<i>2-а серія досліджень</i>							
2	ПСП _{8,2}	3	407,5 (<i>s</i> = 4,4)	256,8 (<i>s</i> = 8,6)	470,2 (<i>s</i> = 5,1)	296,4 (<i>s</i> = 10,0)	63,0 (<i>s</i> = 1,6)
3	СП_п8,2	2	341,3 (<i>s</i> = 16,9)	221,2 (<i>s</i> = 5,2)	418,8 (<i>s</i> = 20,8)	271,4 (<i>s</i> = 6,4)	64,9 (<i>s</i> = 1,7)
4	СП_н/п8,2	3	336,1 (<i>s</i> = 10,9)	223,6 (<i>s</i> = 2,1)	412,5 (<i>s</i> = 13,4)	274,4 (<i>s</i> = 2,9)	66,6 (<i>s</i> = 1,9)
<i>3-я серія досліджень</i>							
5	ПСП _{2,06}	2	295,4 (<i>s</i> = 6,9)	168,1 (<i>s</i> = 22,1)	340,9 (<i>s</i> = 8,0)	194,0 (<i>s</i> = 8,1)	56,8 (<i>s</i> = 6,2)
6	ПСП _{3,09}	1	309,8 (<i>s</i> = 0)	200,7 (<i>s</i> = 0)	357,6 (<i>s</i> = 0)	231,6 (<i>s</i> = 0)	64,8 (<i>s</i> = 0)
7	ПСП _{9,19}	2	355,8 (<i>s</i> = 17,7)	204,8 (<i>s</i> = 6,5)	410,6 (<i>s</i> = 20,5)	236,3 (<i>s</i> = 7,5)	57,7 (<i>s</i> = 4,7)
8	ПСП _{17,16}	2	430,2 (<i>s</i> = 4,7)	255,2 (<i>s</i> = 5,7)	496,4 (<i>s</i> = 5,4)	294,5 (<i>s</i> = 6,6)	59,3 (<i>s</i> = 2,0)
9	ПСП _{32,54}	2	457,1 (<i>s</i> = 8,2)	268,0 (<i>s</i> = 5,8)	527,5 (<i>s</i> = 9,4)	309,3 (<i>s</i> = 6,7)	58,6 (<i>s</i> = 0,2)
10	ПСП _{61,30}	2	467,2 (<i>s</i> = 3,3)	263,3 (<i>s</i> = 5,5)	539,1 (<i>s</i> = 3,8)	303,8 (<i>s</i> = 6,3)	56,4 (<i>s</i> = 1,6)

№ п/п	Код дослідної суміші	Кількість врахованих повторів дослідних проб <i>n</i> од.	Вихід біогазу на одиницю маси субстрату $Q_{bg,rS,j}$ лн./кг	Вихід CH ₄ на одиницю маси субстрату $Q_{CH_4,rS,j}$ лн.CH ₄ /кг	Вихід біогазу на одиницю маси СОР субстрату $Q_{bg,VSS,j}$ лн./кгСОР	Вихід CH ₄ на одиницю маси СОР субстрату $Q_{CH_4,VSS,j}$ лн.CH ₄ /кгСОР	Середня концентрація CH ₄ у виділеному біогазі $\bar{C}_{CH_4,T}$ % об.
<i>4-а серія досліджень</i>							
11	СК_п32,3	2	417,7 (<i>s</i> = 0,9)	264,2 (<i>s</i> = 4,7)	492,86 (<i>s</i> = 1,1)	311,8 (<i>s</i> = 7,8)	63,3 (<i>s</i> = 1,7)
12	ПСК32,0	3	393,08 (<i>s</i> = 7,1)	252,22 (<i>s</i> = 1,9)	468,35 (<i>s</i> = 8,5)	300,5 (<i>s</i> = 2,2)	64,2 (<i>s</i> = 1,2)
<i>5-а серія досліджень</i>							
13	ПСК10,0	2	317,63 (<i>s</i> = 31,2)	204,06 (<i>s</i> = 5,7)	392,41 (<i>s</i> = 38,5)	252,11 (<i>s</i> = 7,0)	64,5 (<i>s</i> = 4,5)
<i>6-а серія досліджень</i>							
14	ПСПі6,84	2	333,44 (<i>s</i> = 10,8)	206,51 (<i>s</i> = 24,9)	390,78 (<i>s</i> = 12,4)	240,31 (<i>s</i> = 28,7)	61,8 (<i>s</i> = 5,5)
15	ССі6,18	2	188,23 (<i>s</i> = 16,2)	113,84 (<i>s</i> = 8,5)	256,62 (<i>s</i> = 21,4)	153,43 (<i>s</i> = 11,2)	61,3 (<i>s</i> = 9,8)
16	ПЛСі6,61	2	218,56 (<i>s</i> = 2,0)	108,66 (<i>s</i> = 6,1)	254,51 (<i>s</i> = 2,2)	125,72 (<i>s</i> = 6,9)	49,7 (<i>s</i> = 3,2)
17	ПСПД6,8 8	2	261,17 (<i>s</i> = 9,4)	107,67 (<i>s</i> = 2,3)	303,15 (<i>s</i> = 10,8)	125,94 (<i>s</i> = 2,6)	41,2 (<i>s</i> = 0,6)
18	ССД6,18	2	184,41 (<i>s</i> = 36,0)	80,67 (<i>s</i> = 37,4)	246,25 (<i>s</i> = 47,9)	108,88 (<i>s</i> = 49,4)	41,4 (<i>s</i> = 12,2)
19	ПЛСД6,5 7	2	278,43 (<i>s</i> = 60,6)	185,14 (<i>s</i> = 34,0)	317,51 (<i>s</i> = 68,4)	211,35 (<i>s</i> = 38,4)	67,0 (<i>s</i> = 2,4)

s – стандартне відхилення по вибірці даних “*n*” (функція «СТАНДОТКЛ» в MS Excel версії 14.0.6023.1000).

Зразки соломи пшениці

З наведених в **Табл. 4.8** результатів видно, що вихід CH₄ зі зразків соломи в гранульованій формі є найбільшим, у порівнянні з іншими формами соломи, і складає 300-320 лн.CH₄/кгСОР.

Використаний в серії №6 зразок гранульованої соломи іншого виробника показав помітно нижчий вихід метану 269 лн.CH₄/кгСОР і, при цьому, цей показник залежав від типу використаного інокуляту. Це вказує на те, що сорт пшениці, з соломи якої виготовлено гранули, та технологія гранулювання

можуть мати істотний вплив на вихід CH_4 з гранульованої форми соломи. Це потребує подальшого дослідження.

Зброджування гранул соломи пшениці з дигестатом біогазової станції показало майже вдвічі менший вихід CH_4 , у порівнянні з дослідним зразком з використанням інокуляту лабораторного – лише 128 л_н. CH_4 /кгСОР. Вплив типу інокуляту на вихід біогазу є науково відомим фактом. Це вказує на необхідність паралельного тестування проб матеріалу з різними типами інокуляту та наступного узагальнення отриманих результатів, а з наукової точки зору – потребує подальших досліджень мікробного та хімічного складу інокулятів та впливу на процес біодеструкції органічної речовини різних видів матеріалів.

Зменшення лінійних розмірів часток природньої соломи шляхом механічного подрібнення майже не впливає на вихід CH_4 . Так, питомий вихід CH_4 на одиницю маси внесеної СОР для соломи з середнім лінійним розміром фракцій 50-100 мм (зразок СП_н/п) склав 277,1 л_н. CH_4 /кгСОР, а для соломи з розміром фракцій < 2 мм (зразок СП_п) – 277,8 л_н. CH_4 /кгСОР. Зразок подрібненої соломи (січка солом'яна), використаний в серії №6 показав суттєво нижчі показники виходу біогазу. Це ще раз вказує на вплив сорту пшениці, з якої одержано солону, на вихід CH_4 . Вихід CH_4 з січки солом'яної з використанням інокуляту лабораторного склав 164,6 л_н. CH_4 /кгСОР, при використанні дигестату – 158,3 л_н. CH_4 /кгСОР.

Зразки стебел кукурудзи

За величиною питомого виходу метану CH_4 на одиницю маси СОР в серії досліджень №4 виявилось, що таке значення для подрібнених стебел кукурудзи 319,6 л_н. CH_4 /кгСОР є навіть вищим, ніж для гранульованої форми – 302,7 л_н. CH_4 /кгСОР. Втім, за даною серією тестів робити однозначні висновки не можна, оскільки для дослідження було обрано нативну стеблову масу кукурудзи, яка не є відповідною тій стебловій масі кукурудзи, що була використана при виробництві гранул. Таким чином, на вихід біогазу/метану з пожнивних решток кукурудзи може суттєвим чином впливати сорт кукурудзи, період її збору, подібно як при зброджуванні кукурудзи силосної. Це частково було підтверджено за результатами серії досліджень №5, де при зброджуванні зразка стебел кукурудзи в гранульованій формі вихід CH_4 оцінено в 259,1 л_н. CH_4 /кгСОР, що є нижчим, ніж у серії №4. Вплив методу обробки стебел кукурудзи певного сорту на показники виходу біогазу потребує подальших досліджень.

Отримані результати показують, що суха стебло-листова маса кукурудзи за виходом CH_4 є близькою спеціально вирощуваній кукурудзі на силос, що збирається на стадії молочно-воскової стиглості в зеленій масі. Так, за

результатами роботи [244] встановлено, що вихід CH_4 залежить від гібриду кукурудзи і складає 230-312 л_н. CH_4 /кгСОР, що відповідає діапазону значень, встановленим в даній роботі для зразків сухих стебел кукурудзи – 260-320 л_н. CH_4 /кгСОР. Співмірними також є вихід CH_4 на одиницю маси СОР гранульованої форми соломи пшениці та стебел кукурудзи.

Лушпиння соняшнику

Вихід CH_4 при зброджуванні гранул з лушпиння соняшнику з використанням дигестату біогазової станції склав 249,8 л_н. CH_4 /кгСОР, а при зброджуванні з інокулятом лабораторним – лише 132,6 л_н. CH_4 /кгСОР. Встановлені результати вказують на досить високий вихід біогазу з лушпиння, проте потребують подальших досліджень, з використанням різних типів інокуляту.

Загальним висновком з отриманих результатів є те, що пожнивні рештки основних сільськогосподарських культур в Україні є цінним ресурсом, з точки зору виробництва біогазу, оскільки дозволяють отримувати 200-470 м³/т біогазу з вмістом CH_4 на рівні 57-65%, в залежності від культури та способу попередньої підготовки.

Кумулятивний вихід біогазу в часі

Кумулятивний вихід біогазу є сумою об'ємів виділеного біогазу від початку експерименту до визначеного моменту часу. Графічне зображення зміни кумулятивного виходу біогазу в часі при зброджуванні дослідних сумішей в серіях 1-6 наведено на **Рис. 4.30-4.37**. Зведена похибка візуального зчитування об'єму біогазу в евідіометрах за період досліджень для кожної з досліджених проб не перевищувала 2,6%.

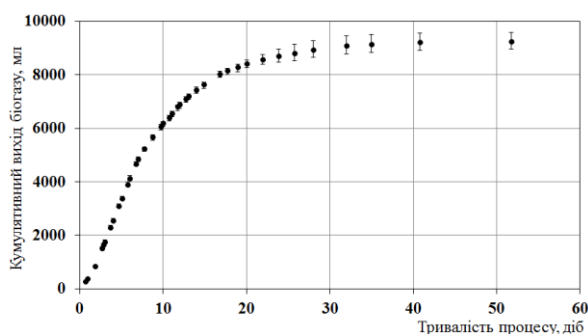


Рис. 4.30. Результати серії досліджень №1 (ПСІ).

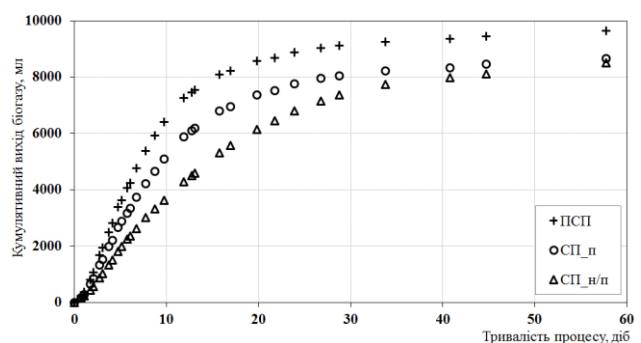


Рис. 4.31. Результати серії досліджень №2.

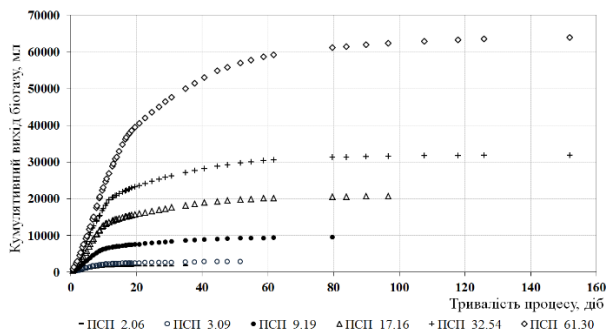


Рис. 4.32. Результати серії досліджень №3.

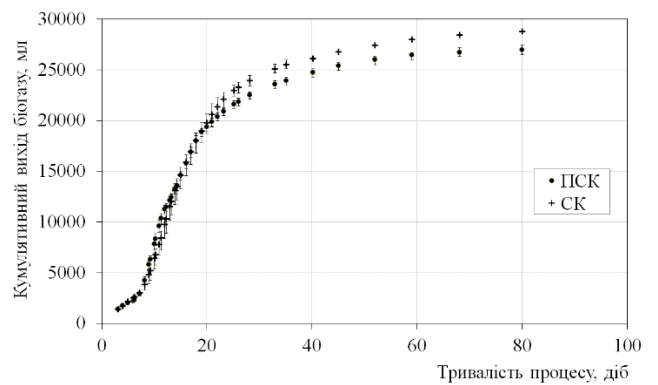


Рис. 4.33. Результати серії досліджень №4.

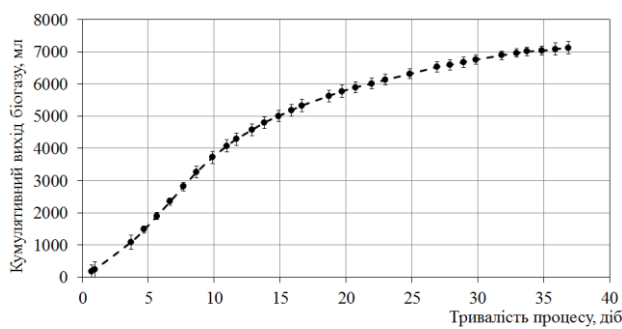


Рис. 4.34. Результати серії досліджень №5 (ПСК).

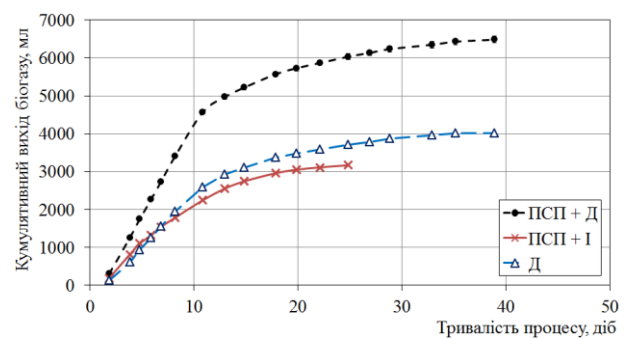


Рис. 4.35. Результати серії досліджень №6 (ПСП).

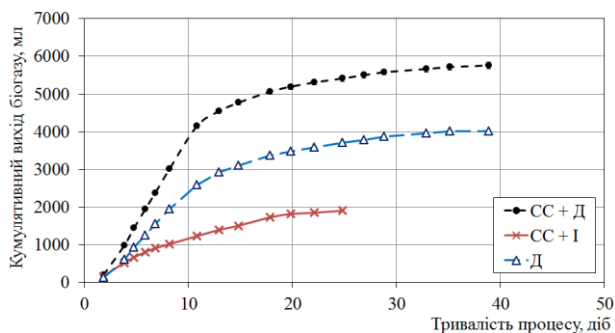


Рис. 4.36. Результати серії досліджень №6 (СС).

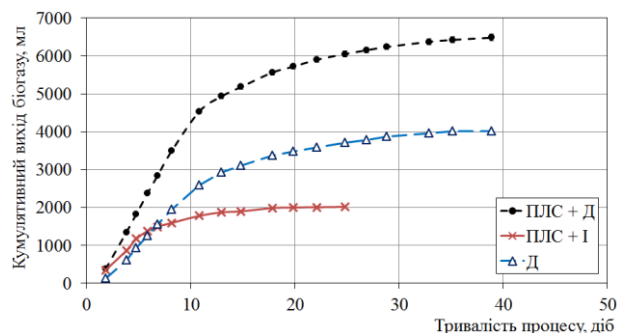


Рис. 4.37. Результати серії досліджень №6 (ПЛС).

Характер графіків на **Рис. 4.30-4.37** вказує на правильно обране відношення маси СОР матеріалу до маси СОР інокуляту (дигестату). Лаг-фаза процесу, протягом якої бактерії адаптуються до умов середовища, не перевищувала 5-7 днів, з наступною фазою експоненційною росту та фазою затухання процесу виділення біогазу. При цьому досягалась задовільна збіжність показників кумулятивного виходу біогазу в часі для стартових сумішей у 2- чи 3-кратних повторностях. Отримані форми графічної залежності кумулятивного

виходу біогазу в часі дозволяють визначити кінетичні параметри процесу для моделей розпаду 1-го порядку та Гомпертца, як показано далі.

Як видно з **Рис. 4.32**, за результатами серії досліджень №3, лаг-фаза процесу для різних досліджених сумішей не перевищувала 2-3 діб. Це вказує на досить низький вміст в органічній речовині соломи пшениці летких жирних кислот та низьку швидкість гідролізу органічної речовини. З однієї сторони, це дозволяє підтримувати стабільність процесу навіть при підвищених значеннях органічного навантаження в біореакторах проточного типу, а з іншої – визначає гідроліз органічної речовини соломи пшениці як критичну фазу, що лімітує загальну швидкість процесу.

Склад біогазу

В усіх досліджених сумішах з рослинною сировиною, середній вміст CH_4 в біогазі складав 56,4-66,6%, що є нормальним значенням для біогазу з такого типу сировини. Похибка візуального зчитування показів концентрації CH_4 не перевищує 1%.

Графічні зображення зміни об'ємної концентрації CH_4 та CO_2 в біогазі у часі при зброджуванні дослідних сумішей в серіях 1-6 наведено на **Рис. 4.38-4.57**.

Вміст CH_4 , CO_2 в біогазі в часі

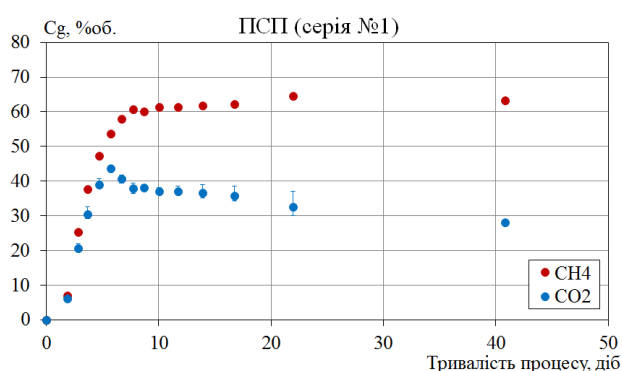


Рис. 4.38. Результати серії №1.

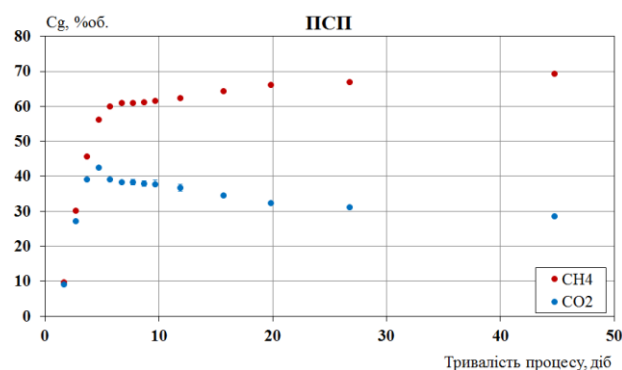


Рис. 4.39. Результати серії №2 (ПСП).

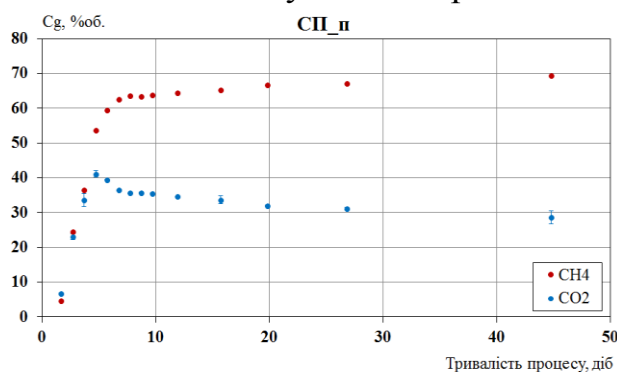


Рис. 4.40. Результати серії №2 (СП_п).

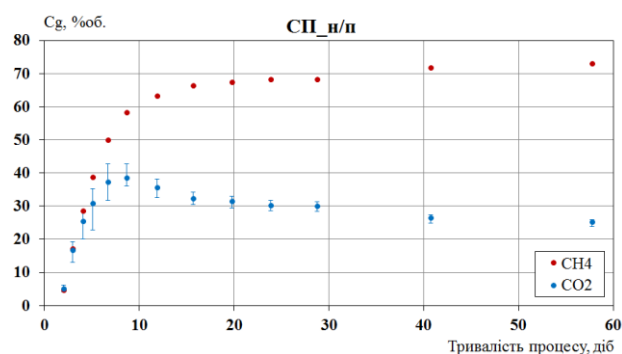


Рис. 4.41. Результати серії №2 (СП_н/п).

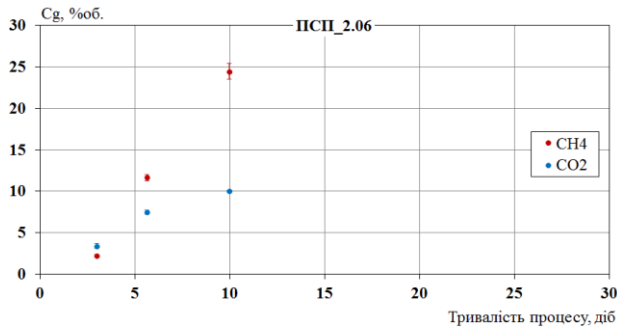


Рис. 4.42. Результати серії №3 (ПСП_{2.06}).

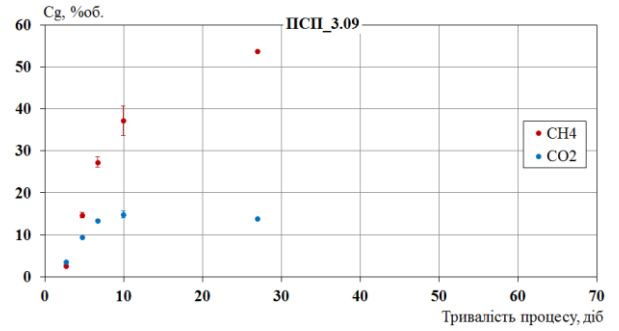


Рис. 4.43. Результати серії №3 (ПСП_{3.09}).

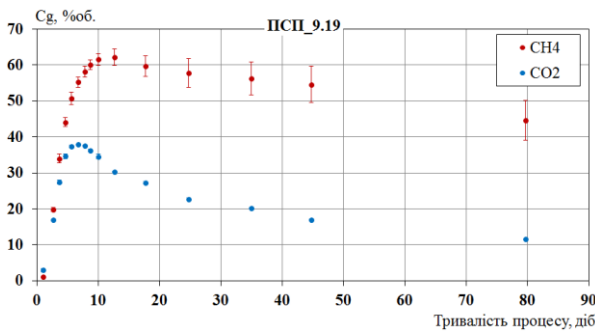


Рис. 4.44. Результати серії №3 (ПСП_{9.19}).

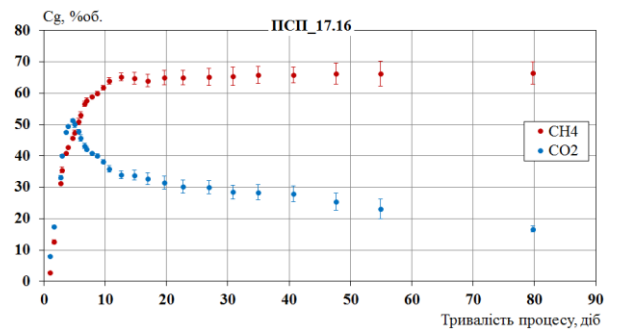


Рис. 4.45. Результати серії №3 (ПСП_{17.16}).

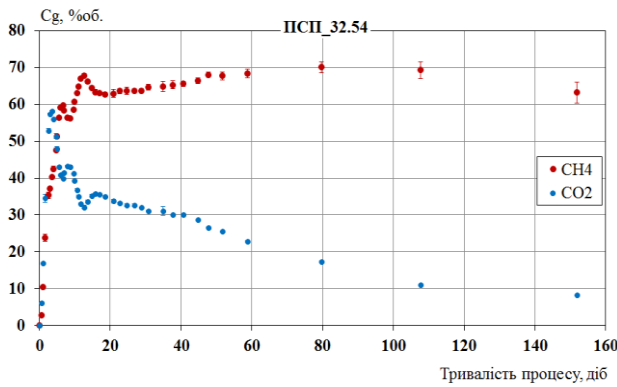


Рис. 4.46. Результати серії №3 (ПСП_{32.54}).

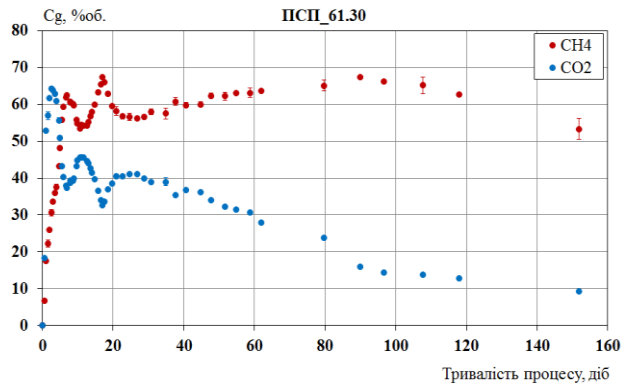


Рис. 4.47. Результати серії №3 (ПСП_{61.30}).

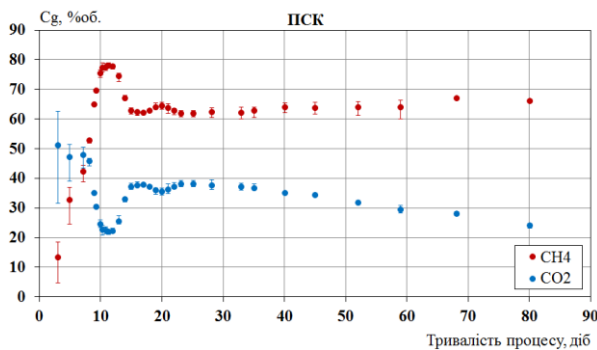


Рис. 4.48. Результати серії №4 (ПСК).

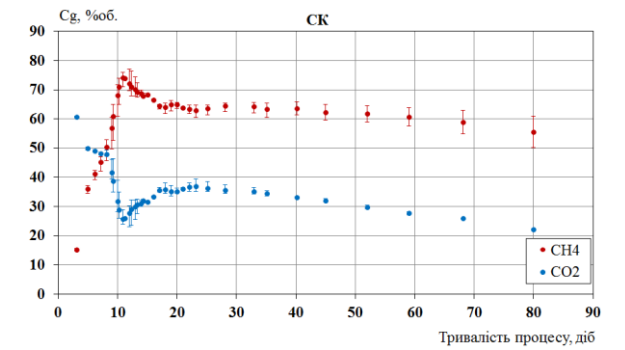


Рис. 4.49. Результати серії №4 (СК).

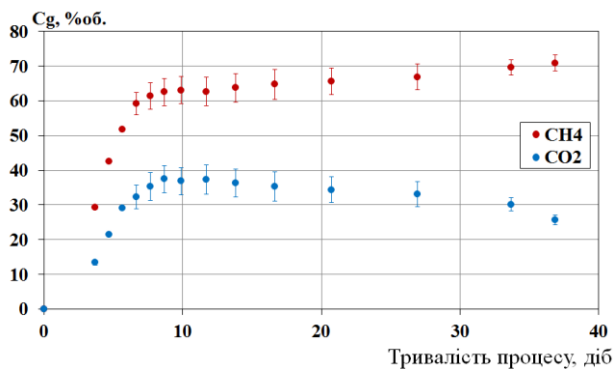


Рис. 4.50. Результати серії №5 (ПСК).

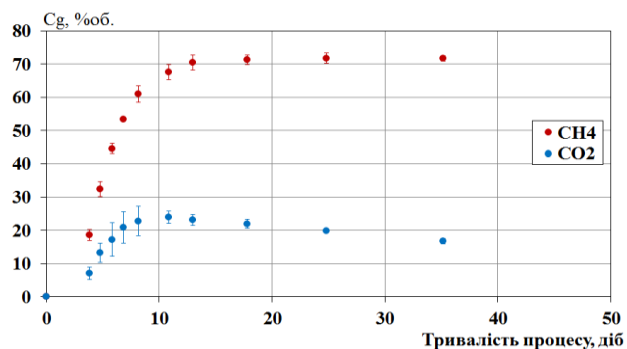


Рис. 4.51. Результати серії №6 (Дигестат)

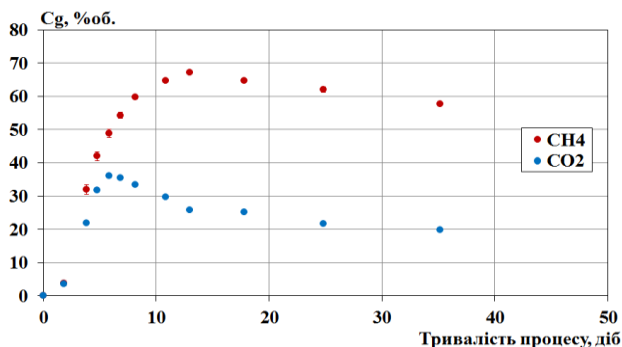


Рис. 4.52. Результати серії №6 (ПСП+Д)

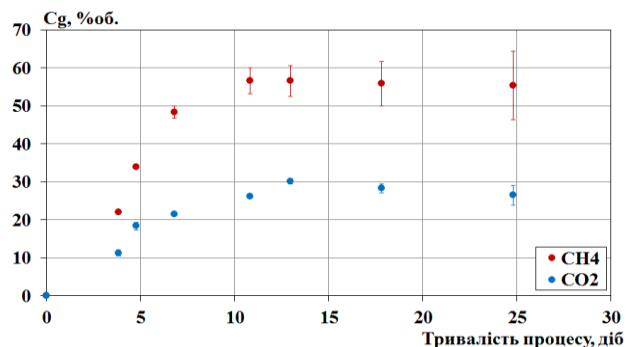


Рис. 4.53. Результати серії №6 (ПСП+І).

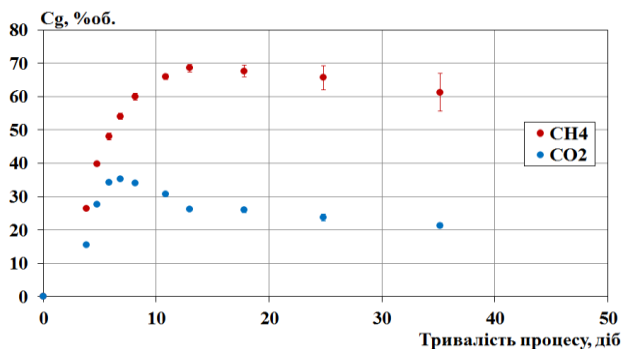


Рис. 4.54. Результати серії №6 (СС+Д)

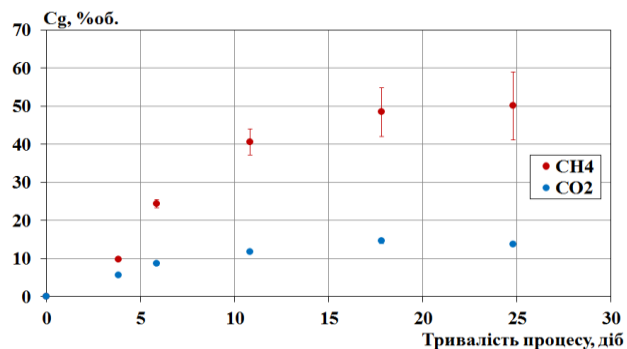


Рис. 4.55. Результати серії №6 (СС+І).

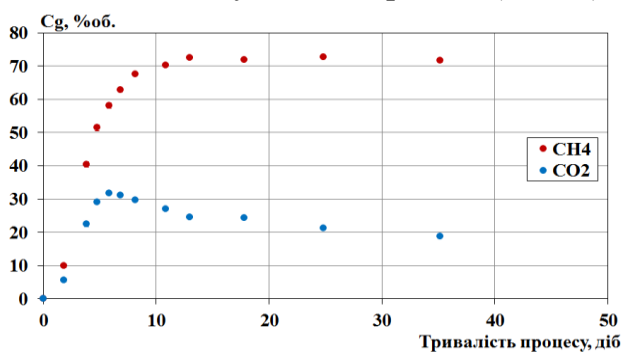


Рис. 4.56. Результати серії №6 (ПІС+Д).

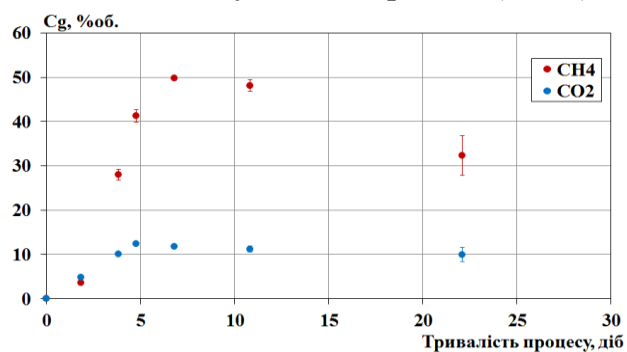


Рис. 4.57. Результати серії №6 (ПІС+І).

Склад біогазу в періодичному процесі зброджування суттєво змінюється. Можна умовно виділити два періоди з характерними змінами – період від

початку тесту до встановлення певної квазі-рівноважної концентрації CH_4 в біогазі, та подальший період до завершення тесту.

Зміна концентрації CH_4 у першому періоді часу пояснюється з одного боку перехідним періодом адаптації метанових бактерій та домінуванням перших стадій розпаду органічної речовини з переважним утворенням CO_2 , а з іншої – наявністю початкового баластового об'єму газового простору герметичної системи біореактор-евдіометр (1100-1550 мл), в результаті чого заміряні концентрації газів є меншими від тих, що виділяються з нативним біогазом. По мірі витіснення новими порціями утвореного біогазу в газовому просторі реактор-евдіометр, концентрація газів наближається до дійсної. Досягнення значень концентрацій газів в евдіометрі, що відповідають складу нативного біогазу, залежить як від об'єму газового простору реактор-евдіометр, так і від початкового складу суміші в реакторі, а відтак і швидкості утворення біогазу. Типово, в евдіометрах встановлюється концентрація газів, наближена до концентрації газів в нативному біогазі, після 10-15 діб експерименту, що добре видно з наведених графічних зображень зміни об'ємної концентрації CH_4 та CO_2 в біогазі у часі.

Зміна складу біогазу в евдіометрі, після встановлення в ньому рівноважних концентрацій CH_4 та CO_2 , пояснюється двома основними факторами. В тестах з відносно низькою стартовою концентрацією COP субстрату в реакторах, у другому періоді зміни концентрації газів в евдіометрі, помітним є поступове падіння концентрації CO_2 , причому концентрація CH_4 залишалась в більшості тестів на відносно сталому рівні. Падіння концентрації CO_2 призводило до пропорційного збільшення концентрації інших газів, які наявними приладами вимірювань не можуть бути ідентифіковані. На підставі теоретичних засад процесу метанового бродіння можна допустити, що не ідентифікований газ, концентрація якого в ряді випадків доходила до 20-30%, є воднем в газоподібному стані H_2 . Виділення водню можливе за умови пригнічення метаболізму водневотрофної групи метаногенів, які конвертують проміжні продукти біохімічних реакцій CO_2^- та H^+ в CH_4 . Таким чином, проміжний продукт H^+ може виділитись в формі H_2 , а завершальна стадія періодичного процесу зброджування може характеризуватись протіканням двох типів бродіння одночасно – метанової ферментації та «темної» ферментації.

Характерні зміни складу біогазу спостерігались при зброджуванні сумішею з стартовими концентраціями COP більше 32 г COP /л: ПСП_{32,54}, ПСП_{61,30}, СК_п_{32,3} та ПСК_{32,0}. Після досягнення першого найбільшого значення CH_4 в евдіометрі для цих тестів спостерігалось зниження концентрації CH_4 та пропорційне збільшення концентрації CO_2 , для сумішей з ПСП таке зниження спостерігалось

у 2 періоди. При цьому, чим вищою була стартова концентрація СОР в реакторі, тим глибшим та інтенсивнішим було падіння концентрації CH_4 . Це може свідчити про інгібування метаболізму метаногенних груп бактерій/архей проміжними продуктами розпаду органіки субстратів.

Швидкість виходу CH_4

Графічні зображення зміни поточної та приведеної швидкості виходу CH_4 в біогазі у часі при зброджуванні дослідних сумішей в серіях 1-6 наведено на **Рис. 4.58-4.77**.

Поточна швидкість виходу CH_4 визначається як відношення об'єму виділеного CH_4 за період часу між двома послідовними зчитуваннями показів евідіометра до цього періоду часу. Приведена швидкість визначається як відношення об'єму виділеного CH_4 за період часу від початку експерименту до визначеного моменту до цього періоду часу.

Швидкість виходу CH_4 та концентрація СОР субстрату в часі

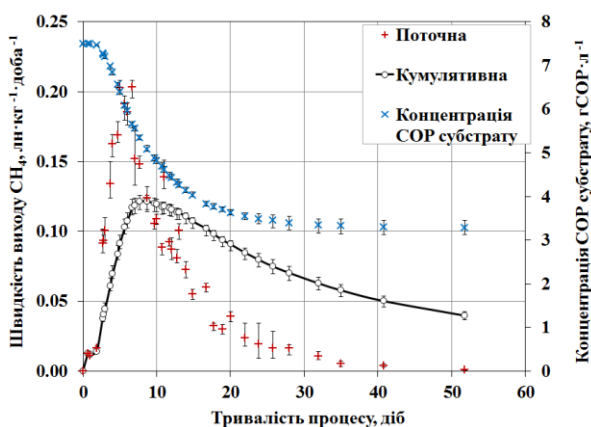


Рис. 4.58. Результати серії №1 (ПСП)

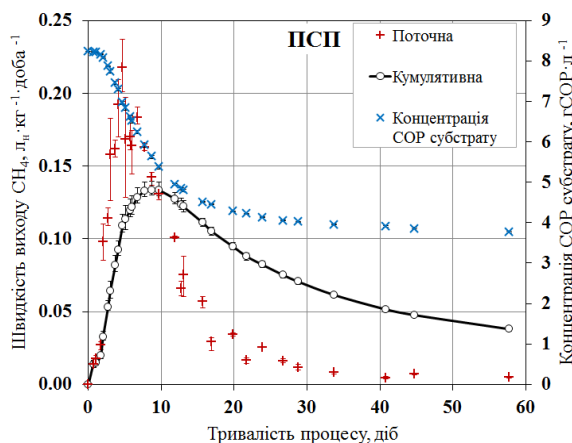


Рис. 4.59. Результати серії №2 (ПСП)

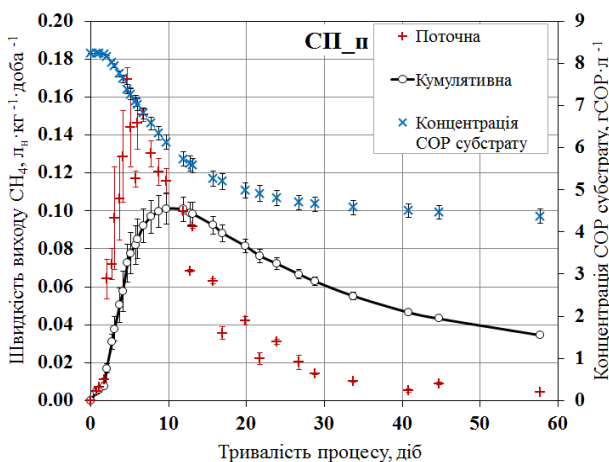


Рис. 4.60. Результати серії №2 (СП_п)

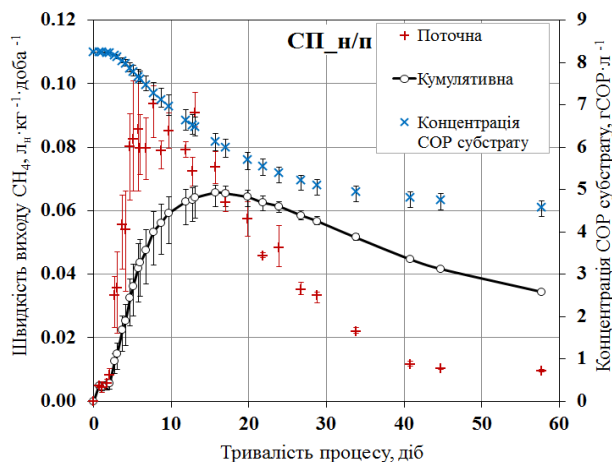


Рис. 4.61. Результати серії №2 (СП_н/п)

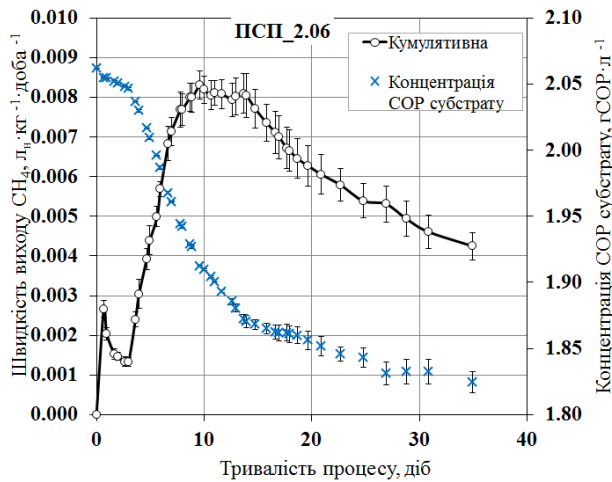


Рис. 4.62. Результати серії №3 (ПСП_{2.06})

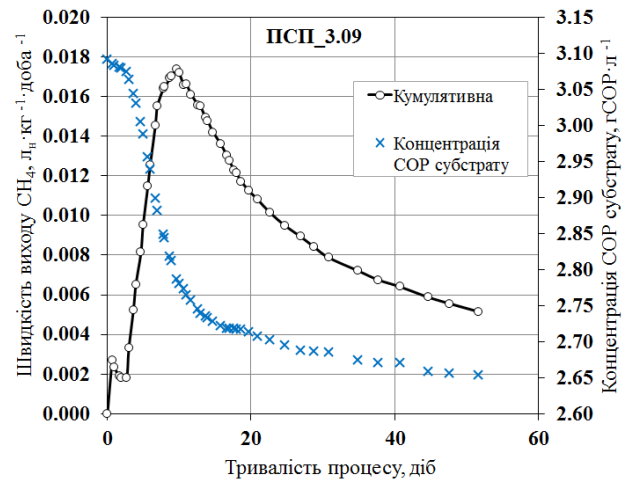


Рис. 4.63. Результати серії №3 (ПСП_{3.09})

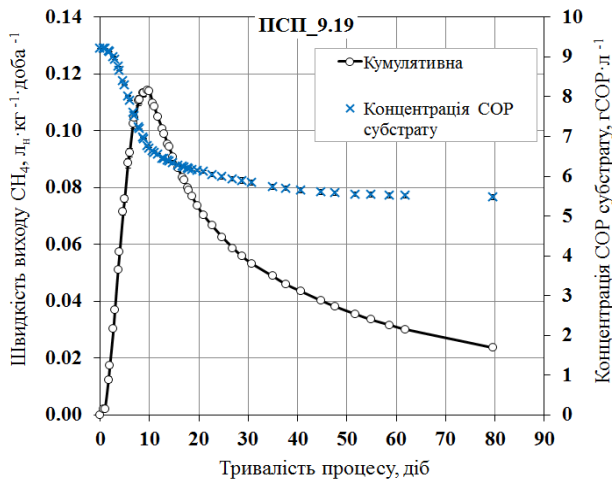


Рис. 4.64. Результати серії №3 (ПСП_{9.19})

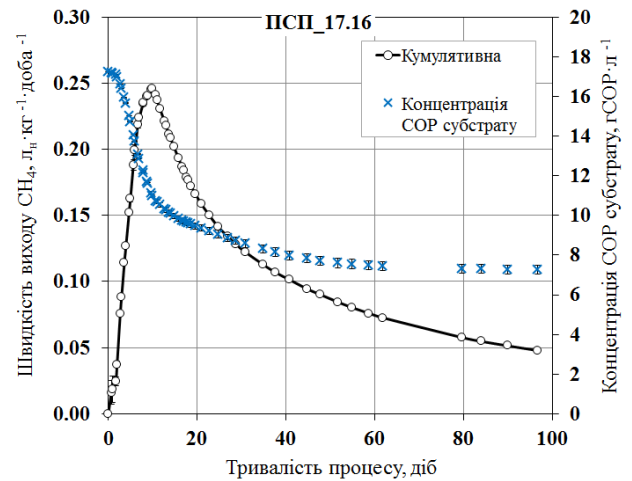


Рис. 4.65. Результати серії №3 (ПСП_{17.16})

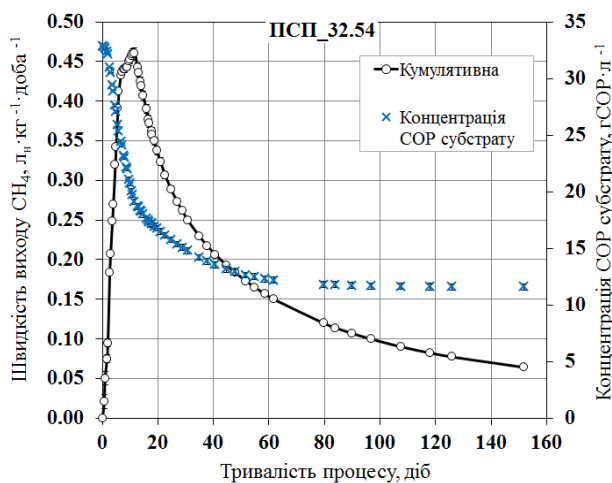


Рис. 4.66. Результати серії №3 (ПСП_{32.54})

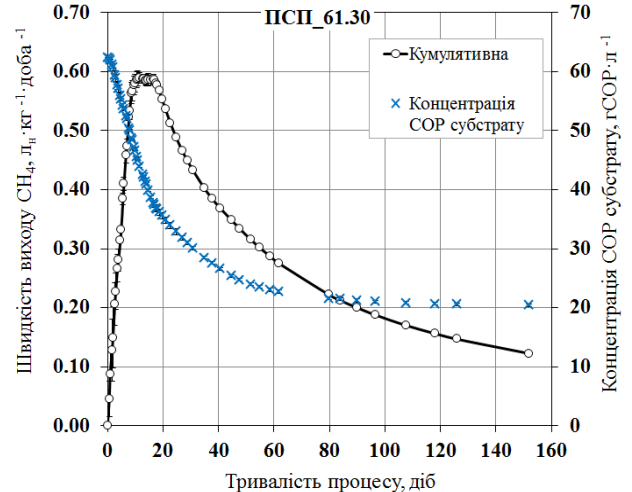


Рис. 4.67. Результати серії №3 (ПСП_{61.30})

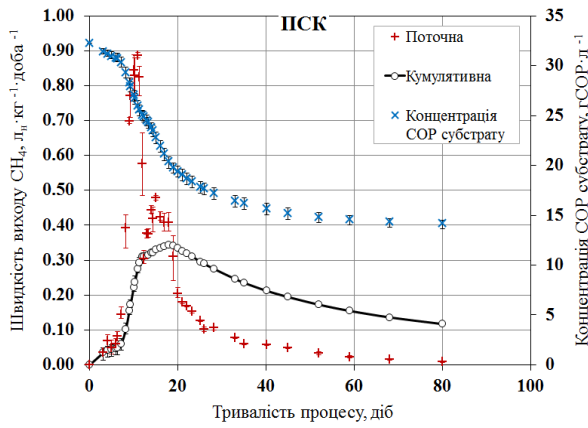


Рис. 4.68. Результати серії №4 (ПСК)

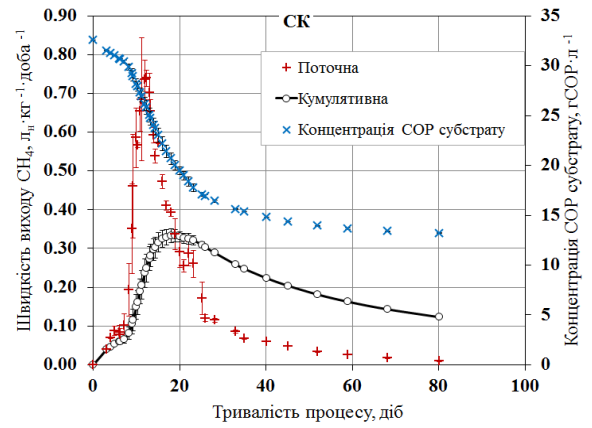


Рис. 4.69. Результати серії №4 (СК)

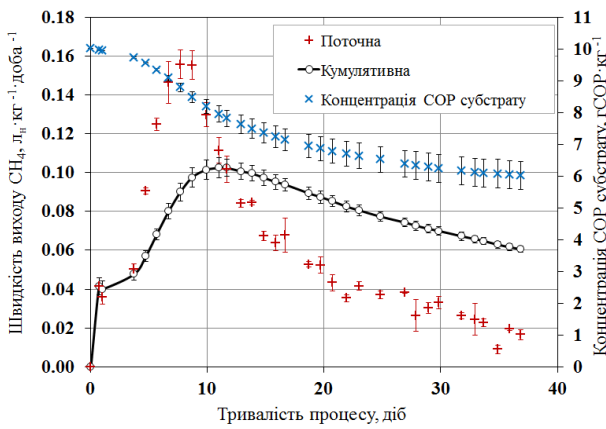


Рис. 4.70. Результати серії №5 (ПСК)

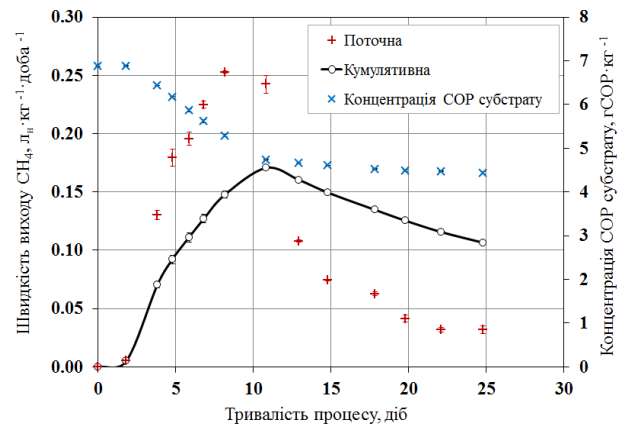


Рис. 4.71. Результати серії №6 (ПСП+Д)

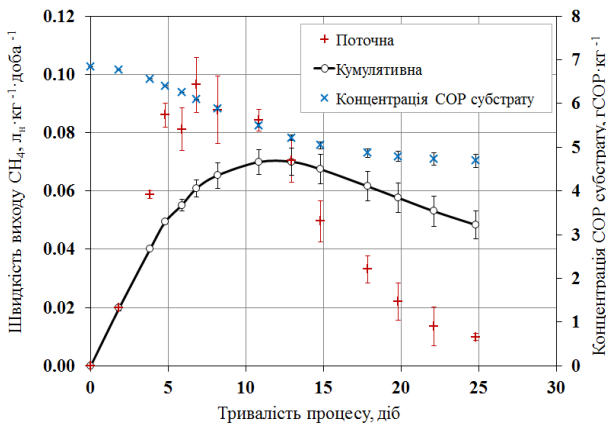


Рис. 4.72. Результати серії №6 (ПСП+І)

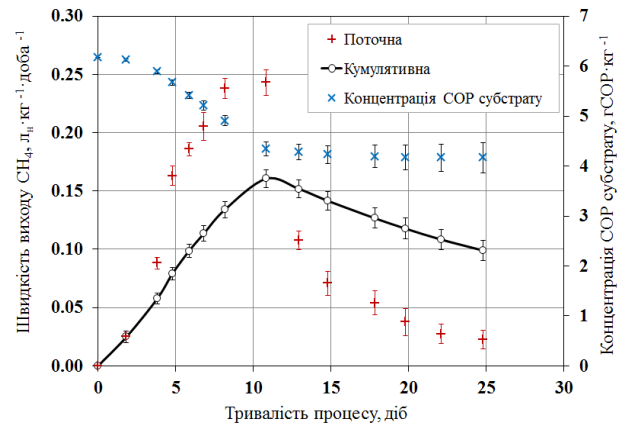


Рис. 4.73. Результати серії №6 (СС+Д)

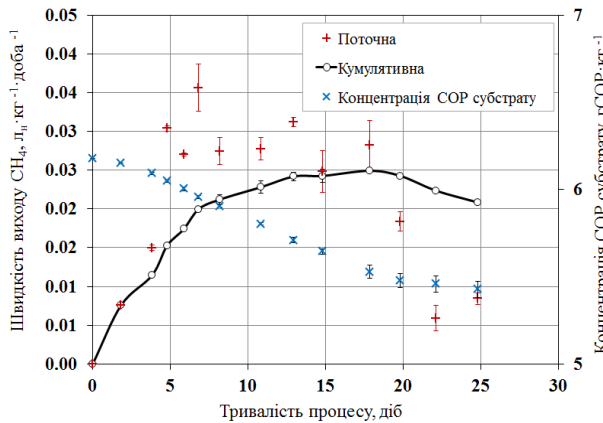


Рис. 4.74. Результати серії №6 (СС+І)

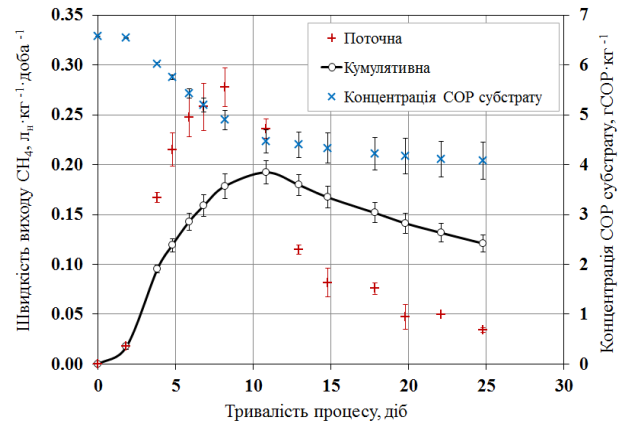


Рис. 4.75. Результати серії №6 (ПЛС+Д)

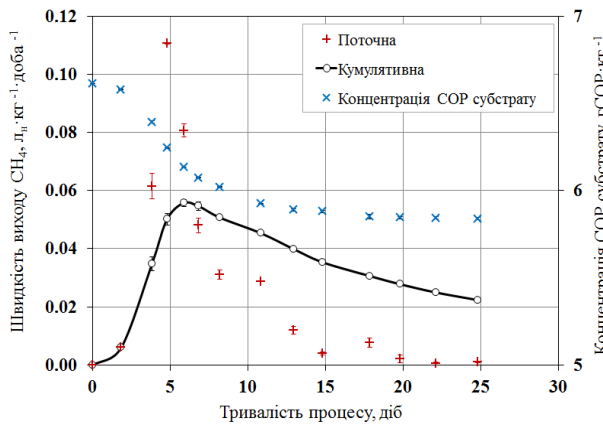


Рис. 4.76. Результати серії №6 (ПЛС+І)

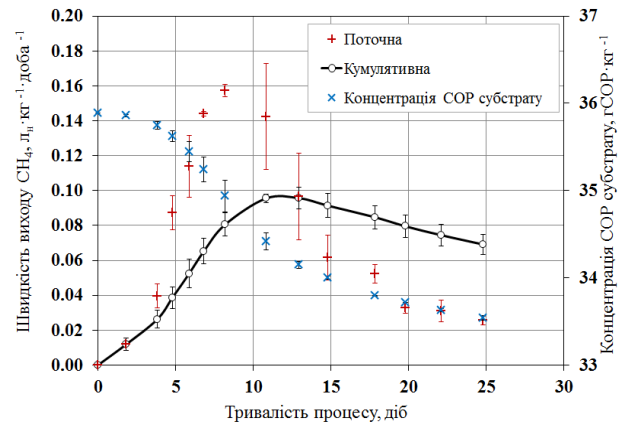


Рис. 4.77. Результати серії №6 (Дигестат)

Тип рослинної біомаси та спосіб її попередньої обробки впливає на швидкість виходу біогазу. Серед досліджених типів рослинної сировини найбільш інтенсивно розпад органічної речовини відбувається при зброджуванні гранульованої соломи пшениці (ПСП), а також гранул (ПСК) та природної форми стебел кукурудзи (СК).

Так, в серії досліджень №2 найбільша поточна швидкість виходу CH_4 при зброджуванні зразку ПСП в середньому становила $0,22 \text{ лн.}\text{CH}_4/\text{кг}\cdot\text{добу}$ (Рис. 4.59), що на 30,4% та 122,4% вище, ніж аналогічний показник при зброджуванні подрібненої (СП_п) (Рис. 4.60) та не подрібненої соломи (СП_н/п) (Рис. 4.61), відповідно. При цьому, найвище значення кумулятивної питомої швидкості виходу CH_4 спостерігалось для ПСП та СП_п на 9 добу спостережень, тоді як для не подрібненої соломи – на 16 добу спостережень. Різниця в часі для виходу на максимальну швидкість по метану пояснюється, вочевидь, більшим часом,

необхідним для гідролізу органічної речовини та менш розвиненою поверхнею масообміну субстрату, як у випадку не подрібненої соломи. Це вказує на те, що збільшення поверхні масообміну та додаткове руйнування стінок та волокон лігно-целюлозної сировини при механічному подрібненні та екструзії дозволяє суттєво прискорити протікання процесу гідролізу, що може бути найбільш повільною реакцією при метановому бродінні такого типу сировини.

Швидкість виходу біогазу залежить також від стартової концентрації СОР в реакторі, що було досліджено в серії 3 експерименту. На **Рис. 4.78** можна побачити різницю в інтенсивності виділення CH_4 при зміні стартової концентрації СОР в реакторі. Так, при збільшенні концентрації СОР збільшувалось значення найбільшої досягнутої швидкості виходу CH_4 , але при цьому також збільшувався період часу від початку процесу бродіння до досягнення такого значення. Це свідчить про те, що збільшення стартової концентрації СОР призводить також до збільшення швидкості утворення продуктів перших стадій процесу, які в результаті призводять до пригнічення метаболізму метаногенних бактерій/архей, що містились в інокуляті, внесеному в реактори. Найбільше значення кумулятивної швидкості $0,59 \text{ л}_n\text{CH}_4/\text{кг}\cdot\text{добу}$ було зафіксовано при зброджуванні дослідної суміші з гранулами соломи пшениці при стартовій концентрації СОР в реакторі $C_{\text{VS},0} = 61,3 \text{ гСОР}/\text{кг}$ за період 12-13 діб. При цьому найбільше досягнуте поточне значення швидкості виходу CH_4 склало $1,05 \text{ л}_n\text{CH}_4/\text{кг}\cdot\text{добу}$.

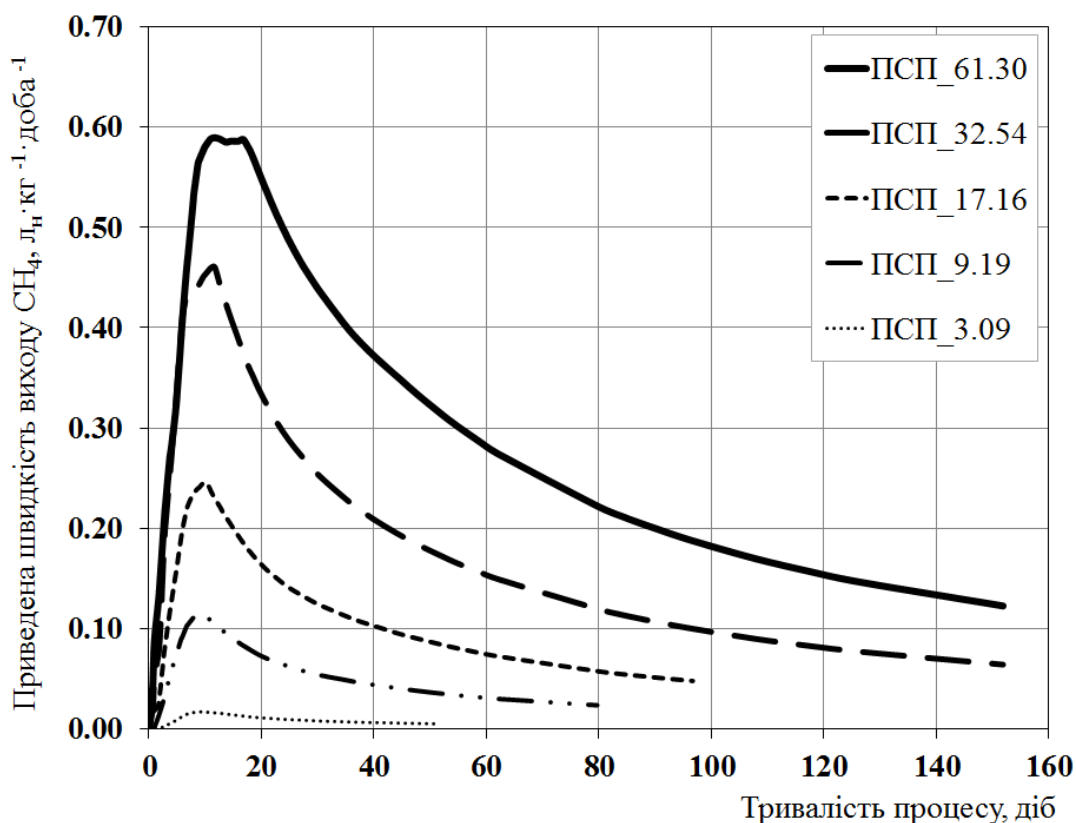
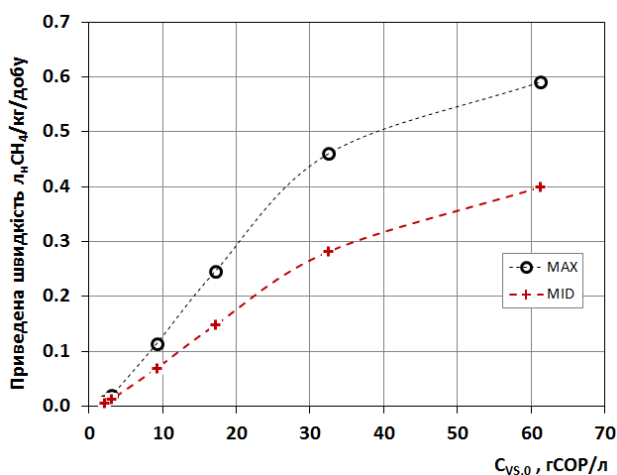


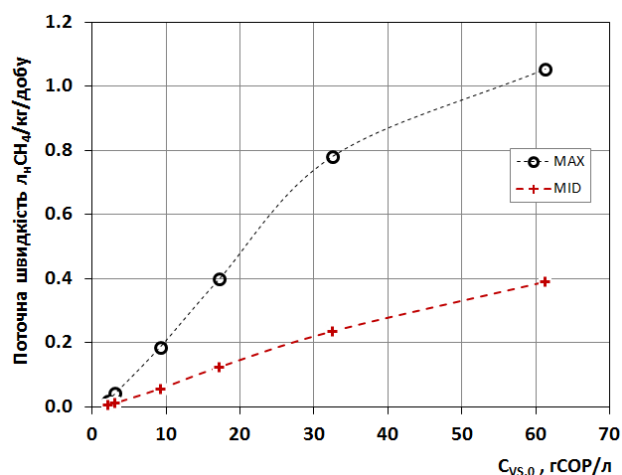
Рис. 4.78. Приведена швидкість виходу CH_4 в часі при різних початкових концентраціях COP гранул соломи пшениці в реакторі (серія 3).

Як видно з **Рис. 4.79** та **Рис. 4.80**, значення найбільшої досягнутої швидкості виходу CH_4 змінюється лінійно до концентрації $C_{\text{VS},0}$ 27-30 гCOP/кг.



MAX – максимальне значення;
MID – усереднене значення.

Рис. 4.79. Приведена швидкість виходу CH_4 в залежності від початкової концентрації COP в реакторі (серія 3)



MAX – максимальне значення;
MID – усереднене значення.

Рис. 4.80. Поточна швидкість виходу CH_4 в залежності від початкової концентрації COP в реакторі (серія 3)

Подальше збільшення $C_{VS,0}$ веде до зміни лінійного характеру залежності. Діапазон значень стартових концентрацій СОР, випробуваних в даному тесті, не дозволяє однозначно судити про характер залежності при збільшеному діапазоні значень, а тому потребує додаткових досліджень. При цьому можливо виявити значення початкової концентрації СОР соломи, за якого процес метаноутворення буде повністю припинено.

Кінетичні константи швидкості виходу біогазу

Для оцінки кінетичних параметрів швидкості утворення біогазу окремо використано дві кінетичних моделі. Константи швидкості в даних моделях визначено шляхом пристосування даних експериментальних досліджень, зокрема кумулятивного виходу CH_4 на одиницю внесеної в біореактор маси СОР субстратів, до моделі з використанням регресійного аналізу даних методом узагальненого приведенного градієнту.

Для оцінки кінетичних констант використано дві моделі, а саме:

1. Модель Гомпертца (*Gompertz`s model*):

$$P_{(t)} = P_T \cdot (1 + 0.01\varphi) \cdot \exp \left\{ -\exp \left[\frac{R_m \times e}{P_T} (T_{LAG} - t) + 1 \right] \right\} \quad (4.4.1)$$

де $P_{(t)}$ – фактичний кумулятивний вихід метану на момент часу t , оцінений за результатами експериментальних досліджень, $л_нCH_4/кгСОР$; P_T – граничний кумулятивний вихід метану, оцінений за результатами експериментальних досліджень, $л_нCH_4/кгСОР$; φ – частка залишкового виходу біогазу, % до P_T ; T_{LAG} – тривалість лаг-фази, діб; R_{max} – максимальна швидкість виходу CH_4 , $л_н/кгСОР/добу$.

2. Кінетична модель 1-го порядку (*1-st order model*)

$$P_{(t)} = P_T \cdot (1 + 0.01\varphi) \cdot (1 - \exp^{-k \cdot (t - T_{LAG})}) \quad (4.4.2)$$

де k – константа швидкості виходу CH_4 , $доба^{-1}$.

За результатами серії досліджень №2 встановлено значення константи швидкості виходу біогазу для моделі розпаду 1-го порядку. Як видно з **Рис. 4.81**, кожен наступний етап обробки соломи призводить до збільшення значення константи. Так, константа k зростає з 0,0605/добу для не подрібненої соломи пшениці (СП_н/п) до 0,1009/добу для соломи пшениці подрібненої (СП_п), тобто на 67%. Гранулювання соломи призводить до збільшення константи швидкості виходу біогазу майже в 2 рази – до 0,1208/добу, у порівнянні з не подрібненою соломною (СП_н/п).

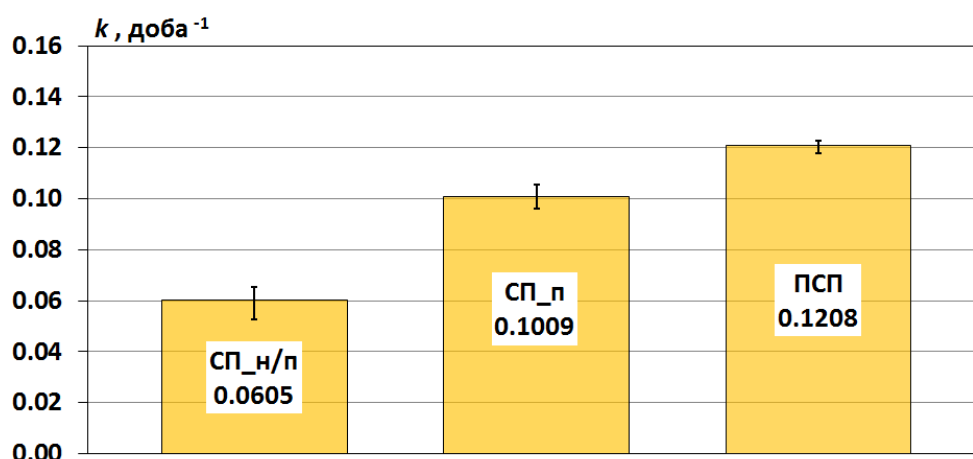


Рис. 4.81. Константи швидкості виходу біогазу k для моделі розпаду 1-го порядку (серія досліджень №2)

В **Табл. 4.9** наведено результати оцінки кінетичних параметрів k для моделі розпаду 1-го порядку при зброджуванні гранул соломи пшениці при різних стартових концентраціях органічної речовини в дослідних сумішах (серія 3).

Табл. 4.9. Результати оцінки кінетичної константи k (серія 3)

№	Код досліджу	C_{vs}	k	T_{LAG}	ϕ	Коефіцієнт детермінації R^2
		гСОР/л	доба ⁻¹	діб	%	
Зразки гранул соломи пшениці						
1	ПСП _{2,06}	2,06	0,1342	4,0	0,0	0,819
2	ПСП _{3,09}	3,09	0,1258	3,5	0,0	0,878
3	ПСП _{9,19}	9,19	0,0971	0,6	10,0	0,823
4	ПСП _{17,16}	17,16	0,0847	0,6	0,0	0,946
5	ПСП _{32,54}	32,54	0,0727	0,7	0,0	0,965
6	ПСП _{61,30}	61,30	0,0454	0,0	0,0	0,974

Як видно з **Рис. 4.82**, залежність константи швидкості виходу біогазу 1-го порядку від стартової концентрації СОР гранул соломи в реакторі досить добре описується логарифмічним рівнянням виду $[y = a \cdot \ln(C_{vs,0}) + b]$.

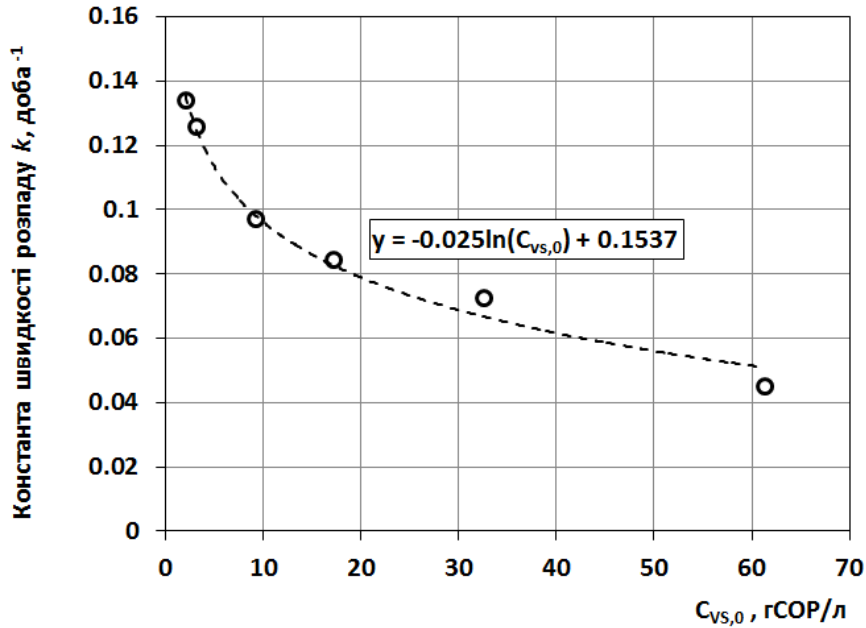


Рис. 4.82. Залежність константи швидкості виходу біогазу від початкової концентрації СОР гранульованої соломи пшениці в реакторах періодичної дії

При зброджуванні гранул соломи пшениці, збільшення стартової концентрації з 2,1 до 61,3 гСОР л призвело до зниження коефіцієнту k з 0,1342 до 0,0454/добу. При цьому модель розпаду 1-го порядку проявила себе більш адекватно для дослідних проб зі стартовою концентрацією СОР більше 17,16 гСОР/л – показник R^2 перевищував 0,946. При нижчих стартових концентраціях СОР збіжність результатів експерименту та розрахунку виявилась дещо нижчою - показник R^2 склав 0,82-0,88, що може свідчити про значну неоднорідність складу органічної речовини соломи пшениці та вказує на доцільність модифікації моделі розпаду 1-го порядку при оцінюванні константи швидкості k при зброджуванні лігно-целюлозних типів субстратів.

В **Табл. 4.10** наведено результати оцінки кінетичного параметру R_{max} в моделі Гомпертца для дослідних сумішей серії досліджень №3.

Табл. 4.10. Результати оцінки кінетичних параметрів для моделі Гомпертца (серія 3)

№	Код досліджу	$C_{vs,0}$	R_{max}	T_{LAG}	ϕ	R^2
		гСОР/л	лнCH ₄ /кгСОР · добу	діб	%	-
1	ПСП _{2,06}	2,06	4,85	2,3	0,0	0,982
2	ПСП _{3,09}	3,09	6,47	1,6	0,0	0,970
3	ПСП _{9,19}	9,19	11,33	0,8	0,0	0,958
4	ПСП _{17,16}	17,16	12,50	0,1	0,0	0,952
5	ПСП _{32,54}	32,54	11,97	0,0	0,0	0,959
6	ПСП _{61,30}	61,30	8,75	0,6	0,0	0,976

При оцінюванні величини R_{\max} за результатами досліджень анаеробного збродження гранул соломи пшениці, характер залежності цього показника від стартової концентрації C_{OP} виявився відмінним від такого при визначенні константи швидкості в моделі 1-го порядку k . Так, величина R_{\max} спочатку збільшилась з 4,85 до 12,50 лнСН₄/(кгСОР·добу) при збільшенні концентрації C_{OP} з 2,06 до 17,16 гСОР/л, а при подальшому збільшенні концентрації C_{OP} до 61,30 гСОР/л – зменшилась до 8,75 лнСН₄/(кгСОР·добу). Характер такої залежності (Рис. 4.83) є подібним до характеру залежності в моделі Моно, з врахуванням інгібування продуктом реакції.

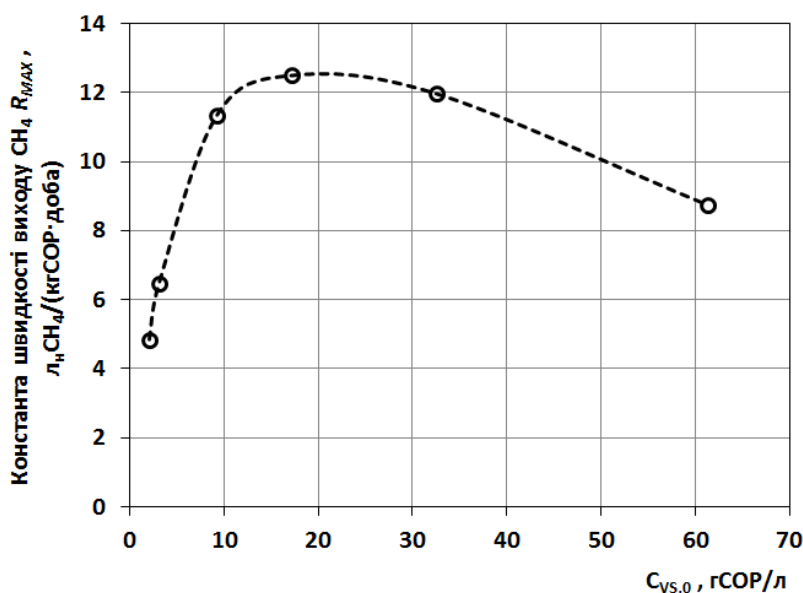


Рис. 4.83. Залежність константи швидкості виходу СН₄ R_{\max} (для моделі Гомпертца) від початкової концентрації C_{OP} гранульованої соломи пшениці в реакторах періодичної дії

В Табл. 4.11 наведено результати оцінки параметрів моделі Гомпертца, яка описує процес утворення біогазу при збродженні дослідних сумішей зі зразками стебел кукурудзи (серії 4 та 5).

Табл. 4.11. Результати оцінки кінетичних параметрів для моделі Гомпертца (серії 4 та 5)

№	Код досліджу	$C_{vs,0}$	R_{\max}	T_{LAG}	ϕ	R^2
		гСОР/кг	лнСН ₄ /(кгСОР·добу)	діб	%	-
Зразки стебел кукурудзи						
1	СК_п32,3	32,3	24,3	5,4	0,0	0,994
2	ПСК _{32,0}	32,0	23,8	4,4	0,0	0,993
3	ПСК _{10,0}	10,0	21,0	0,64	0,0	0,994

Величина R_{\max} для зразків зі стеблами кукурудзи при стартовій концентрації СОР в реакторі 32,0-32,3 гСОР/кг виявилась більшою майже в 2 рази у порівнянні з аналогічними дослідними сумішами з гранулами соломи пшениці. Це вказує на порівняно більшу доступність органічної речовини в стеблах кукурудзи, у порівнянні з соломою. Збродження гранул стебел кукурудзи при 3-кратно меншій стартовій концентрації СОР показало зниження величини R_{\max} лише на 11,8%.

Величина R_{\max} при збродженні зразків гранул з лушпиння соняшнику склала 32,9-34,1 лнСН4/(кгСОР·добу), що є найвищим показником серед усіх дослідних сумішей. Це може вказувати на присутність в складі таких гранул речовин, здатних швидко вивільнитись в розчині і одночасно швидко засвоюватись бактеріями початкових етапів процесу, без тривалого періоду гідролізу. Наявність слідів рослинної олії в лушпинні може бути поясненням цьому, втім потребує подальших досліджень.

4.5. Висновки до розділу

1. Розроблено технологію спалювання відходів деревини в котлах з топковим пристроєм ретортного типу. Виконано удосконалення конструкції реторти, що дозволяє використовувати деревне паливо з вологістю до 50%. При цьому паливо може мати неоднорідний фракційний склад, а максимальний розмір його частинок визначається пропускнуою спроможністю шнекового живильника. Розроблена технологія спалювання відходів деревини дає можливість збільшити інтенсивність горіння в 3-4 рази та зменшити рівень емісії забруднюючих речовин до 50% в порівнянні з існуючими конструкціями топкових пристроїв. Основною перевагою технології є можливість екологічно-безпечного використання відходів деревини високої вологості.

2. Розроблено, досліджено та виготовлено дослідно-промислові зразки соломоспалювальних котлів потужністю **100, 250, 350 кВт**. Експериментально досліджено теплопродуктивність, експлуатаційні показники та емісійні характеристики на експериментальних зразках теплогенераторів потужністю **100, 200 та 350 кВт** для періодичного спалювання тюків соломи. Проведено підбір режимів спалювання тюків соломи в експериментальних зразках теплогенераторів, а саме:

- шляхом підбору швидкості набігання потоку повітря на тюк досягнуто стабільне вигорання тюка без погасання полум'я.
- проведено експериментальний підбір кута нахилу сопел дуття з метою усунення неповного згорання тюка соломи у виявленій «мертвій зоні» між струменями повітря по осі топки.

- досліджено режими пошарового спалювання соломи із різною швидкістю повертання сопел та виявлено спосіб спалювання зі швидким повертанням сопел та спосіб зі ступеневим повертанням сопел, які є найбільш прийнятними як для забезпечення більш стабільних показників поточної теплової потужності котла, так і для досягнення менших значень емісії CO.

За характеристиками емісії CO теплогенератор ТС-350 задовольняє вимогам міждержавного стандарту ГОСТ 30735—2001, що встановлений для котлів третього класу. За отриманим середнім коефіцієнтом корисної дії 76-78 %, теплогенератор відповідає вимогам ГОСТ 30735-2001 для котлів другого класу, що працюють на твердому паливі.

3. Розроблено і експериментально досліджено оригінальну конструкцію топкового пристрою для безперервного спалювання малих тюків соломи з розрахунковою корисною потужністю до 100 кВт. Топковий пристрій забезпечує організацію безперервного спалювання цілих тюків соломи розміром 0,4×0,5×1,3 м. Проведені експериментальні дослідження показали, що використання такої конструкції топкового пристрою забезпечує стабільне горіння малих тюків соломи, а також постійність температури теплоносія на виході з котла разом з помірними викидами шкідливих речовин (CO₂ – 6,2% об., CO – 2450 ppm), що створює необхідні умови для використання соломоспалювальних котлів з подібними топковими пристроями.

4. Пожнивні рештки сільськогосподарських культур є придатними для виробництва з них біогазу шляхом метанової ферментації. Вихід біогазу/метану залежить від виду культури, з якої отримано пожнивні рештки, а також від способу їх попередньої підготовки. Зменшення лінійних розмірів природньої форми пожнивних решток дозволяє збільшувати швидкість розпаду органічної речовини в процесі метанової ферментації та, відповідно, швидкість виходу біогазу/метану, втім практично не впливає на біодоступний потенціал виходу біогазу/метану.

Попередня підготовка пожнивних решток методом екструзії при виробництві гранул дозволяє збільшити біодоступний потенціал виходу біогазу/метану, у порівнянні з нативною та лише механічно подрібненою формами пожнивних решток. Концентрація органічної речовини пожнивних решток в біореакторі впливає на питому швидкість виходу біогазу/метану з одиниці робочого об'єму, а вказана залежність визначається запропонованим логарифмічним рівнянням. Процес метанової ферментації в періодичному режимі при температурі 36±1⁰C не інгібується при доведенні стартової концентрації COP пожнивних решток пшениці в реакторі 61,3 гCOP/кг.

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГІЇ З БІОЛОГІЧНИХ ВИДІВ ПАЛИВА

5.1. ТЕО заготівлі ПП кукурудзи

Економічна ефективність заготівлі ПП кукурудзи залежить від капітальних витрат на технологічне обладнання та операційних витрат, які обумовлені питомою масою зібраної біомаси з одиниці площі поля, продуктивністю машин та відстанню транспортування зібраної біомаси від поля до центрального складу.

З практичного досвіду фермерів США з гектара збирають від 2,5 до 5 т с.р. ПП кукурудзи. Загалом можна приймати частку збирання ПП у 50% від зібраного зерна кукурудзи. Вихід ПП у сухій масі з гектару поля у залежності від урожайності зерна кукурудзи із базовою вологістю 14% наведено на **Рис. 5.1**.

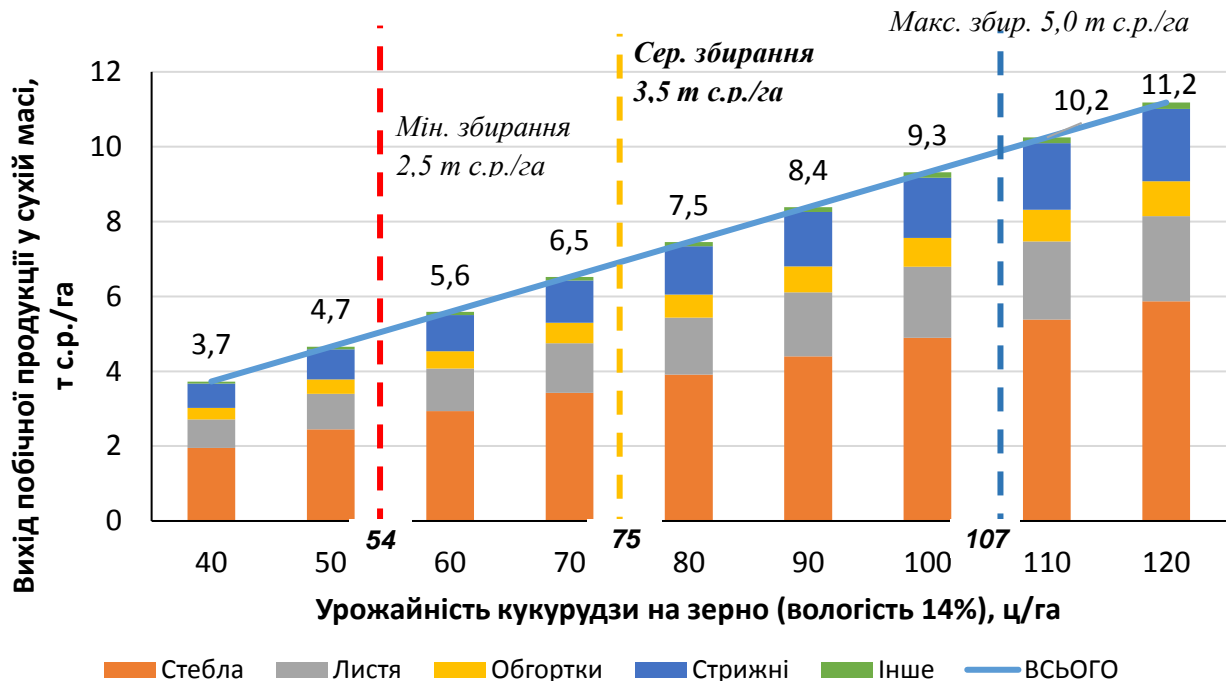


Рис. 5.1. Вихід сухої маси ПП кукурудзи.

У подальших розрахунках розглянемо три сценарії заготівлі біомаси:

- мінімальний – збирання 2,5 т с.р./га;
- середній – збирання 3,5 т с.р./га;
- максимальний – збирання 5,0 т с.р./га.

Орієнтовна вартість обладнання для заготівлі ПП кукурудзи за трьохпрохідною системою на базі прес-підбирача великих прямокутних тюків наведена у **Табл. 5.1**. Умовна вартість представляє частину фактичної вартості машин, що залежить від тривалості їх використання безпосередньо для заготівлі

цільової біомаси протягом року.

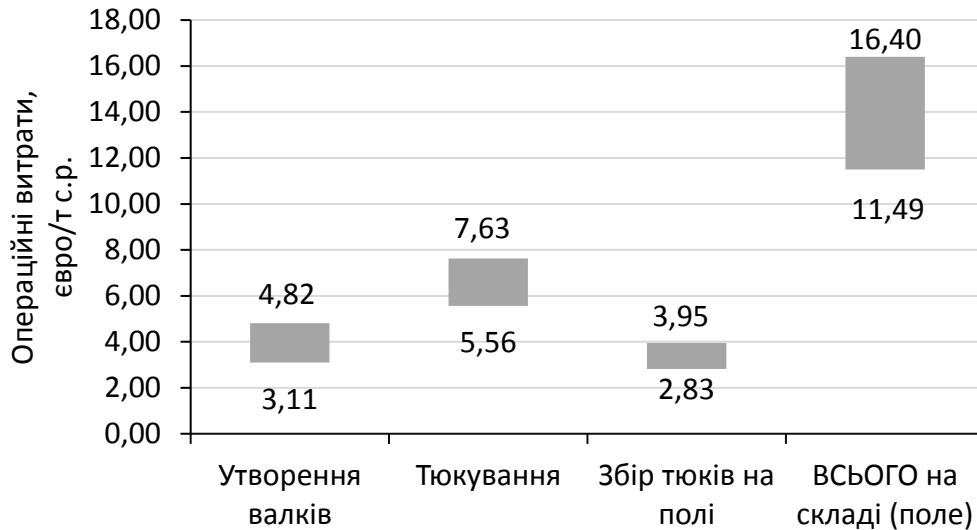
Операційні витрати на заготівлю ПП кукурудзи у великих прямокутних тюках наведено на **Рис. 5.2**. Розмір цих витрат суттєво залежить від обсягів біомаси, яка збирається з одиниці площі.

Операційні витрати залежать також від відстані транспортування тюків з поля до складу, що зображено на **Рис. 5.3**. Значне зростання витрат спостерігається при відстані транспортування, що перевищує 100 км.

Табл. 5.1. Капітальні витрати на машини для заготівлі ПП кукурудзи у великих прямокутних тюках (*SCI*) з продуктивністю 20-35 т/год.

Технологічні операції / машини	Вартість одиниці, тис. євро	Кількість	Вартість, тис. євро	Використання машин, % річного використання*			Умовна вартість, тис. євро		
				Мін	Сер	Макс	Мін	Сер	Макс
1. Формування валків	138,5	1	138,5				59		
Трактор NH T7060	102	1	102	21,9			22,3		
Мульчувач Hiniker 5620	36,5	1	36,5	100			36,5		
2. Тюкування	297	1	297				102		
Трактор Deutz-Fahr X 720	135	1	135	15,6			21		
Прес-підбирач MF 2270	162	1	162	50			81		
3. Збір та складування тюків	201,5	1	201,5				66		
Трактор NH T7060	102	1	102	15,6			15,9		
Причеп Arcusin XP 54 T	99,5	1	99,5	50			49,8		
4. Навантаження									
Телескопічний навантажувач MF9407	71	1	71	19,8	24,3	29,7	14	17	22
5. Перевезення на відстань 25-50 км									
Вантажівка МАЗ з напівпричепом	80	4	320	6,6	8,1	9,9	21	26	32
Загалом			1028				262	270	279
<i>Загалом, пункти 1-4</i>			708						

* інший час техніка використовується для інших цілей.



*Верхні надписи – для збирання 2,5 т с.р./га,
Нижні надписи – для збирання 5 т с.р./га*

Рис. 5.2. Операційні витрати за технологічними операціями заготівлі ПП кукурудзи у прямокутних тюках.

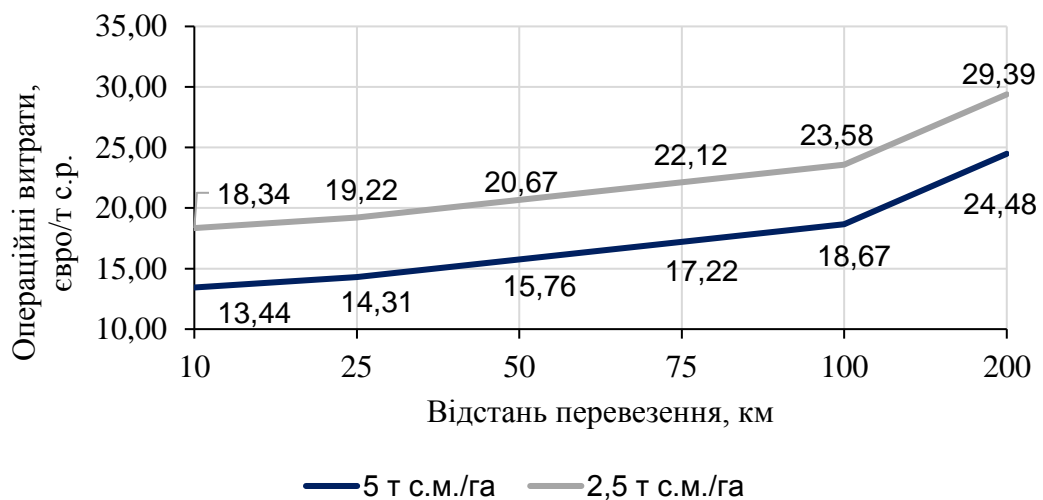


Рис. 5.3. Вплив відстані транспортування на операційні витрати заготівлі ПП кукурудзи у великих прямокутних тюках.

Порівняння середньої собівартості великих прямокутних тюків ПП кукурудзи за технологічними операціями у штаті Айова (США) та в Україні показує, що собівартості у обох країнах співставні: 19,37 євро/т с.р. для США та 16,40 євро/т с.р. для України. Однак витрати на оплату праці у США у 4,3 рази вищі, ніж в Україні (**Табл. 5.2**).

Табл. 5.2. Собівартість великих прямокутних тюків ПП кукурудзи при заготівлі у США та в Україні.

Технологічні операції	Структура витрат*, євро/т с.р.					Разом, євро/т с.р.
	Амортизація	ТО і ремонт	Паливо	Матеріали	Оплата праці	
1 Формування валків	3,05/1,50	0,78/ 0,75	1,85/2,38		0,86/0,19	6,54/4,82
2 Тюкування	4,33/2,60	1,08/1,30	1,65/2,16	1,04/1,43	0,62/0,14	8,72/7,63
3 Збір та складування тюків	2,03/1,68	0,72/0,84	0,92/1,33		0,43/0,11	4,11/3,95
ВСЬОГО	9,41/5,78	2,58/2,89	4,42/ 5,87	1,04/1,43	1,91/0,44	19,37/16,4

* У таблиці перше значення відображає собівартість заготівлі ПП кукурудзи у США (перераховано з даних РМ 3053В, Едвардс, 2014, Університет Штату Айова). Друге значення (за знаком «/») показує собівартість в Україні для заготівлі ПП кукурудзи в обсягах 2,5 т с.р./га.

Оцінка собівартості за іншими трьома технологіями заготівлі ПП кукурудзи (у круглих тюках, у подрібненому вигляді кормозбиральним комбайном та причепом-підбирачем) проводилася за середнім сценарієм із збиранням 3,5 т с.р./га. Відстань транспортування від поля до основного складу становить до 25 км для круглих тюків та ланцюгу на базі причепа-підбирача кормів і 10 км – для ланцюга із кормозбиральним комбайном, що передбачає одностадійне транспортування від поля до основного складу без використання локального складу біля поля.

Технологічні операції ланцюжка заготівлі ПП кукурудзи у рулонах відповідають заготівлі біомаси у великих прямокутних тюках, але рулонний прес-підбирач менш продуктивний. Розміри рулону – діаметр 1,5 м і довжина 1,22 м. Для утримання подрібненого кукурудзиння у рулоні використовується сітка. У розрахунках врахована середня маса сухої речовини у рулоні 345 кг. Прийнята продуктивність технології становить 8-10 т/год.

Оцінка собівартості заготовленої біомаси за чотирьома технологіями збирання ПП кукурудзи (у великих прямокутних тюках, у рулонах; у подрібненому вигляді на базі кормозбирального комбайну та кормозбирального причепа-підбирача) проводилася за середнім сценарієм із збиранням біомаси в обсягах 3,5 т с.р./га. Діаграми з часткою різних груп витрат (оплата праці, паливо, матеріали, технічне обслуговування і ремонт та амортизація) для цих технологій наведені на **Рис. 5.4**. Амортизація та паливо є основними статтями витрат в розглянутих ланцюгах створення доданої вартості.

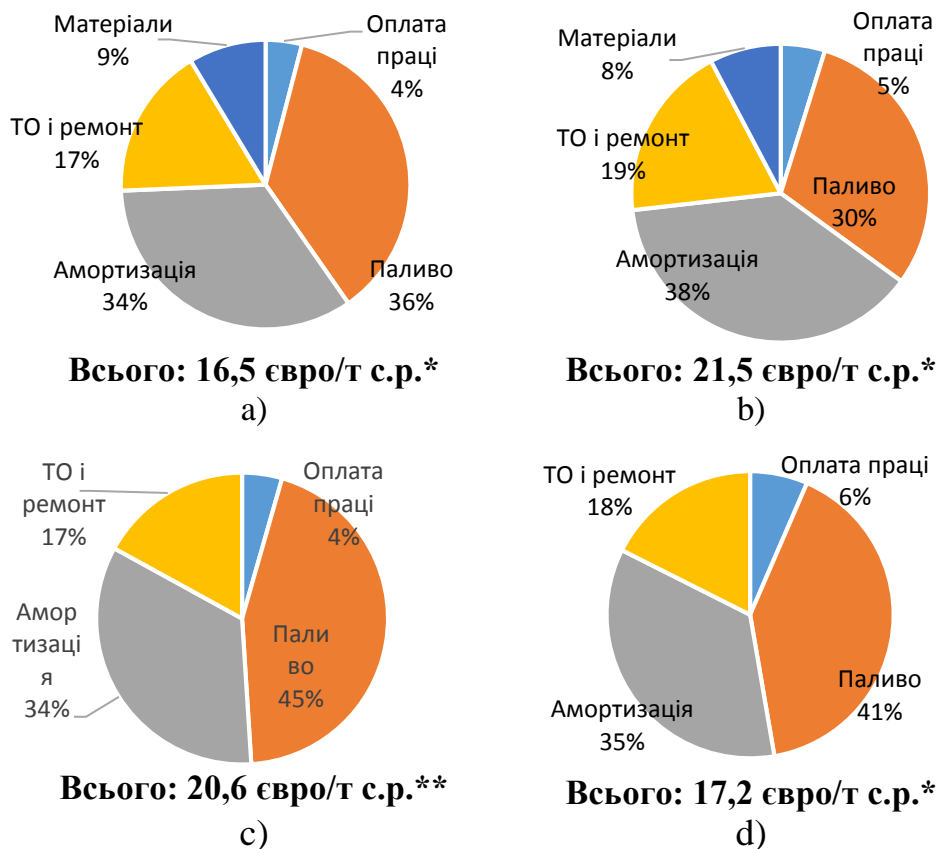


Рис. 5.4. Собівартість заготівлі ПП кукурудзи в обсягах 3,5 т с.р./га з транспортуванням до центрального складу:

- а) прес-підбирач великих прямокутних тюків; б) прес-підбирач рулонний;
 с) кормозбиральний комбайн; д) кормозбиральний причеп-підбирач.

* Відстань транспортування 25 км; ** Відстань транспортування 10 км

Залежність собівартості ПП кукурудзи за чотирьома технологіями збирання врожаю 3,5 т с.р./га від відстані транспортування наведено на **Рис. 5.5**. Збір ПП кукурудзи у великих прямокутних тюках з їх транспортуванням на відстань більше 20 км є економічно доцільним. Для меншої відстані можна також використовувати кормозбиральний причеп-підбирач.

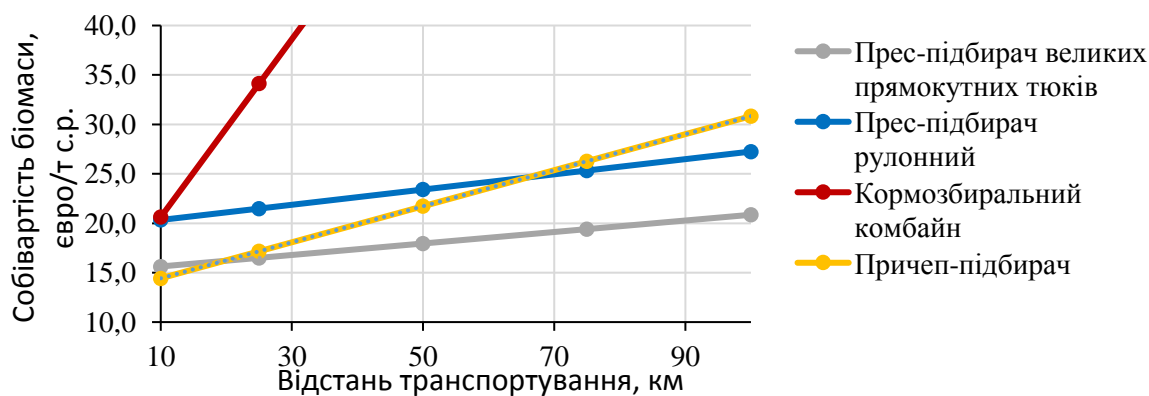


Рис. 5.5. Залежність собівартості заготівлі ПП кукурудзи від відстані транспортування біомаси.

Результати ТЕО реалізації ланцюжку на базі прес-підбирача великих прямокутних тюків наведено у **Табл. 5.3**. Термін окупності проєктів із заготівлі ПП рослинництва суттєво залежить від обсягів збирання біомаси з гектару, що також впливає на завантаження обладнання. Так, при збиранні ПП кукурудзи 2,5 т с.р./га простий термін окупності заготівельної ланки на базі одного прес-підбирача великих прямокутних тюків складає 6,4 роки, а при заготівлі 5 т с.р./га – 3,7 років. За сценарієм заготівлі середніх обсягів біомаси 3,5 т с.р., яких можна досягнути при врожайності зерна кукурудзи 75 ц/га, простий термін окупності такої заготівельної ланки становить 4,8 роки.

Табл. 5.3. ТЕО заготівлі ПП кукурудзи у великих прямокутних тюках (*SCI*).

Показники	Вихід ПП кукурудзи		
	2,5 т с.р./га	3,5 т с.р./га	5 т с.р./га
Обсяги заготівлі біомаси, т с.р./рік	3920	4802	5880
Капітальні витрати, тис. євро	261,7	269,6	279,3
Операційні витрати, тис. євро/рік	80,5	90,7	103,3
Кредитні кошти (частка капітальних витрат), %	60		
Ставка по кредиту, %	7		
Вартість ПП кукурудзи у полі*, євро/т с.р.	8,0		
Повна собівартість тюків**, євро/т с.р.	27,2	24,5	22,3
Продажна ціна тюків біомаси***, євро/т с.р. з ПДВ	40		
Простий термін окупності, років	6,4	4,8	3,7
Внутрішня норма дохідності (IRR), %	12,3	22,5	35,1

* Вартість ПП кукурудзи визначається за вартістю еквівалентних доз мінеральних добрив для заміни поживних елементів у біомасі.

** Повна собівартість тюків включає прямі витрати на заготівлю біомаси, оплату вартості ПП у полі та відрахування на амортизацію техніки.

*** Відповідає ціні тюків біомаси 25 євро/т без ПДВ для ПП кукурудзи вологістю $W=25\%$.

Вихідні дані щодо використання машин для заготівлі стрижнів качанів кукурудзи взяті зі статті Purdue ID-417-W [245]. Завдяки додатковій вазі машини для заготівлі стрижнів ССХ770 знижується продуктивність зернозбирального комбайна на 10%, це враховується при розрахунках експлуатаційних витрат. Врожайність стрижнів качанів кукурудзи становить 1,25 т с.р./га. Прийнято відстань транспортування стрижнів 10 км. Середньорічна тривалість збирання стрижнів 40 днів.

Результати техніко-економічної оцінки заготівлі ПП кукурудзи у великих прямокутних тюках, рулонах, подрібненому вигляді на базі кормозбирального комбайна і причепа-підбирача та машини для заготівлі стрижнів наведено в **Табл. 5.4**. З розглянутих варіантів найнижча собівартість біомаси складає 25,2 євро/т с.р., що відповідає заготівлі за технологією **SC4** із використанням кормозбирального причепа-підбирача. При використанні рулонного прес-підбирача (**SC2**) собівартість біомаси складе 29,5 євро/т с.р.; кормозбиральний комбайн дозволяє отримати собівартість кукурудзиння 28,6 євро/т с.р., а при збиранні стрижнів спеціалізованим збирачем – 34,9 євро/т с.р. Разом із цим прийнята більша продажна ціна зібраних стрижнів, ніж у кукурудзиння, з огляду на можливість їх використання без додаткової переробки.

Табл. 5.4. Техніко-економічна оцінка різних технологій заготівлі ПП кукурудзи.

Показники	Технології заготівлі			
	Прес-підбирач рулонний (SC2)	Кормозб. комбайн (SC3)	Причеп-підбирач (SC4)	Збір стрижнів
Вихід ПП кукурудзи, т с.р./га	3,5			1,25
Обсяги заготівлі біомаси, т с.р./рік	1551	5390	2924	500
Капітальні витрати, тис. євро	127,2	492,3	139,0	85,2
Операційні витрати, тис. євро/рік	33,0	116,5	55,9	8,9
Кредитні кошти (частка капітальних витрат), %	60			
Ставка по кредиту, %	7			
Вартість ПП кукурудзи у полі*, євро/т с.р.	8,0			-
Повна собівартість біомаси**, євро/т с.р.	29,5	28,6	25,2	34,9
Продажна ціна біомаси *** або стрижнів качанів****, євро/т с.р. з ПДВ	40***			70****
Простий термін окупності, років	9,4	8,7	4,6	6,7
Внутрішня норма дохідності (IRR), %	1,7	3,3	26,0	12,6

* Вартість ПП кукурудзи визначається за вартістю еквівалентних доз мінеральних добрив для заміни поживних елементів у біомасі.

** Повна собівартість тюків включає прямі витрати на заготівлю біомаси, оплату вартості ПП у полі та відрахування на амортизацію техніки.

*** Відповідає ціні тюків біомаси 25 євро/т без ПДВ для ПП кукурудзи вологістю $W=25\%$.

**** Відповідає ціні стрижнів качанів 40 євро/т без ПДВ з вологістю $W=20\%$.

Таким чином, відповідно до отриманих результатів, найбільш економічно доцільною технологією заготівлі ПП кукурудзи є використання *великих прямокутних тюків*, що дозволить отримати біомасу на центральному складі на відстані 25 км від поля за собівартістю від 22,3 євро/т с.р. Система заготівлі подрібненої ПП кукурудзи на базі кормозбирального причепа-підбирача також є економічно доцільною з простим терміном окупності 4,6 років та IRR 26,0%, але необхідно провести польові дослідження для оцінки можливості використання цієї технології для умов України. Для переробки біомаси важливо зробити техніко-економічну оцінку повного ланцюжка доданої вартості, включаючи зберігання. Подальша переробка ПП кукурудзи у паливні брикети та гранули дозволить підвищити додану вартість біомаси.

5.2. ТЕО виробництва гранул і брикетів з ПП кукурудзи

Витрати на зберігання ПП кукурудзи.

ПП кукурудзи 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 залежить від місця розташування складу та місцевих умов. ПП кукурудзи можна зберігати просто неба, під накриттям, у закритому складі або у сховищі в анаеробних умовах (без доступу кисню) [246]. При виборі відповідних систем зберігання слід враховувати декілька факторів: стабільність сировини під час зберігання, вартість складської інфраструктури, доступність сировини протягом усього терміну зберігання, інтеграція складу з переробним заводом.

Зберігання біомаси у закритих складах має багато переваг порівняно з іншими системами. Однак через відносно низьку щільність ПП кукурудзи, 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 ПП кукурудзи.

Зберігання ПП кукурудзи просто неба може використовуватися для тимчасових складів, коли верхній шар біомаси служить накриттям. Крім того, такий спосіб може використовуватися 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. Зберігання в анаеробних умовах економічно вигідно для сировини з високим вмістом вологи, особливо для зберігання тюків раннього сезону збирання або у надзвичайно вологі сезони.

Зберігання ПП кукурудзи 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 використовується й для сушіння тріски. Використовувати агроволокно можливо понад 5 років [247]. Для подальшої оцінки вартості було обрано зберігання ПП кукурудзи під агроволокном.

Склади ПП кукурудзи повинні відповідати вимогам Правил пожежної безпеки в АПК України (затверджених Наказом Міністерства аграрної політики України та Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків чорнобильської катастрофи № 730/770 від 4.12.2006 р.) [248]. Площа основи однієї скирти не повинна перевищувати 300 м², а штабеля пресованої соломи – 500 м². Скирти та штабелі дозволяється розташовувати попарно, при цьому розриви між скиртами та штабелями в одній парі мають бути не менше 6 м, а між сусідніми парами – не менше 30 м.

На складах важливо забезпечити вільний доступ вантажної техніки до біомаси. Основні складові витрат на зберігання ПП 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. Оцінка витрат на зберігання під накриттям ПП кукурудзи у подрібненому вигляді, великих прямокутних тюках та рулонах наведена у **Табл. 5.5**. Витрати на охорону не враховувалися через припущення, що центральний склад розміщений поблизу наявної у агровиробника складської території з існуючою системою охорони.

Табл. 5.5. Витрати на зберігання ПП кукурудзи на центральному складі.

Показники	Подрібне-ні ПП кукурудзи	Великі прямокутні тюки	Рулони
Орендна плата за землю та питомі витрати на підготовку складського майданчику, євро/(га·рік)	400		
Вартість агроволокна та інших матеріалів для однієї скирти (штабелю), євро/(скирта·рік)	273	427	427
Площа для пари скирт (штабелів) з врахуванням вимог правил пожежної безпеки, га	0,31	0,44	0,48
Маса ПП кукурудзи у парі скирт (штабелів), т с.р.	160	1103	484
Втрати сухої маси, %	9		
Витрати на зберігання ПП кукурудзи, євро/т с.р.	2,7	0,6	1,4
Витрати на вантажні операції, євро/т с.р.	4,2	2,5	3,6
Загальні витрати на зберігання, євро/т с.р.	6,9	3,1	5,0

Витрати на зберігання ПП кукурудзи у великих прямокутних тюках під накривним матеріалом складають 3,1 євро/т с.р., що менше, ніж зберігання рулонів (5,0 євро/т с.р.) та подрібненої маси насипом (6,9 євро/т с.р.).

ТЕО виробництва брикетів з ПП кукурудзи.

Нині на українському ринку спостерігається обмежена пропозиція брикетів з кукурудзиння. Актуальні ціни реалізації брикетів з соломи становлять від 80 до 90 євро/т з ПДВ, а для брикетів з деревини – від 90 до 150 євро/т з ПДВ. Приймемо орієнтовну ціну брикетів з ПП кукурудзи 90 євро/т з ПДВ, оскільки їхні паливні характеристики кращі, ніж у брикетів з соломи.

В Україні відсутні чинні національні стандарти на брикети із ПП кукурудзи, але за необхідності підприємства-виробники брикетів можуть розробляти ТУ. Для стандартизації брикетів із недеревної біомаси Міжнародною організацією зі стандартизації (ISO) у 2014 р. прийнято стандарт ISO 17225-7 «Тверді біопалива. Технічні характеристики та класи. Частина 7. Сортування недеревних брикетів».

Для техніко-економічної оцінки виробництва паливних брикетів були вибрані три рівня продуктивності:

- 1) **0,5 т/год** на базі лінії брикетування ПП «Брикетуючі технології» (Україна) з продуктивністю 500-600 кг/т [249] (подрібнювач ІТС 1, аеродинамічна сушарка САД-0,6-1,2 та прес-брикетувальник ПБУ-070-800М);
- 2) **2 т/год** для лінії, укомплектованої обладнанням різних вітчизняних виробників, включаючи 2 прес-брикетувальники ПБУ-090-900М та барабанну сушарку;

3) **4 т/год** для лінії, укомплектованої німецьким та українським обладнанням (5 прес-брикетувальників RUF R6 та барабанна сушарка).

Основні вхідні дані для техніко-економічної оцінки виробництва брикетів із кукурудзиння:

- у початковий рік підприємство буде виробляти 50% річної кількості брикетів;
- для операцій з завантаження тюків буде придбано телескопічний навантажувач;
- використання існуючої будівлі та лінії електропередач;
- 2 особи адміністративного персоналу для продуктивності 2 та 4 т/год;
- закупівельна ціна великих тюків ПП кукурудзи – 40 євро/т с.р. з ПДВ;
- основний склад розташований поблизу із виробництвом брикетів;
- витрати на зберігання тюків кукурудзиння – 3,1 євро/т с.р.;
- відпускна ціна брикетів з ПП кукурудзи – 90,0 євро/т с.р. з ПДВ.

Виробничі витрати на переробку ПП кукурудзи у паливні брикети складають 62,7 євро/т при продуктивності лінії 2 т/год, 63,2 євро/т – при 4 т/год і 70,6 євро/т – при 0,5 т/год. Результати ТЕО виробництва брикетів з ПП кукурудзи наведені у **Табл. 5.6**.

Табл. 5.6. ТЕО виробництва брикетів з ПП кукурудзи.

Показники	Продуктивність лінії брикетування, т/год		
	0,5	2,0	4,0**
Річні обсяги виробництва брикетів, т/рік	3000	12000	24000
Капітальні витрати, тис. євро	147,5	598,8	1572,0
Операційні витрати, тис. євро/рік	193,4	677,5	1319,5
Кредитні кошти (частка капітальних витрат), %	70		
Ставка по кредиту, %	7		
Строк кредитування, років	5		
Вартість тюків ПП кукурудзи на заводі, євро/т с.р. без ПДВ	36,4		
Собівартість брикетів, євро/т	70,6	62,7	63,2
Ціна реалізації брикетів з ПП кукурудзи, євро/т з ПДВ	90		
Чиста приведена вартість (NPV), тис. євро	39,2	677,9	1214,1
Простий термін окупності*, років	6,0	3,7	4,4
Внутрішня норма дохідності (IRR), %	13,9	34,7	26,1

* У перший рік лінія брикетування виробляє 50% від річного обсягу брикетів.

** Лінія продуктивністю 4 т/год з німецькими прес-брикетувальниками RUF.

З огляду на вихідні дані та припущення, для проєкту з пресами іноземного виробництва продуктивністю 4 т/год внутрішня норма дохідності становить 26,1%; простий термін окупності – 4,4 роки. Економічні показники проєкту з продуктивністю виробництва брикетів 2 т/год на базі українського обладнання дещо кращі, зокрема, IRR – 34,7%, простий термін окупності – 4,2 років.

ТЕО виробництва гранул з ПП кукурудзи.

Пропозиція гранул з ПП кукурудзи дуже обмежена. Актуальні ціни в Україні на гранули з соломи складають від 80 до 95 євро/т з ПДВ, а деревні гранули коштують від 95 до 160 євро/т з ПДВ. Враховуючи, що у ПП кукурудзи кращі паливні характеристики ніж у соломи, прийmemo орієнтовну ціну гранул з кукурудзиння 90 євро/т з ПДВ.

Для сприяння міжнародній торгівлі твердим біопаливом, зокрема, гранулами з недеревної біомаси, використовується спеціалізована система міжнародних стандартів, які поступово гармонізують в Україні. Так, з 1 жовтня 2017 р. набув чинності національний стандарт ДСТУ EN 15234-6:2017 «Тверде біопаливо. Підтвердження якості палива. Частина 6. Недеревні гранули для непромислового використання». Вимоги якості для недеревних гранул як продукту встановлює міжнародний стандарт ISO 17225-6:2014 «Тверді біопалива. Технічні характеристики та класи. Частина 6. Сорткування недеревних пелет», який ще не був гармонізований в Україні. Але деякі виробники розробляють ТУ на гранули з кукурудзиння. Це дозволяє їм сертифікувати продукцію і створює передумови для реалізації гранул за вищою ціною. При цьому споживач гранул отримує можливість придбати гранули гарантованої якості.

Для техніко-економічної оцінки виробництва гранул з ПП кукурудзи були вибрані три рівня продуктивності:

- 1) **2,0 т/год** на базі лінії гранулювання BIOsmartex продуктивністю 1500-2500 кг/год, укомплектованої вітчизняним обладнанням;
- 2) **4,0 т/год** на базі імпортного та вітчизняного обладнання;
- 3) **10,0 т/год** на базі імпортного та вітчизняного обладнання.

Основні вхідні дані для техніко-економічної оцінки виробництва гранул із кукурудзиння такі ж, як для виробництва брикетів. Результати ТЕО виробництва гранул з ПП кукурудзи наведені в **Табл. 5.7**.

Табл. 5.7. ТЕО виробництва гранул з ПП кукурудзи.

Показники	Продуктивність лінії гранулювання, т/год		
	2,0	4,0	10,0
Річні обсяги виробництва гранул, т/рік	12000	24000	60000
Капітальні витрати, тис. євро	642,0	1223,5	3228,4
Операційні витрати, тис. євро/рік	766,1	1461,5	3920,9
Кредитні кошти (частка капітальних витрат), %	70		
Ставка по кредиту, %	7		
Строк кредитування, років	5		
Вартість тюків ПП кукурудзи, євро/т с.р. без ПДВ	36,4		
Собівартість гранул, євро/т	70,5	67,3	64,1
Ціна реалізації гранул з ПП кукурудзи, євро/т з ПДВ	90,0		
Чиста приведена вартість (NPV), тис. євро	168,5	765,3	2899,2
Простий термін окупності*, років	6,0	4,8	4,1
Внутрішня норма дохідності (IRR), %	13,8	22,6	29,1

* У перший рік лінія гранулювання виробляє 50% від річного обсягу гранул.

З огляду на вихідні дані та припущення, чиста приведена вартість найбільшого із розглянутих проєктів (10 т/год) становить близько 2899 тис. євро з внутрішньою нормою дохідності 29,1%. Простий термін окупності складає 4,1 років, дисконтований термін окупності – 4,8 років.

5.3. ТЕО анаеробного зброджування ПП АПК

Біогаз отримують шляхом метанової ферментації органічної сировини в контрольованих умовах. Існують 3 основні моделі роботи біореакторів з виробництва біогазу, а саме:

1. Зброджування в напівпроточному режимі в рідкофазному середовищі, що передбачає порційне внесення добової дози свіжого субстрату (наприклад, 4 рази на добу), з одночасним видаленням відповідної порції збродженої маси.
2. Зброджування в (квазі-) проточному режимі в твердофазному середовищі.
3. Зброджування в періодичному режимі в твердофазному середовищі.

Кожна з моделей може бути використана для зброджування різноманітних видів сировини, втім, першу модель найбільш часто використовують при виробництві біогазу з вологих типів сировини з більш гомогенним складом (виробничі стічні води та осади стічних вод, рідка гноївка, жом, силос кукурудзи), а 2-ю та 3-ю моделі традиційно використовують для менш вологих

типів сировини з більш гетерогенним складом (змішані харчові відходи, підстилковий гній або послід, рослинна сировина).

Потужність проєкту, конструкції біореакторів та їх технічне оснащення, кількість етапів ферментації, наявність та типи вузлів попередньої підготовки та подачі сировини є основними елементами, що визначають загальну вартість БГУ. Типова вартість БГУ потужністю 500-2000 кВт_{ел} складає 3-4 тис. євро/кВт_{ел}. Найбільш масштабні БГУ, що будуються в Україні, потужністю 10-20 МВт_е, коштують 2-2,5 тис. євро/кВт_{ел}. Такі розміри інвестицій є співмірними з загальноєвропейськими. Так, наприклад, в Німеччині питома вартість БГУ коливається в межах від 1,5 до 6,1 тис. євро/кВт_{ел}. Основними складовими інвестиційних вкладень в БГУ, що орієнтовані на комбіноване виробництво теплової та електричної енергії, є витрати на блок генерації енергії (30-40%), будівництво реакторів та інших технологічних споруд (35-45%) та технологічне обладнання (15-25%).

Основними складовими експлуатаційних витрат БГУ є витрати на сировину, на обслуговування і ремонт технологічного обладнання та блоку генерації, заробітну плату персоналу. При цьому, якщо витрати на обслуговування та ремонт основного обладнання є відносно сталими з розрахунку на 1 кВт·год виробленої енергії, то витрати на сировину можуть коліватись в досить широкому діапазоні і є фактично визначальним фактором при оцінці рентабельності БГУ.

Ціни на різні види сировини, для зручності у порівнянні, можна привести до сировинної складової собівартості енергії, що міститься у виробленому біогазі. На **Рис. 5.6** показано оцінку такого показника для деяких типів сировини, виконану на основі виходу біогазу з неї. Найбільш дешевими типами сировини є жом цукрових буряків та послід курячий. Рентабельність використання гною свиней та гною ВРХ є досить чутливою до ціни за тону сировини на вході, що обумовлено низькою концентрацією органічної речовини та, відповідно, виходом біогазу. Традиційно дорогими видами сировини є спеціально вирощувана силосна кукурудза, та гранули з поживних решток.

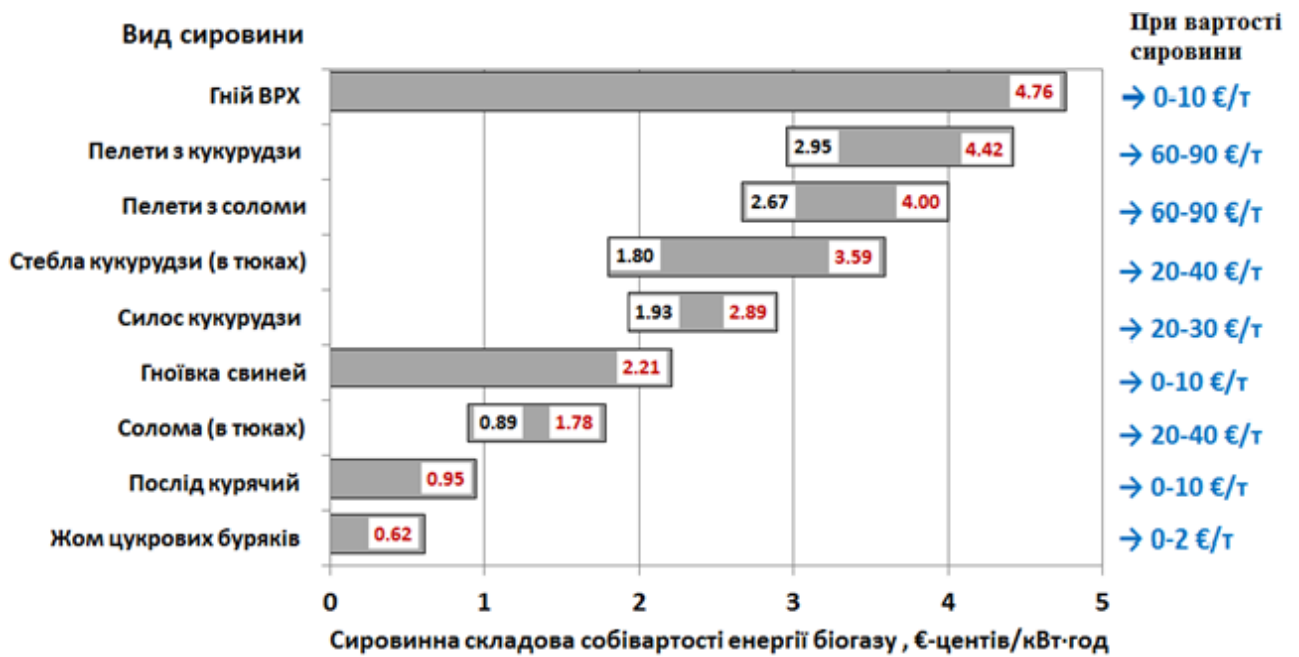


Рис. 5.6. Сировинна складова собівартості енергії виробленого біогазу з різних типів сировини

В перерахунку лише на одиницю виробленої електричної енергії, показники, приведені на **Рис. 5.7**, будуть ще вищими – в середньому в 2,5 рази, з урахуванням електричного ККД когенераційної установки на біогазі (38-42%).

Загальні експлуатаційні витрати, не враховуючи сировинну складову, можуть складати 0,011-0,013 євро/кВт·год енергії біогазу або 0,027-0,033 євро/кВт·год електричної енергії з біогазу, виробленої в когенераційній установці з електричним ККД 40%. З урахуванням сировинної складової, такі затрати, відповідно, можуть складати 0,011-0,061 євро/кВт·год енергії біогазу або 0,027-0,152 євро/кВт·год електричної енергії з біогазу.

Дохід від експлуатації БГУ, зокрема в Україні, формується переважно за рахунок реалізації електричної енергії, виробленої з біогазу в когенераційних установках, за «зеленим» тарифом. Станом на 2020 рік «зелений» тариф на електроенергію з біогазу, незалежно від розміру установки, складає 0,1239 євро/кВт·год без ПДВ. При цьому, за «зеленим» тарифом оплачується лише обсяг нетто електричної енергії, з вирахуванням обсягу електричної енергії, що споживається на власні потреби БГУ (5-8% від обсягу виробленої електричної енергії). Законом також передбачено можливість отримання надбавки до цього тарифу (до 10%) при використанні більше 50% складових українського виробництва при будівництві БГУ. Втім, таку надбавку в Україні отримав лише одна БГУ – ТОВ «Юзефо-Миколаївська біогазова компанія».

Потенційно джерелами додаткового доходу від діяльності БГУ можуть бути також теплова енергія від когенераційних станцій (до 60% від згенерованої

теплової енергії) та дигестат (зброджена маса) як добриво чи покращувач ґрунтів.

Утилізація теплової енергії можлива двома шляхами:

- відбором тепла від когенераційної установки, розташованої в межах БГУ, і подачі його теплопроводом до споживача (**Рис. 5.8 а**);
- відбором тепла від когенераційної установки, розташованої за межами БГУ в безпосередній близькості до споживача тепла, при цьому подача біогазу організовується по біогазопроводу (**Рис. 5.8 б**).

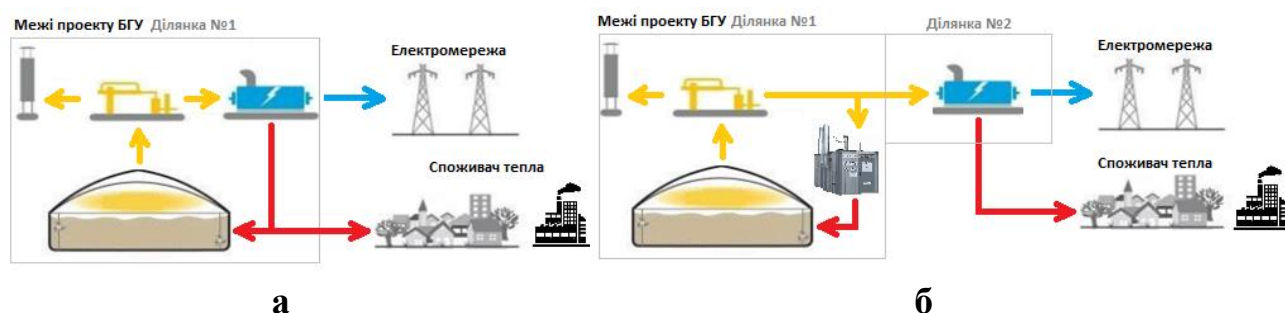


Рис. 5.8. Можливі схеми утилізації тепла від когенераційної установки на біогазі

Слід зауважити, що в Україні відомо лише про одиничні приклади корисної утилізації надлишку теплової енергії від біогазових міні-ТЕЦ, наприклад, БГУ ПрАТ «Оріль-Лідер» та ТОВ «Вінницька птахофабрика». При цьому ПрАТ «Оріль-Лідер» використовує схему з подачею тепла теплопроводом до виробничих цехів птахофабрики, розташованих неподалік від БГУ, а ТОВ «Вінницька птахофабрика» використовує схему з подачею біогазу біогазопроводом довжиною 10 км до міні-ТЕЦ.

Можливість отримання доходу від дигестату при використанні його як добрива є наразі найбільш неоднозначною, оскільки для цього ще не сформовано ринкові передумови. Приклад оцінки ринкової цінності дигестату з основних типів сировини, що використовується для виробництва біогазу, на основі співставлення еквівалентної ціни поживних елементів NPK в мінеральних добривах, наведено в **Табл. 5.8**.

Табл. 5.8. Ціновий еквівалент вмісту NPK в дигестаті з деяких видів сировини.

Вид сировини	Вміст сухої речовини (СР)	Вміст азоту, N	Вміст фосфору, P	Вміст калію, K	Вихід дигестату	Ціновий еквівалент вмісту NPK в дигестаті
	% до с.м.	кг/т с.м.	кг/т с.м.	кг/т с.м.	т/т с.м.	євро/т
Силос кукурудзи	30	4.50	0.75	3.39	0.78	6.42
Жом цукр. буряків	13	3.12	0.18	0.52	0.91	1.90
Гній ВРХ	18	5.76	1.44	7.47	0.92	10.08
Гноївка свиней	2.5	2.30	0.50	0.52	0.99	1.95
Послід курячий	30	15.00	6.60	5.40	0.89	21.39
Меляса	77.4	11.61	2.32	14.47	0.55	31.71

Примітки: с.м. – свіжа маса. Оцінено при еквівалентній ціні на N, P, K 0.75, 1.53, 0.68 євро/кг відповідно. Враховано доступність азоту для живлення рослин в перший рік внесення на рівні 60%.

Таким чином, залежно від виду сировини, вмісту в ній сухих речовин та поживних елементів, утворюваний дигестат може мати обґрунтовану ринкову цінність орієнтовно від 1,9 євро/т для жому до 21,4 євро/т для посліду, яку можна враховувати при розрахунку економії на закупівлі мінеральних добрив або при продажі дигестату як органічного добрива третій стороні.

Наведена оцінка показує лише цінність дигестату, віднесену до окремо взятого виду сировини. Втім, зазвичай в БГУ використовують суміш різних видів сировини, а на обсяги дигестату та його фракцій після розділення впливають також технологічні особливості, як то ступінь рециркуляції дигестату в процесі і обсяги використання свіжої води для розбавлення.

Аналіз двох діючих в Україні БГУ показав, що удобрювальна цінність утворюваних там дигестатів є еквівалентною 3,3 євро/т та 6,65 євро/т. В першому випадку БГУ споживає 76% гною свиней, 18% силосу кукурудзи, 5% гною ВРХ та 1% меляси, в другому – близько 80% жому, 10% посліду та 10% гною ВРХ (по масі). Після розділення на сепараторі цінність рідкої фракції оцінено в 2,3 євро/т та 4,9 євро/т, а твердої – в 17,1 євро/т та 23,7 євро/т, відповідно для першої та другої БГУ.

Визначальними факторами, що впливають на терміни окупності БГУ є масштаб проєкту, вартість сировини, а також коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП) БГУ. Найбільш рентабельним є проєкт великої

потужності (більше 5-10 МВт_е), що споживає власну або доступну дешеву сировину (жом, послід), і який використовує потужність генерації на 100% від можливого значення. Окупність таких проєктів в Україні може складати до 4 років, навіть при реалізації лише електричної енергії за «зеленим» тарифом. Втім, потенціал будівництва таких масштабних проєктів є обмеженим, а ефективність роботи діючих в Україні БГУ часто не перевищує 50-60% (за КВВП). Окупність більшості БГУ в Україні, в кращому випадку, оцінюється на рівні 5-6 років, а з урахуванням рівня ефективності – не менше 7-8 років.

Як показано далі, корисна утилізація тепла від ТЕЦ на біогазі дозволяє дещо зменшити терміни окупності БГУ. Використання поживних решток, як альтернативи силосу кукурудзи, також в ряді випадків є доцільним.

В **Табл. 5.9 – 5.13** наведено результати техніко-економічного обґрунтування (ТЕО) для ряду моделей БГУ. Вихідні параметри до розрахунку за всіма сценаріями наведено в **Табл. 5.9**.

Табл. 5.9. Вихідні параметри економічної моделі БГУ.

Об'єкт впровадження	Свиноферма на 20 тис. голів (гноївка з вмістом 7% сухих речовин)
Вихід CH ₄ з сировини	Гноївка – 23,8 нм ³ CH ₄ /т Силос кукурудзи – 104 нм ³ CH ₄ /т Гранули з соломи – 256,5 нм ³ CH ₄ /т Послід курячий – 102,4 нм ³ CH ₄ /т Жом буряковий – 102,4 нм ³ CH ₄ /т
Власне споживання електричної та теплової енергії БГУ	8% та 30% відповідно
Коефіцієнт використання встановленої потужності КГУ протягом року (КВВП)	90%
Річні операційні витрати на обслуговування БГУ та КГУ (без сировини)	4,5% (min 2,7... max 8,9%) від CAPEX
Тариф на електричну енергію до 1 січня 2030 р.	0,124 євро/кВт·год без ПДВ
Тариф на електричну енергію з 1 січня 2030 р.	0,06 євро/кВт·год без ПДВ
Тариф на теплову енергію з біогазу	0,9 x 1400 грн/Гкал, без ПДВ
Ставка дисконтування	8%
Ставка кредитування	8%
Період кредитування	8 років
Частка кредитних коштів в CAPEX	60%

Табл. 5.10. ТЕО БГУ 2,1 МВт_е за схемою «зеленого» тарифу.

Показники проекту	МОДЕЛЬ: електроенергія по схемі «зеленого» тарифу (0,1239 євро/кВт·год без ПДВ до 2030 р.)							
	Базова тільки е/є				Модель №1 (теплотраса – 106 тис. євро/км) Утилізація 60% тепла на відстані від КГУ:		Модель №2 (біогазопровід – 48 тис. євро/км) Утилізація 60% тепла на відстані від БГУ:	
					1 км	10 км	1 км	10 км
Сировина	Силос кукурудзи	Гранули з соломи, власне виробництво	Солома, обробка біоекструдером	Гранули з соломи, закупівля	Силос кукурудзи		Силос кукурудзи	
Ціна сировини, євро/т	20	25 (тюкована солома)	25 (тюкована солома)	80 (товарна гранула)	20		20	
Споживання сировини, тис. т/рік	29,92	12,13	12,13	12,13	29,92		29,92	
CAPEX, млн євро	5,74	5,91	5,51	5,04	5,85	6,80	5,79	6,22
NPV, тис. євро	1 833	2 183	3 342	- 528	4 165	3 221	4 222	3 797
IRR, %	14,2	14,6	18,5	4,3	20,0	16,1	20,3	18,3
SPP, років	5,5	5,6	4,8	6,6	4,6	5,3	4,5	4,9

Розглянуто дві альтернативні схеми отримання доходу від реалізації електричної енергії – за діючим «зеленим» тарифом до 2030 р. та за схемою аукціону, коли тариф на електроенергію може бути нижчим (на 10% від «зеленого» тарифу), але при цьому такий тариф встановлюється терміном на 20 років. Підсценарії проектів охоплюють виробництво лише електричної енергії з різних типів сировини, додаткову утилізацію 60% надлишку теплової енергії за двома схемами, як показано на **Рис. 5.8**, та потужності 2,1 МВт_е, 3,2 МВт_е та 10,6 МВт_е.

Табл. 5.11. ТЕО БГУ 2,1 МВт_е за схемою аукціону (0,9 «зеленого» тарифу) на 20 років.

Показники проекту	МОДЕЛЬ: електроенергія по схемі аукціону (0,9 x 0,1239 євро/кВт·год без ПДВ на 20 років)							
	Базова тільки є/є				Модель №1 (теплотраса – 106 тис. євро/км) Утилізація 60% тепла на відстані від КГУ:		Модель №2 (біогазопровід – 48 тис. євро/км) Утилізація 60% тепла на відстані від БГУ:	
					1 км	10 км	1 км	10 км
Сировина	Силос кукурудзи	Гранули з соломи, власне виробництво	Солома, обробка біоекструдером	Гранули з соломи, закупівля	Силос кукурудзи		Силос кукурудзи	
Ціна сировини, євро/т	20	25 (тюкована солома)	25 (тюкована солома)	80 (товарна гранула)	20		20	
Споживання сировини, тис. т/рік	29.92	12.13	12.13	12.13	29.92		29.92	
CAPEX, млн євро	5.74	5.91	5.51	5.04	5.85	6.80	5.79	6.22
NPV, тис. євро	3 364	3 548	4 744	1 202	5 656	4 713	5 714	5 288
IRR, %	15.3	15.4	18.4	11.1	19.6	16.5	19.8	18.3
SPP, років	6.5	6.5	5.6	8.2	5.3	6.1	5.2	5.6

Як видно за результатами ТЕО, наведеними в **Табл. 5.10**, в моделі проекту з продажем електричної енергії за «зеленим» тарифом найбільш суттєвий вплив на економічні показники роботи біогазової станції має опція з прокладанням біогазопроводу з наступним комбінованим виробництвом електричної та теплової енергії в місці, де безпосередньо приєднано споживача тепла. IRR проекту в даному підсценарії складе 20,3% (при довжині біогазопроводу 1 км) та 18,3% (при довжині біогазопроводу 10 км). Дещо нижча величина IRR проекту у

підсценарії з прокладанням лише теплотраси до споживача тепла – 20,0% та 16,1%, при відстані до споживача 1 та 10 км відповідно.

Як видно з **Табл. 5.11**, модель роботи аналогічної станції по схемі аукціону з тарифом на електричну енергію в розмірі 0,9 від величини «зеленого» тарифу дозволяє суттєво підвищити показник NPV проєктів у всіх підсценаріях, але при цьому збільшується період окупності проєктів від 0,6 до 1,6 років. Це означає, що інвестор за період роботи станції зможе сумарно отримати більше грошей від реалізації електричної енергії, ніж при варіанті із «зеленим» тарифом до 2030 року.

Табл. 5.12. ТЕО БГУ 10,6 МВт_е на посліді за схемою «зеленого» тарифу

Показники проєкту	МОДЕЛЬ: електроенергія по схемі «зеленого» тарифу (0,1239 євро/кВт·год без ПДВ до 2030 р.)				
	Базова тільки є/є	Модель №1 (теплотраса – 218 тис. євро/км) Утилізація 60% тепла на відстані від КГУ:		Модель №2 (біогазопровід – 115 тис. євро/км) Утилізація 60% тепла на відстані від БГУ:	
		1 км	10 км	1 км	10 км
Сировина	Послід пташиний				
Ціна сировини, євро/т	0				
Споживання сировини, тис. т/рік	217.1				
CAPEX, млн євро	26.07	26.29	28.25	26.19	26.19
NPV, тис. євро	35 543	47 312	45 376	47 413	54 860
IRR, %	29.0	34.2	31.5	34.3	32.0
SPP, років	3.3	2.9	3.1	2.8	3.2

Табл. 5.13. ТЕО БГУ 3,2 МВт_е на жомі за схемою «зеленого» тарифу

Показники проекту	МОДЕЛЬ: електроенергія по схемі «зеленого» тарифу (0,1239 євро/кВт·год без ПДВ до 2030 р.)				
	Базова тільки електроенергія	Модель №1 (теплотраса – 218 тис. євро/км) Утилізація 60% тепла на відстані від КГУ:		Модель №2 (біогазопровід – 115 тис. євро/км) Утилізація 60% тепла на відстані від БГУ:	
		1 км	10 км	1 км	10 км
Сировина	Жом цукрових буряків				
Ціна сировини, євро/т	2.1				
Споживання сировини, тис. т/рік	90.0				
CAPEX, млн євро	10.41	10.55	11.77	10.46	10.89
NPV, тис. євро	4 536	8 012	6 805	8 099	9 916
IRR, %	15.5	20.0	17.2	20.2	19.0
SPP, років	5.5	4.7	5.2	4.6	5.4

Підсценарії із альтернативним використанням соломи замість силосу кукурудзи є доцільними лише за умови, якщо оператор біогазової станції буде сам виробляти гранули з соломи, або в технологічній лінії буде передбачено доукомплектування спеціальним біоекструдером, що дозволяє досить ефективно руйнувати волокнисту структуру соломи. Підсценарій закупівлі гранул з соломи за ринковою ціною 80 євро/т призводить до суттєвого погіршення економічних показників, IRR проекту знижується до 4,3%.

Проекти більшої потужності, при використанні сировини нижчої або взагалі «нульової» вартості, є більш економічно привабливими. При цьому, використання посліду курячого з «нульовою» вартістю у проекті потужністю 10,6 МВт_е є інвестиційно привабливою опцією у будь-якому з розглянутих підсценаріїв (Табл. 5.12). IRR масштабного проекту по посліді може складати від 29,0 до 34,3%, що є цілком прийнятним за поточних умов банківського фінансування таких проектів в Україні. Розглянутий проект з використанням жому (Табл. 5.13), при його ціні 2,1 євро/т, за економічними показниками виявився співмірним з проектом виробництва біогазу з силосу кукурудзи.

5.4. ТЕО виробництва і використання біометану

Біометан – це біогаз, доведений до якості природного газу, з вмістом метану не нижче 90%. Попри досить інтенсивний розвиток виробництва біометану в ряді країн ЄС (Німеччина, Італія, Франція, Нідерланди, Данія, Великобританія), в Україні даний напрямок досі не підтримується і, відповідно, не розвивається. Мета виробництва і використання біометану в Україні може обґрунтовуватись, виходячи з наступних міркувань:

1. Можливістю збільшення власного виробництва аналогу природного газу, заміщенням імпортованого природного газу, зменшенням енергетичної залежності.
2. Створенням альтернативи викопним видам транспортного палива, заміщенням імпортованих нафтопродуктів - бензину та дизельного палива.
3. Одержанням стабільного, відновлюваного джерела енергії з можливістю його накопичення в газових мережах.

Виробництво біометану з біогазу пов'язано з додатковими витратами на розділення метану і вуглекислого газу. Тому одиниця енергії в біометані коштує дорожче, ніж у біогазі. Біогаз, як правило, використовують лише для виробництва електроенергії, а в окремих випадках частково й для виробництва тепла. В той же час для біометану відкриваються нові можливості, які в умовах України включають в себе:

- Виробництво електроенергії та тепла з біометану з використанням газотранспортної мережі. Цей варіант дозволяє виробляти електричну та теплову енергію в безпосередній близькості до споживача і, таким чином, підвищити ефективність використання палива за рахунок ефективного використання теплової енергії, наприклад, в системах комунального ЦТ. За відсутності споживання тепла від когенераційної установки, корисна енергетична ефективність споживання виробленого біогазу не перевищує 40%.
- Акумуляування біометану в мережі природного газу для виробництва електроенергії на балансуєчому ринку. Цей варіант дозволяє використовувати біометан в періоди максимального навантаження на енергосистему і тим самим знизити потребу в регулюючих потужностях, які в Україні забезпечуються, переважно, вугільними електростанціями. Використання біометану для цієї мети може певною мірою компенсувати недоліки стохастичних ВДЕ - сонця і вітру, використання яких швидко розвивається.

- Використання біометану в якості моторного палива для комунального транспорту та в сільському господарстві. Ця опція дозволяє замінити викопне моторне паливо - бензин і дизель. Це відмінна можливість для сільгоспвиробників отримувати паливо за рахунок відходів і вторинних продуктів власного виробництва. Використання біометану як палива для громадського транспорту може значно поліпшити стан забруднення повітря у великих містах. Використання біометану легковими автомобілями також можливе, цей напрямок досить популярний в ряді країн, зокрема в Італії.
- Заміна природного газу біометаном. Біометан може використовуватися в будь-яких цілях як прямий замінник природного газу. Таким чином можна замінювати імпортований природний газ і рідкі нафтопродукти, а також виконувати зобов'язання України щодо скорочення викидів парникових газів в рамках Паризької Угоди.
- Експорт біометану в ЄС з використанням Національного реєстру виробництва і споживання біометану. Використання можливостей української газотранспортної системи, яка пов'язана з європейською газовою системою, і, в перспективі, віртуальний експорт біометану на європейський ринок може підвищити економічну привабливість проектів з виробництва біометану в Україні.

У вартості товарного біометану є три основні складові, а саме: а) вартість власне біогазу; б) вартість збагачення біогазу до біометану; в) вартість логістики виробленого біометану.

Власне проєкт з виробництва біометану відрізняється від проєкту виробництва електричної та теплової енергії з біогазу тим, що замість когенераційної установки на «сирому» біогазі функціонуватиме очисна установка, за допомогою якої фізико-хімічні показники такого біогазу приводяться до необхідних для подачі в мережу природного газу або для заправки транспорту. В результаті отримується збагачений біогаз, який прийнято називати біометаном.

В країнах ЄС фізико-хімічні показники біометану, в залежності від напрямку його використання, регламентуються відповідними національними стандартами, прикладами яких є наступні документи:

- німецький стандарт на біометан, що подається в мережі природного газу DVGW G260/G261;

- європейський стандарт EN 16726:2015, а з травня 2017 р. - ще й європейський уніфікований стандарт на біометан EN 16723-1 (для мереж природного газу) та EN 16723-2 (для транспорту).

В Україні виробники біогазу можуть подавати його в газотранспортну систему (ГТС), за умови що в місці його передачі до ГТС біогаз за своїми фізико-технічними характеристиками відповідатиме стандартам на природний газ, визначеним Кодексом ГТС.

Необхідний ступінь очищення біогазу, з однієї сторони, залежить від якості «сирого» біогазу, а з іншої – від вимог стандарту. Це визначатиме вибір відповідної технології очистки та собівартість товарного біометану.

На сьогодні існують 4 базові технології збагачення біогазу до біометану: мембранна сепарація, абсорбція (водяна, хімічна, фізична), адсорбція при змінному тиску (PSA) та кріогенна очистка. При цьому, собівартість виробництва біометану залежить більшою мірою від потужності очисної установки, меншою – від типу технології.

Як видно з **Рис. 5.9** питомі інвестиційні затрати досить близько корелюються між собою в широкому діапазоні потужностей для трьох технологій, а саме PSA, абсорбції водою та абсорбції амінами. При невеликих потужностях очистки вигідно відрізняється мембранна сепарація, а при збільшенні потужності очистки (до 900-1000 $\text{нм}^3/\text{год}$) по «сирому» біогазу різниця між вартістю різних технологій практично нівелюється і складає 1700...1850 $\text{євро}/(\text{нм}^3/\text{год})$, що в 0,9-1,2 рази відрізняється від інвестицій в когенераційну установку відповідної потужності. Таким чином, інвестиції в завод з виробництва біометану та в класичну БГУ з комбінованим виробництвом електричної/теплової енергії з біогазу є співмірними.

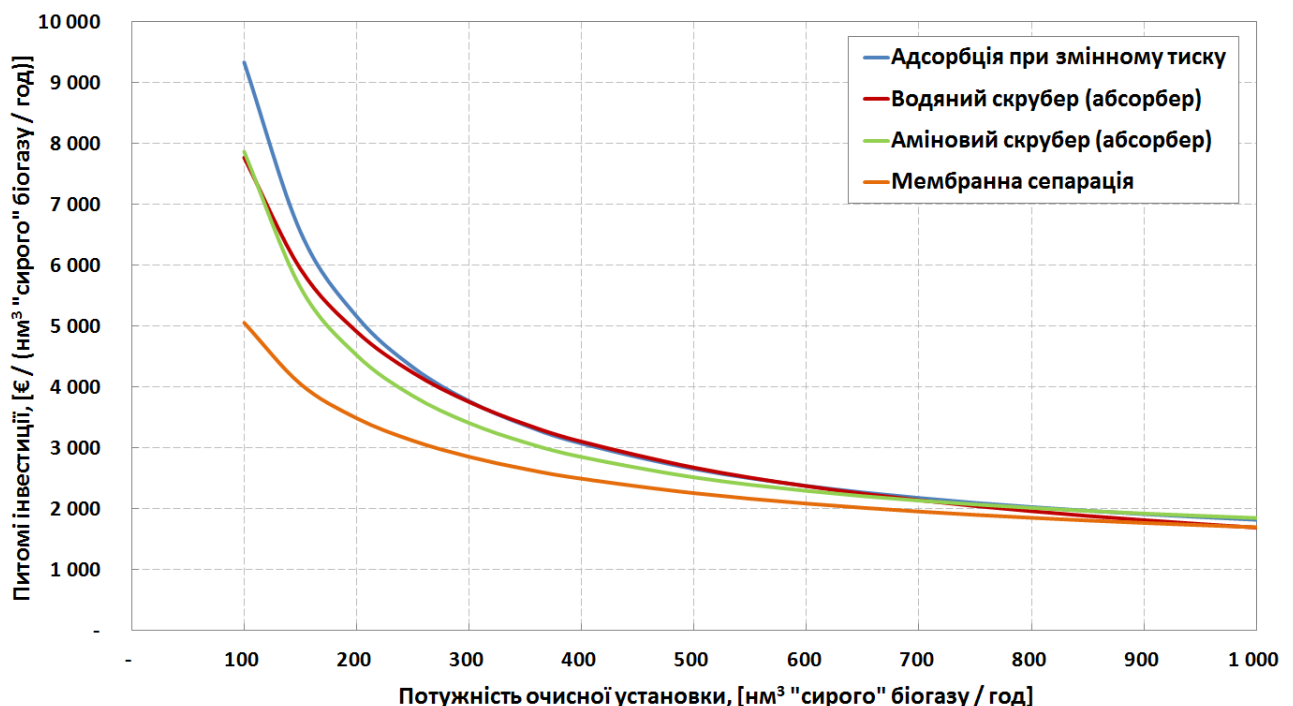


Рис. 5.9. Питомі інвестиції в установки зі збагачення біогазу до біометану [250]

За операційними витратами абсорбція амінами обійдеться помітно дорожче, інші технології досить добре корелюються за цим показником в широкому діапазоні потужностей (Рис. 5.10). При збагаченні біогазу технологією PSA собівартість виробництва 1 нм^3 біометану, залежно від потужності очистки, складе від 0,076 до 0,144 євро, при використанні водяного скрубера – від 0,075 до 0,168 євро, амінового скрубера – від 0,103 до 0,19 євро, та від 0,081 до 0,14 євро – при мембранній сепарації.

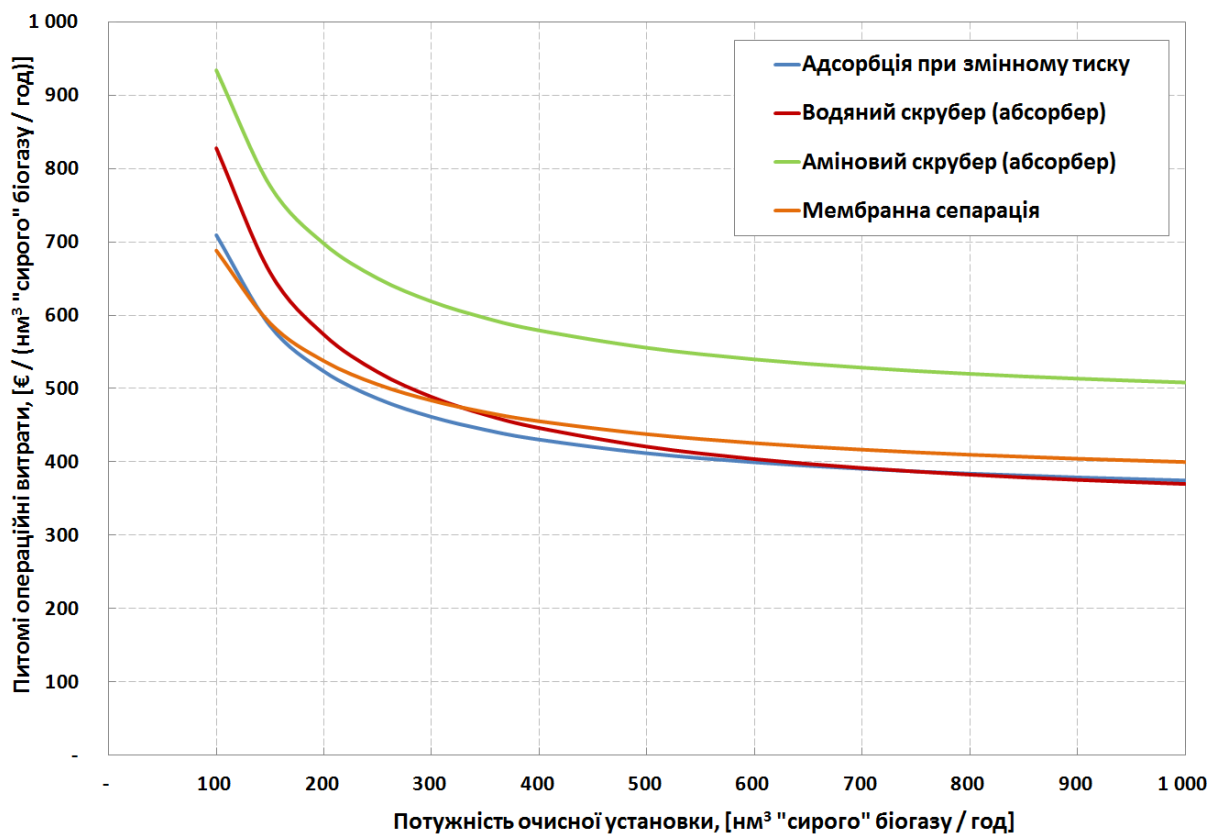


Рис. 5.10. Питомі операційні витрати на збагачення біогазу до біометану.

В перерахунку на 1 кВт·год енергії біометану його собівартість складе 0,79-1,50 $\text{€cent/кВт}\cdot\text{год}$ (PSA), 0,78-1,75 $\text{€cent/кВт}\cdot\text{год}$ (водяний скрубер), 1,08-1,98 $\text{€cent/кВт}\cdot\text{год}$ (аміновий скрубер) та 0,85-1,46 $\text{€cent/кВт}\cdot\text{год}$ (мембранна сепарація).

На кінцевій вартості товарного біометану позначиться також вартість його стиснення до необхідного тиску, одоризації, моніторингу якості, коригування теплотворної здатності, а також вартість логістики.

Повна собівартість товарного біометану, з урахуванням виду сировини для виробництва біогазу, потужності установки та вартості логістики до кінцевого

споживача, може складати 313-1136 євро/1000 м³ (Рис. 5.11). Найбільш ваговою складовою собівартості біометану є витрати на сировину.

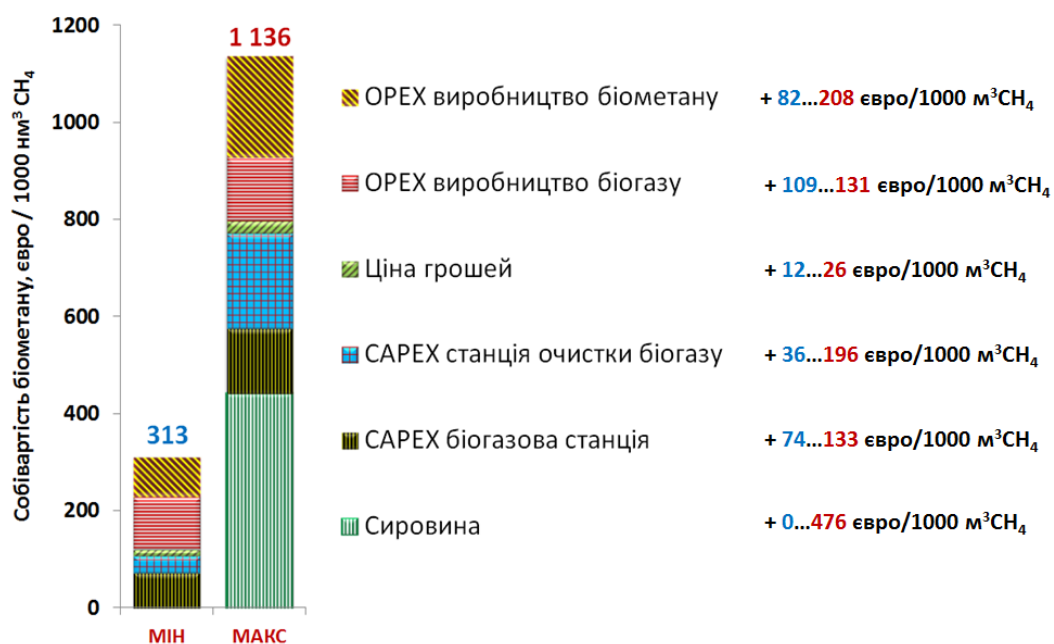


Рис. 5.11. Структура повної собівартості біометану.

Біометан як прямий замітник природного газу

Одним із можливих механізмів фінансової компенсації виробникам біометану, що постачають його в мережу природного газу, є безпосередня плата за переданий фізичний обсяг газу, з урахуванням його теплотворної здатності. Таким чином, біометан може бути прямим заміником природного газу, зокрема імпортованого. Безумовно, за даного рівня собівартості виробництва біометану та поточних цін на природний газ, говорити про безпосередню конкурентоздатність біометану не доводиться. Оплата за біометан на рівні ціни, за якої проекти його виробництва можуть бути рентабельними в поточних економічних умовах в Україні, призведе до збільшення середньозваженої оптової ціни природного газу, а відтак і підвищення тарифів на газ для кінцевих споживачів. Втім, логіка запровадження даного механізму фінансової компенсації за біометан, що напряду заміщує природний газ, може полягати в диверсифікації джерел газопостачання, зменшенні залежності від імпорту природного газу, внесенні вкладу в зобов'язання щодо скорочення викидів парникових газів, поглибленні інтеграції енергосистем України з країнами ЄС, зокрема в частині стратегічних планів та зобов'язань щодо збільшення частки відновлюваних газів в системі газопостачання.

Для оцінки можливого рівня збільшення оптової ціни на природний газ використано дані НКРЕКП щодо обсягів видобутку, імпорту та оптових цін на природний газ [251]. В моделі розрахунку прийнято, що обсяги видобутку

природного газу в регульованому та нерегульованому сегменті оптового ринку, а також обсяги імпорту відповідають таким у 2018 році. При цьому обсяги біометану, поданого в мережу, еквівалентно заміщують обсяги закупівлі імпортованого природного газу. Подачу біометану в мережу прийнято рівномірною протягом року.

Середньозважену за 2018 рік оптову ціну природного газу (регульований та нерегульований сегмент) оцінено як 213,81 євро/1000 м³ без ПДВ. Збільшення цієї ціни при збільшенні подачі біометану матиме прямо пропорційний характер. Так при ціні на біометан 730 євро/1000 м³ (з ПДВ), що відповідає можливості забезпечення задовільної рентабельності біометанового проєкту на покупній сировині (силос кукурудзи), ріст середньозваженої оптової ціни природного газу в мережі складає 5,44% на кожний 1 млрд м³ поданого біометану. При ціні біометану 540 євро/1000 м³ (з ПДВ), що відповідає можливості забезпечення задовільної рентабельності біометанового проєкту на сировині з умовно нульовою вартістю, ріст оптової ціни складатиме 2,93% на кожний 1 млрд м³ біометану.

Таким чином, при повному заміщенні імпортованого природного газу (10 млрд м³ на рік) біометаном, середньозважена оптова ціна природного газу могла б зрости орієнтовно в 1,5 рази. Слід зазначити, що приріст виробництва 1 млрд м³ біометану еквівалентний будівництву 500 МВт_e потужностей когенераційних установок на біогазі. Зважаючи на існуючі темпи нарощування потужностей генерації електричної енергії на біогазі в Україні, виробництво 1 млрд м³ біометану на рік потребує принаймні 10 років активного будівництва біометанових заводів. При цьому оптова ціна природного газу збільшувалась би не більше, ніж на 0,5% на рік при загальному споживанні природного газу на рівні 32 млрд м³/рік у 2019 р .

Біометан як моторне паливо

Біометан може бути заміником різних видів моторних палив: стисненого природного газу (CNG), бензину, дизелю, зрідженого природного газу (LNG), зрідженого нафтового газу (LPG). Установками з подачі стисненого газу можуть бути доукомплектовані як дизельні так і бензинові авто. Багато автовиробників сьогодні вже мають в своїх модельних рядах транспортні засоби на природному газі (CNG). Наприклад, Mercedes-Benz випускає моделі як легкового, так і комерційного та вантажного транспорту, що працюють на CNG. Різні моделі на CNG пропонують також компанії Fiat, Skoda, Seat, Opel, Ford, Audi, Renault, Iveco, Scania, Volvo, Neoplan та інші.

На ринку представлені також моделі аграрної техніки на метані, наприклад, трактори New Holland та Massey Ferguson. Інтерес до використання CNG як моторного пального обумовлений цілим рядом експлуатаційних та економічних переваг, які детально описані в публікації УкрАвтоГаза [252]. Використання стисненого або зрідженого біометану в ряді країн ЄС має також економічні, екологічні [253] та навіть репутаційні передумови. А чи може стиснений біометан конкурувати з моторними видами пального з викопних джерел в Україні?

Порівнюючи ціни на CNG в різних країнах Європи можна побачити, що ціна в Україні- одна з найменших у світі знаходиться в нижньому діапазоні цін (Рис. 5.12) і складає на сьогодні 0,0537 євро/кВт-год (0,51 євро/м³).

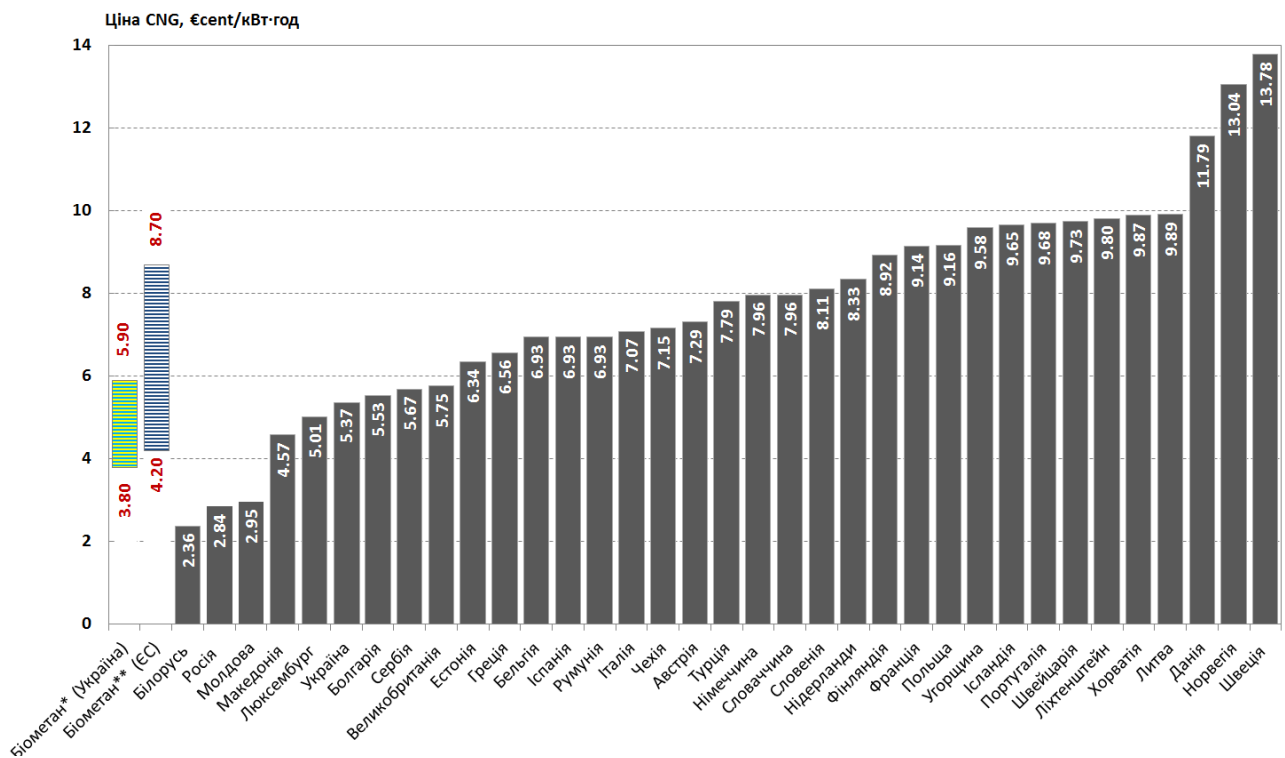


Рис. 5.12. Ціна на стиснений природний газ в країнах Європи (на основі даних CNG Europe [255]) у порівнянні з собівартістю CNG з біометану:

* - повна собівартість CNG з біометану, за оцінками БАУ для біометанового заводу потужністю 2330 нм³/год; ** - собівартість біометану за даними Європейської біогазової асоціації [254]. В перерахунку прийнято густину природного газу 0.7 кг/нм³ та нижчу теплотворну здатність 9,5 кВт·год/нм³

Найвища ціна в Швеції – 0,1378 євро/кВт-год (1,31 євро/м³), одному з лідерів з використання стисненого біометану на транспорті. Слід зазначити, що виробництво і споживання біометану на транспорті в різних країнах Європи, де це має місце, обов’язково стимулюється різними фінансовими механізмами.

Підвищена ціна на викопні палива, що формується додатковими екологічними податками та акцизами на викопні види палива, є фактично базовою економічною передумовою розвитку ринку біометану. Це, разом з різними видами додаткових прямих та непрямих фінансових бонусів, дозволяє надати необхідного імпульсу розвитку ринку біометану в заданому напрямку, що в свою чергу дає можливість урядам країн реалізувати власні стратегічні плани в енергетичній сфері.

Собівартість стисненого біометану в Україні може складати 0,038...0,059 євро/кВт·год, в залежності від сировинної складової вартості біометану 0...0,021 євро/кВт·год відповідно. Поточні ціни на стиснений природний газ на заправках мережі УкрАвтоГаз є порівнюваними з собівартістю виробництва стисненого біометану, втім це не дає підстав, за даних ринкових умов, вважати біометан конкурентоздатним зі стисненим природним газом в Україні.

Для інвестиційної привабливості виробництва стисненого біометану з IRR на рівні 20% його ринкова ціна повинна складати принаймні 0,059...0,08 євро/кВт·год (0,57...0,77 євро/м³). Окрім цього, слід розуміти, що потенціал виробництва біометану з сировинною складовою вартості, близькою до нуля, є досить обмеженим, а відтак потрібно розраховувати на широке використання більш дорогої сировини для виробництва біогазу (силос кукурудзи, пожнивні рештки).

Ціна на стиснений біометан на заправках в ряді країн ЄС є дещо вищою, ніж ціна на стиснений природний газ. Наприклад, в Естонії, при ціні на CNG 0,86 євро/кг, ціна на біометан складає 0,9 євро/кг (+4,7%), що при незначній різниці в теплотворній здатності обох видів пального означає практично рівну ціну на одиницю енергії. В Фінляндії, при ціні на CNG 1,21 євро/кг, ціна на біометан складає 1,34 євро/кг (+10,7%). Купівля більш дорогого аналогу природного газу на заправці може стимулюватись певними бонусами непрямого фінансового характеру. В Швеції, наприклад, використання біометану на транспорті субсидіюється за рахунок спеціальних переваг в оподаткуванні, окрім цього, транспорт на біометані звільняється від сплати за паркування та має інші логістичні переваги.

Якщо порівнювати собівартість виробництва стисненого біометану з вартістю рідких видів палив – бензину та дизелю, очевидно є конкурентоздатність біометану. Так, при економічно обґрунтованій ціні продажу біометану як моторного палива на рівні 0,06...0,08 євро/кВт·год, еквівалентна ціна на дизель та бензин (А-95) в Україні складає сьогодні 0,093 та 0,1 євро/кВт·год, відповідно.

Втім, при виборі між біометаном та природним газом, власник авто в Україні радше за все віддасть перевагу останньому, оскільки вже існує мережа заправних станцій АГНКС на природному газі, ціна на який є помітно нижчою, ніж економічно обґрунтована ціна продажу стисненого біометану. При цьому ніяких додаткових переваг чи стимулів для заправки авто біометаном наразі не існує.

Очевидною є необхідність розробки та впровадження в Україні механізмів фінансового та інших видів стимулювання виробництва та споживання біометану як моторного палива. Варто скористатись досвідом країн, де біометан на транспорті активно розвивається (Швеція, Фінляндія, Італія, Швейцарія).

Існуючі Національний план дій з відновлюваної енергетики до 2020 р. [256] та Енергетична стратегія України до 2035 р. [257] не містять в собі жодних згадок про біометан як такий та на транспорті зокрема. Останнім часом активно лобіюється споживання біоетанолу та біодизелю як відновлюваних видів моторних палив без акцентування окремої уваги на біометані як виді моторного палива.

Державна підтримка розвитку біометану вимагає введення державних цілей і зобов'язань щодо частки використання біометану для транспортного сектору. Національна енергетична стратегія повинна включати цілі розвитку біометану (наприклад, 5% частка біометану на транспорті до 2030 р.), а також визначати кількість заправних станцій, що працюють на біометані.

В рамках цього підходу урядові постанови можуть ввести схему підтримки для біометану, що подається в газові мережі для подальшого використання в транспортному секторі. Схема може фінансуватися постачальниками палива в рамках зобов'язань щодо забезпечення частки біометану / відновлюваного палива.

Схема може працювати з використанням сертифікатів на виробництво / споживання відновлюваного палива. Для впровадження схеми потрібна розроблення технічних вимог і державних стандартів на біометан, який використовується в якості моторного палива.

Впровадження механізмів, що стимулюють виробництво і споживання біометану, вимагає також розробки та впровадження національного реєстру біометану.

Біометан як паливо для комбінованого виробництва теплової та електричної енергії

Біометан як і «сирий» (неочищений) біогаз – газоподібне паливо з біомаси, відтак на нього за формальними ознаками поширюється дія ЗУ 555-IV «Про

альтернативні джерела енергії», зокрема в частині встановлення величини «зеленого» тарифу на електроенергію, вироблену з біогазу.

Таким чином, електроенергію, вироблену з біометану, вже сьогодні можливо було б подавати в мережу за «зеленим» тарифом 0,1239 євро/кВт·год без ПДВ. Втім, ідея збагачення біогазу, що потребує додаткових витрат, полягає саме в можливості закачування його в мережу природного газу. Це дозволяє в результаті підвищувати ефективність утилізації енергії біогазу за рахунок підключення постійного споживача тепла, який, зазвичай, відсутній поруч з виробництвом біогазу.

Закачування біометану в мережу природного газу має й інші переваги, як то можливість його накопичення та використання у місці та часі, де і коли це потрібно. Таким чином, біометан може грати важливу роль на ринку маневрових/балансуючих електричних потужностей в об'єднаній енергосистемі України.

Для створення умов використання біометану з мережі природного газу при комбінованому виробництві електричної та теплової енергії необхідно створити національний реєстр біометану з можливістю випуску сертифікатів походження на зразок європейських сертифікатів GoO (Guarantee of Origin). В перспективі, за наявності такого сертифікату, можлива віртуальна торгівля біометаном з країнами ЄС.

Після запровадження системи сертифікації біометану, в будь-якому місці, де є мережа природного газу та споживач тепла (наприклад, котельні, ТЕЦ), може бути підключена газова енергетична установка з наміром використовувати біометан. Чи достатнім є діючий «зелений» тариф на електричну енергію з біогазу для таких установок?

Розглянемо два можливих проєктних сценарія комбінованого виробництва електричної та теплової енергії з біометану з мережі природного газу, а саме:

1. Використання нової когенераційної установки.
2. Використання існуючої кваліфікованої когенераційної установки.

Враховуючи те, що вартість нової когенераційної установки на біогазі є співмірною з вартістю установки збагачення біогазу до біометану, загальна вартість проєкту БГУ + КГУ на біометані на 20-30% більше, ніж для проєкту БГУ + КГУ на «сирому» біогазі. Операційні затрати проєкту також будуть вищими на 20-40%, в залежності від вартості сировини. Очевидно, що для досягнення рентабельності проєкту на рівні IRR 20%, тариф на електричну енергію з біометану повинен бути вищим діючого «зеленого» тарифу на електроенергію з біогазу, навіть за умови додаткового використання тепла.

Когенерацію на біометані можливо використовувати в балансуєчому ринку, проте для енергетичної утилізації усього обсягу біометану когенераційною установкою, її встановлена потужність повинна бути більшою, ніж при рівномірній роботі протягом доби. Так, наприклад, при роботі такої КГУ в режимі 6 годин з 24 протягом однієї доби (3 години в години найбільшого навантаження мережі зранку і 3 години – у вечірній час), її розрахункова потужність повинна бути в 4 рази більшою від базової. Відповідно, вартість нової КГУ при цьому є пропорційно вищою.

Розрахунки показують, що для відносно великого біометанового проекту (2390 $\text{нм}^3/\text{год}$ біометану) з когенерацією на біометані потужністю 8,9 МВт_e в режимі роботи 24/24 годин, з утилізацією 60% теплової енергії за тарифом 1260 грн/Гкал без ПДВ, необхідна величина «зеленого» тарифу складає 0,131...0,174 євро/кВт·год без ПДВ, в залежності від вартості сировини. При цьому, для біометанового проекту аналогічної потужності, але з когенерацією потужністю 35,6 МВт_e в режимі роботи 6/24 годин, з утилізацією тої ж частки тепла, необхідна величина «зеленого» тарифу складає 0,196...0,239 євро/кВт·год без ПДВ.

Таким чином, діючого «зеленого» тарифу на електроенергію з біогазу не достатньо в проектному сценарії з використанням нової когенераційної установки на біометані з мережі природного газу в режимі рівномірної роботи протягом доби. Щодо доцільності проектного сценарію з генерацією електричної енергії в балансуєчому ринку наразі не можливо зробити однозначні висновки, оскільки балансуєчий ринок та ринок допоміжних послуг ДП «НЕК «Укренерго» ще не запрацював повноцінно.

В іншому проектному сценарії передбачається, що біометан з мережі природного газу може бути спалено в кваліфікованих ТЕЦ/КГУ на природному газі. Це існуючі та діючі паротурбінні установки з енергоблоком на природному газі (ТЕЦ) або газопоршневі установки (КГУ). В Україні в 2018 році налічувалось 28 ТЕЦ на природному газі, з них 25 ліцензованих, а також 46 КГУ, з них 25 ліцензованих. Сумарна встановлена електрична потужність ТЕЦ та КГУ складає 3546 МВт_e , тепла – 18547 Гкал/год (20570 МВт_T). Усі генеруючі потужності на природному газі працювали в 2018 році в середньому 1855 годин, з КВВП 21,5%, що говорить про їх недовантаженість та періодичність роботи.

З точки зору рентабельності проекту більш перспективним може бути робота саме КГУ на біометані, оскільки вони мають більший ККД електричний і є більш маневровими, у випадку підключення їх до балансуєчого ринку електроенергії. Втім, це не виключає можливості використання і паротурбінних установок для роботи на біометані.

Організаційно, включення існуючих кваліфікованих КГУ в проєкт когенерації на біометані з мережі природного газу може відбуватись на умовах їх оренди та покриття усіх операційних витрат на обслуговування. В такому разі, при ставці річної орендної плати на рівні 5% вартості нової КГУ, необхідна величина «зеленого» тарифу для проєкту 9,5 МВт_е в режимі 24/24 годин з утилізацією 60% теплової енергії складає 0,111...0,154 євро/кВт·год без ПДВ, а при роботі в режимі 6/24 годин – 0,123...0,166 євро/кВт·год без ПДВ. Нижні значення діапазонів відповідають нульовим значенням сировинної складової вартості біометану.

На **Рис. 5.13** представлено результати оцінки необхідної величини «зеленого» тарифу на електричну енергію з біометану для розглянутих вище сценаріїв, у співставленні з діючим «зеленим» тарифом на біогаз 0,124 євро/кВт·год без ПДВ.

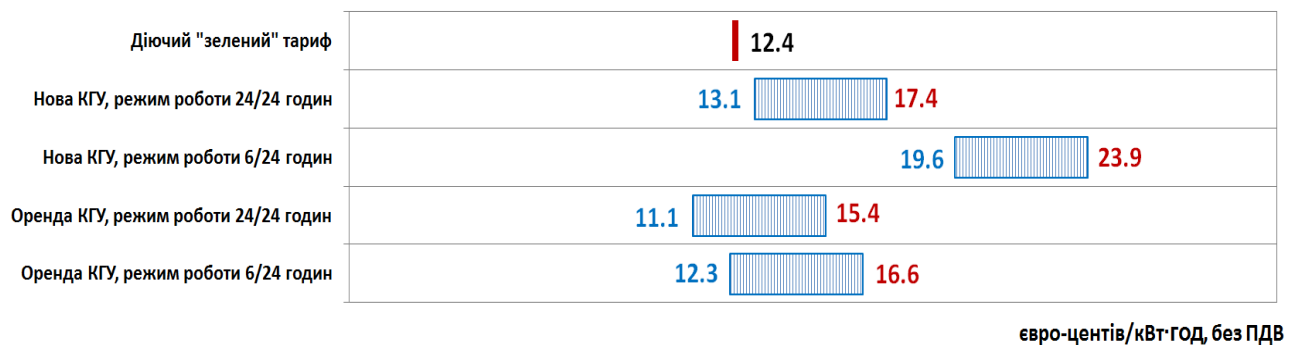


Рис. 5.13. Необхідні величини тарифу на електричну енергію, вироблену з біометану.

Таким чином, можна зробити висновок, що необхідними економічними передумовами використання біометану при комбінованому виробництві електричної та теплової енергії є:

- Створення національного реєстру біометану та системи сертифікації на зразок європейських сертифікатів GoO.
- Зобов'язання виробників електричної енергії з біометану з мережі природного газу утилізувати не менше 60% теплової енергії від ТЕЦ чи КГУ протягом року.
- Встановлення спеціального коефіцієнту «зеленого» тарифу на електричну енергію, вироблену з біометану ТЕЦ чи КГУ, що працюють в «піковому» режимі 6 годин/добу. Величина такого тарифу повинна бути більшою, ніж величина діючого «зеленого» тарифу на електроенергію з біогазу.

- Забезпечення умов пріоритетного виробництва і постачання електричної енергії, виробленої з біометану з мережі природного газу, в межах сертифікованих обсягів.
- Забезпечення гармонізації національного реєстру біометану з системою реєстрів ЄС, що дало б можливість віртуальної транскордонної торгівлі біометаном.

5.5. Висновки до розділу

1. Виконано техніко-економічну оцінку чотирьох технологій збору ПП кукурудзи у великих прямокутних тюках, рулонах, подрібненому вигляді із використанням кормозбирального комбайна та причепа-підбирача. З них найбільш ефективним є збір ПП у великих прямокутних тюках (**простий термін окупності 4,8 років, IRR 22,5%** для сценарію збору 3,5 т с.р./га та продажу тюків за ціною **40 євро/т с.р. з ПДВ**). При транспортуванні біомаси на відстань до 20 км також можна використовувати технологію заготівлі на базі причепа-підбирача.

Найбільш економічно доцільною технологією заготівлі ПП кукурудзи є використання **великих прямокутних тюків**, що дозволить отримати біомасу на центральному складі на відстані 25 км від поля за собівартістю від 22,3 євро/т с.р. Система заготівлі подрібненої ПП кукурудзи на базі кормозбирального причепа-підбирача також є економічно доцільною з простим терміном окупності 4,6 років та IRR 26,0%, але необхідно провести польові дослідження для оцінки можливості використання цієї технології для умов України. Подальша переробка ПП кукурудзи у паливні брикети та гранули дозволить підвищити додану вартість біомаси.

Оцінено витрати на зберігання ПП кукурудзи у великих прямокутних тюках під накривним матеріалом, які складають 3,1 євро/т с.р., що менше, ніж зберігання рулонів (5,0 євро/т с.р.) та подрібненої маси насипом (6,9 євро/т с.р.).

2. Виконано ТЕО виробництва брикетів з ПП кукурудзи для продуктивності лінії брикетування 0,5; 2 і 4 т/год. Для проекту з пресами іноземного виробництва продуктивністю 4 т/год внутрішня норма дохідності складає 26,1%, простий термін окупності – 4,4 роки. Економічні показники проекту з продуктивністю виробництва брикетів 2 т/год на базі українського обладнання дещо кращі, зокрема, IRR – 34,7%, простий термін окупності – 4,2 років. За умови продажу брикетів з ПП кукурудзи за ціною 90 євро/т з ПДВ для продуктивності брикетування 2,0 т/год простий термін окупності складає

3,7 років, IRR 34,7%. Таким чином, виробництво брикетів з ПП кукурудзи на зерно є економічно доцільним видом діяльності.

Виконано ТЕО виробництва гранул з ПП кукурудзи для продуктивності лінії гранулювання 2; 4 і 10 т/год. Для проекту з пресами іноземного виробництва продуктивністю 4 т/год внутрішня норма дохідності становить 22,6%; простий термін окупності – 4,8 роки. Для проекту з пресами іноземного виробництва продуктивністю 10 т/год внутрішня норма дохідності становить 29,1%, а простий термін окупності – 4,1 роки. Таким чином, виробництво гранул з ПП кукурудзи на зерно є економічно доцільним видом діяльності.

3. Виконано ТЕО анаеробного зброджування ПП АПК. Розглянуто дві альтернативні схеми отримання доходу від реалізації електричної енергії – за діючим «зеленим» тарифом до 2030 р. та за схемою аукціону, коли тариф на електроенергію може бути нижчим (очікується, що на 10% від «зеленого» тарифу), але при цьому такий тариф встановлюється терміном на 20 років. Підсценарії проектів охоплюють виробництво лише електричної енергії з різних типів сировини, додаткову утилізацію 60% надлишку теплової енергії за двома схемами, та потужності 2,1 МВт_e, 3,2 МВт_e та 10,6 МВт_e. Отримані економічні показники проектів, в основному, позитивні - IRR: 14,2 – 20%; SPP: 4,6 – 6,5 років. Одним з варіантів покращення економічних параметрів БГУ є підвищення ефективності використання енергії біогазу за допомогою утилізації тепла від КГУ (локальне та віддалене тепlopостачання, сушка с-г продукції, виробництво холоду в літній час, додаткове виробництво e/e за допомогою циклу Ренкіна). Іншою можливістю збільшення ефективності БГУ є використання рослинних залишків с-г, наприклад, підготовленої соломи зернових колосових культур. Для БГУ можливий перехід від стимулювання за допомогою «зеленого» тарифу до системи аукціонів. Такий перехід не призводить до погіршення економічних показників проекту за умови збереження ціни продажу електроенергії на аукціоні на рівні 90% від «зеленого» тарифу.

4. Виконано ТЕО виробництва і використання біометану. Повна собівартість товарного біометану, з урахуванням виду сировини для виробництва біогазу, потужності установки та вартості логістики до кінцевого споживача, може складати 313-1136 євро/1000 м³. Найбільш вагомою складовою собівартості біометану є витрати на сировину. Для інвестиційної привабливості виробництва стисненого біометану для застосування в якості моторного палива з IRR на рівні 20% його ринкова ціна повинна складати принаймні 0,059...0,08 євро/кВт·год (570...770 євро/1000 м³). Окрім цього, слід розуміти, що потенціал виробництва біометану з сировинною складовою вартості, близькою до нуля, є

досить обмеженим, а відтак потрібно розраховувати на широке використання більш дорогої сировини для виробництва біогазу (силос кукурудзи, поживні рештки).

Враховуючи те, що вартість нової когенераційної установки на біогазі є співмірною з вартістю установки збагачення біогазу до біометану, загальна вартість проєкту БГУ + КГУ на біометані на 20-30% більше, ніж для проєкту БГУ + КГУ на «сирому» біогазі. Операційні затрати проєкту також будуть вищими на 20-40%, в залежності від вартості сировини. Для досягнення рентабельності проєкту на рівні IRR 20%, тариф на електричну енергію з біометану повинен бути вищим діючого «зеленого» тарифу на електроенергію з біогазу, навіть за умови додаткового використання тепла.

Включення існуючих КГУ в проєкт когенерації на біометані з мережі природного газу може відбуватися за величини «зеленого» тарифу для проєкту 9,5 МВт_е в базовому режимі з утилізацією 60% теплової енергії, яка складає 0,111...0,154 євро/кВт·год без ПДВ, а при роботі в піковому режимі – 0,123...0,166 євро/кВт·год без ПДВ. Нижні значення діапазонів відповідають нульовим значенням сировинної складової вартості біометану.

Необхідними економічними передумовами використання біометану є створення національного реєстру біометану та системи сертифікації на зразок європейських сертифікатів GoO.

ВИСНОВКИ

В роботі вирішено актуальну науково-прикладну проблему, яка полягає у недостатності існуючих закономірностей та наукових результатів для подальшого підвищення ефективності виробництва енергії з біологічних видів палива, для оцінки реального енергетичного потенціалу біомаси в Україні, для дослідження процесів заготівлі біомаси, її перетворення у тверде біопаливо, процесів спалювання та анаеробного зброджування біомаси та їх екологічного впливу на довкілля. Найбільш вагомими науковими та практичними результатами роботи є такі:

1. Науково обґрунтовано методичні засади оцінювання енергетичного потенціалу біомаси, які охоплюють оцінку теоретичного, технічно досяжного та економічно доцільного потенціалу біомаси. Включено уточнені частки ПП с-г культур та цілий ряд нових складових (сухостій, деревні відходи від реконструкції захисних лісосмуг, відходи обрізки та викорчовування багаторічних сільськогосподарських насаджень, біогаз з лігноцелюлозних відходів та ПП АПК, біогаз зі стічних вод). Економічно доцільний енергетичний потенціал біомаси України в 2018 р. склав 23,1 млн т н.е./рік, а в 2050 р. складе 45 млн т н.е./рік.

2. Розроблено дорожню карту розвитку біоенергетики України до 2050 р. Передбачається, що загальна встановлена потужність біоенергетичного обладнання у 2050 році складатиме близько 49,6 ГВт_т і 5,2 ГВт_{ел}, загальне споживання біопалив – 20,28 млн т н.е./рік, заміщення природного газу – біля 20 млрд м³/рік, створення робочих місць – до 160 тис.

3. На основі виконаного аналізу показано перспективність використання ПП кукурудзи як палива, що має досить хороші паливні характеристики. Проаналізовано чотири технології заготівлі ПП кукурудзи. З огляду на енерго- та ресурсоефективність, можливість використання для збирання ПП кукурудзи на зерно наявної у агровиробників техніки, зменшення контакту біомаси із ґрунтом та мінімізацію економічних витрат на заготівлю, для України рекомендовано трьохпрохідну систему заготівлі ПП кукурудзи у великих прямокутних тюках.

4. За методологією оцінки життєвого циклу виконано аналіз енергетичної ефективності та скорочення викидів парникових газів при використанні ПП кукурудзи у вигляді тюків, гранул та брикетів для виробництва теплової енергії. Використання великих тюків ПП кукурудзи при відстані транспортування сировини до 50 км забезпечує зниження споживання первинної енергії викопного палива у 10 та більше разів, а використання гранул та брикетів - у

понад 5 разів. Скорочення викидів парникових газів при використанні пожнивних решток у тюках в якості палива становить 83-91%; у гранулах 73-79%; у брикетах 75-81% за умови транспортування біомаси на відстані до 150 км.

5. Аналіз можливостей застосування електрогенеруючих потужностей на біомасі, біогазі і біометані для балансування енергетичної системи України показав, що для ефективної роботи на ринку пікових електричних навантажень ТЕЦ на біомасі повинні бути дооснащені додатковими котлами, а необхідний тариф в години пік має становити 0,273-0,279 євро/кВт·год. БГУ повинна бути дооснащена додатковими електрогенеруючими потужностями та резервним газгольдером, а необхідний тариф має становити 0,266 євро/кВт·год. Найбільш перспективними для роботи в «пікових» режимах може бути робота КГУ на біометані, для яких необхідний тариф має становити 0,123-0,166 євро/кВт·год.

6. Вдосконалено технологію спалювання відходів деревини в котлах з топковим пристроєм ретортного типу, що дозволяє використовувати деревне паливо з вологістю до 50%. Розроблена технологія дає можливість збільшити інтенсивність горіння в 3-4 рази та зменшити рівень емісії забруднюючих речовин до 50%. Розроблений котел забезпечує ККД на рівні 83,2%.

7. Розроблено, виготовлено та експериментально досліджено дослідно-промислові зразки соломоспалювальних котлів періодичної дії потужністю 100, 250 та 350 кВт. Шляхом експериментального підбору ряду конструктивних та експлуатаційних параметрів, а саме швидкості і кута нахилу сопел дуття та запропонованого швидкого та ступеневого повертання сопел, досягнуто стабільне вигорання тюка, забезпечення стабільних показників потужності котла, зменшення емісії СО. Розроблений котел забезпечує середній ККД на рівні 76-78%.

8. Розроблено та експериментально досліджено оригінальну конструкцію топкового пристрою для безперервного спалювання малих тюків соломи потужністю до 100 кВт, в якому забезпечується стабільне горіння, постійність температури теплоносія на виході з котла разом з помірними викидами шкідливих речовин (СО – 2450 ppm). Розрахований за балансовим методом ККД котла становить 85,5%.

9. Експериментально підтверджено, що пожнивні рештки с-г культур є придатними для виробництва з них біогазу шляхом метанової ферментації. Вихід біогазу/метану залежить від виду культури, з якої отримано пожнивні рештки, а також від способу їх попередньої підготовки. Попередня підготовка пожнивних решток методом екструзії при виробництві гранул дозволяє збільшити вихід біогазу/метану. Концентрація органічної речовини пожнивних решток в біореакторі впливає на питому швидкість виходу біогазу/метану з одиниці

робочого об'єму, а вказана залежність визначається запропонованим логарифмічним рівнянням. Процес метанової ферментації в періодичному режимі при температурі $36 \pm 1^\circ\text{C}$ не інгібується при доведенні стартової концентрації СОР поживних решток пшениці в реакторі до 61,3 г СОР/кг.

10. Адаптовано для застосування у біоенергетичних проєктах методичні засади фінансового аналізу інвестиційних проєктів, де розрахунки виконуються для сухої маси, що робить методику більш універсальною і дозволяє отримати більш коректні результати.

- З використанням запропонованої методики виконано ТЕО чотирьох технологій збору ПП кукурудзи. З них найбільш ефективним є збір ПП у великих прямокутних тюках (простий термін окупності – 4,8 років, IRR – 22,5%).
- Виконано ТЕО виробництва брикетів з ПП кукурудзи для продуктивності лінії брикетування 0,5; 2 і 4 т/год. Для проєкту з продуктивністю 2 т/год простий термін окупності складає 3,7 років, IRR – 34,7%.
- Виконано ТЕО виробництва гранул з ПП кукурудзи для продуктивності лінії гранулювання 2; 4 і 10 т/год. Для проєкту з продуктивністю 4 т/год простий термін окупності складає 4,4 роки, IRR - 26,1%.
- Виконано ТЕО анаеробного зброджування ПП АПК. Отримано простий термін окупності: 4,6 – 6,5 років, IRR: 14,2 – 20%.
- Виконано ТЕО виробництва і використання біометану. Включення існуючих КГУ в проєкт когенерації на біометані може відбуватися за величини «зеленого» тарифу в базовому режимі на рівні 0,111-0,154 євро/кВт·год, а при роботі в піковому режимі – 0,123-0,166 євро/кВт·год.

11. Результати дослідження впроваджено на підприємствах країни та у навчальному процесі вищих навчальних закладів, зокрема на котлобудівельному заводі ТОВ «Волинь-Кальвіс», у ТОВ «Котлозавод «Крігер», у ПрАТ «МХП Еко Енерджи», у навчальному процесі Національного університету біоресурсів і природокористування України, в Держенергоефективності та комітеті ПЕК і ЖКГ Верховної Ради України.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Закон України «Про альтернативні види палива», Ст.1 <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1391-14>
2. Біологічні ресурси і новітні біотехнології виробництва біопалив : матеріали наук. конф. в рамках цільової комплексн. програми наук. дослідж. НАН України «Біол. ресурси і новітні технології біоенергоконверсії» (9-11 вересня 2014 р.) / ред. кол. : Я.Б. Блюм (голова).
3. Система використання біоресурсів у новітніх біотехнологіях отримання альтернативних палив: монографія / Я.Б.Блюм, І.П.Григорюк, К.В.Дмитрук, В.О.Дубровін, А.І.Ємець, Г.М.Калетнік, М.Д.Мельничук, В.Г.Мироненко, Д.Б.Рахметов, А.А.Сабірний, С.П.Циганков / Держ. установа «Ін-т харч. біотехнології та геноміки НАН України», Нац. універ. біоресурсів і природокористування України, Ін-т біології клітини НАН України, Нац. ботан. сад ім. М.М.Гришка НАН України, Вінницький наці. аграр. універ. – К.: "Аграр Медіа Груп", 2014. – 360 с. – ISBN 978-617-646-207-1
4. Міскантус в Україні : монографія / кол. авт. : М.В. Роїк, Н.В. Заїменко, Д.Б.Рахметов та ін. ; НААН України. Ін-т біоенергетичних культур і цукрових буряків. – Київ : ФОП Ямчинський О.В., 2019. – 256 с. : рис., табл. – ISBN 978-617-7804-11-5
5. Рахметов Д.Б. Нетрадиционные виды растений для биоэнергетики [Електрон. ресурс] / Словацкий с.-х. ун-т. в Нитре. - Нитра, 2018. - 103 с. . - (с. Агробиоразнообразие для улучшения питания, здоров'я и качества жизни). - ISBN 978-80-552-1855-7. - режим доступа: https://agrobionet.uniag.sk/flipbkTB03_RU
6. Рахметов, І.П. Григорюк [та ін.] ; НАН України, ДУ «Ін-т харч. біотех. та геноміки НАН України», Нац. ботан. сад ім. М.М. Гришка, Укр. т-во клітин. біологів та біотех. – К. : Фітосоціоцентр, 2014. – 247 с. : рис., табл. – ISBN 978-966-306-179-7
7. Міскантус в Україні: інтродукція, біологія, біоенергетика / Д.Б. Рахметов, Т.О. Щербакова, С.Д. Рахметов ; НАН України, Нац. ботан сад ім. М.М. Гришка, НУБіП. – Київ: Фітосоціоцентр, 2015. – 158 с. : рис., табл.. – ISBN 978-966-306-182-5
8. Рахметов Д.Б. Нетрадиционные виды растений для биоэнергетики [Електрон. ресурс] / Словацкий с.-х. ун-т. в Нитре. - Нитра, 2018. - 103 с. . - (с. Агробиоразнообразие для улучшения питания, здоров'я и качества жизни). - ISBN 978-80-552-1855-7. - режим доступа: https://agrobionet.uniag.sk/flipbkTB03_RU

9. Енергетичні рослинні ресурси. С. Каленська, Д. Рахметов та ін. . – Каунас, 2010. – 93 с. - ISBN 978-9955-896-92-0.
10. Global Bioenergy Statistics, WBA, 2019
https://worldbioenergy.org/uploads/191129%20WBA%20GBS%202019_HQ.pdf
11. <https://www.renewable-ei.org/en/statistics/international/>
12. <https://www.aljazeera.com/ajimpact/eu-power-sector-emissions-drop-coal-collapses-europe-200205222402274.html>
13. Eurostat news release 27/2019, 12.02.2019
<https://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/9571695/8-12022019-AP-EN.pdf/b7d237c1-ccea-4adc-a0ba-45e13602b428>
14. Biomass supply. Bioenergy Europe Statistical Report, 2019
<https://bioenergyeurope.org/statistical-report.html>
15. Biomass for heat. Bioenergy Europe Statistical Report, 2019
<https://bioenergyeurope.org/statistical-report.html>
16. Bioelectricity. Bioenergy Europe Statistical Report, 2019
<https://bioenergyeurope.org/statistical-report.html>
17. Biofuels for transport. Bioenergy Europe Statistical Report, 2019
<https://bioenergyeurope.org/statistical-report.html>
18. <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth/an-introduction-to-biogas-and-biomethane>
19. Directive (EU) 2018/2001 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11.12.2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN>
20. Енергетичний баланс України за 2018 рік. Експрес-випуск Державної служби статистики України 20.12.2019 <http://www.ukrstat.gov.ua/> (розділ «Експрес випуски»)
21. Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 р. Затверджений розпорядженням КМУ № 902-р від 01.10.2014 <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/902-2014-%D1%80>
22. Дані Держстату «Постачання та використання енергії у 2018 році» <http://www.ukrstat.gov.ua/> (розділ «Постачання та використання енергії»)
23. <https://www.nerc.gov.ua/?id=39060>
24. <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-energy-consumption-and-power-mix-charts>
25. <http://www.nerc.gov.ua/>

26. Розвиток децентралізованого енергопостачання на основі нетрадиційних місцевих енергоресурсів/[под ред. Долинського АА] АВ Щурчков, ГМ Забарний, АМ Разаков - К.: ИТТФ НАН України.– 2001, 131 с.
27. Енергетичний потенціал нетрадиційних джерел енергії України / Г. М. Забарний, А. В. Щурчков; НАН України. Ін-т техн. теплофізики. - К., 2002. - 210 с.
28. Клименко В.Н., Мазур А.И., Сабашук П.П. Когенерационные системы с тепловыми двигателями. Справочное пособие. Часть 1. Общие вопросы когенерационных технологий // К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины.– 2008.– 559 с.
29. Клименко В.Н., Мазур А.И., Сигал А.И. Когенерационные системы с тепловыми двигателями. Справочное пособие. Часть 2. Газотурбинные когенерационные технологии // К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины.– 2011.– 79.
30. Клименко В.Н., Мазур А.И., Письменный Е.Н., Багрий П.И., Гелетуха Г.Г. Когенерационные системы с тепловыми двигателями: Справочное пособие. Часть 3: Инновационные технологии для когенерации / Київ: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2016. 528 с.
31. Карп И.Н., Никитин Е.Е., Пьяных К.Е. Направления замещения природного газа альтернативными видами топлива и энергии в промышленности и коммунальной энергетике// Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2009. – №4. – С.16-25.
32. Заміщення природного газу альтернативними паливами: наук. вид. / І. М. Карп, Є. Є. Нікітін, К. Є. П'яних, К. К. П'яних ; НАН України. Ін-т газу. - Київ: Наук. думка, 2019. - 231 с.
33. Карп І.М., П'яних К.Є., Колесник В.В., Орлик В.Н., Юдін А.С. “Математическое моделирование процесса сгорания древесной частицы” - Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010, №5. – С.13-20.
34. Карп І.М., П'яних К.Є., Провалов А.Ю., Юдін А.С. “Исследование динамики выгорания древесных опилок и лузги подсолнечника в кипящем слое” - Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010, №3. – с.с. 9-13.
35. Розвиток ринку біопалив в Україні/ Монографія/ Калетник Г.М. – К.: Аграрна наука, 2008. – 464 с.
36. Біопалива: ефективність їх виробництва та споживання в АПК України / Навч. посібник/ Калетник Г.М., Пришляк В.М. – К: Аграрна наука, 2010. – 327 с.
37. Перспективи розвитку біоенергетики в Україні / М. В. Роїк, В. Л. Курило, О. М. Ганженко, М. Я. Гументик // Цукрові буряки. - 2012. - № 2-3. - С. 6-8. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Cb_2012_2-3_3

38. Біоенергетика в Україні: стан та перспективи розвитку / М. В. Роїк, В. Л. Курило, О. М. Ганженко, М. Я. Гументик // Біоенергетика. - 2013. - № 1. - С. 5-10. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Bioen_2013_1_2.
39. Энергетическое использование биомассы. Перспективы и реальность / М. Губинский, Т. Введенская // Пром. теплотехника. - 2002. - 24, № 2-3. - С. 138-142.
40. Сучасний стан і перспективи використання біотехнологій для виробництва електричної та теплової енергії в Україні / А. І. Симборський // Пробл. заг. енергетики. - 2004. - № 11. - С. 14-21.
41. Біоенергія в Україні – розвиток сільських територій та можливості для окремих громад Дубровін В.О., Мельничук М.Д., Мельник Ю.Ф. та ін. / Науково-методичні рекомендації. – К: НУБіП України, 2009 – 122 с.
42. Біопалива : технології, машини і обладнання / В. О. Дубровін [та ін.] ; Національний аграрний ун-т, Ін-т будівництва, механізації та електрифікації рільництва, Ін-т сільськогосподарської техніки, Ін-т культури землеробства. - К. : Енергетика і електрифікація, 2004. - 256 с.
43. Альтернативна енергетика Мельничук М.Д., Дубровін В.О., Мироненко В.Г. та ін. / Навч. посібник для студ. вищ. навч. закл. – К.: Аграр Медіа Груп, 2011 – 612 с.
44. Альтернативна енергетика: [навч. посібник для студ. вищ. навч. закл.] / М.Д. Мельничук, В.О. Дубровін, В.Г. Мироненко, І.П. Григорюк, В.М. Поліщук и др. – К: «Аграр Медіа Груп», 2012. – 244 с.
45. Забезпечення ефективного використання паливно-енергетичних ресурсів у аграрному секторі економіки: теорія, методологія, практика : монографія / В. І. Гавриш; Миколаїв. держ. аграр. ун-т. - Миколаїв, 2007. - 283 с.
46. Енергетичний потенціал біомаси в Україні / [Лакида П.І., Гелетуха Г.Г., Васишин Р.Д., та ін.], відповід. наук. ред. д.с.-г.н., проф. П.І. Лакида; Навчально-науковий інститут лісового і садово-паркового господарств са НУБіП України. – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2011. – 28 с.
47. Кудря С.О. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / С.О. Кудря, В.Ф. Резцов, Т.В. Суржик та ін. – К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2008. – 55 с.
48. Оцінка енергетичного потенціалу біомаси в Україні. Частина 1. Відходи сільського господарства та деревна біомаса / Г.Г. Гелетуха, Т.А. Железна, М.М. Жовмір, Ю.Б. Матвеев, О.І. Дроздова // Промышленная теплотехника. – 2010. — Т. 32, № 6. — С. 58-65.

49. Енергетичний потенціал нетрадиційних джерел енергії України / Г.М. Забарний, А.В. Шурчков; НАН України. Ін-т техн. теплофізики. - К., 2002. - 210 с.
50. Статистичний збірник сільське господарство України 2018. / Державна служба статистики України, 2019. – 235 с.
51. Camia A., Robert N., Jonsson R., Pilli R., García-Condado S., López-Lozano R., van der Velde M., Ronzon T., Gurría 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.
52. Statistical report biomass supply. Bioenergy Europe, 2019. – 35 p.
53. E.M.W. Smeets, D. Lemp, M. Dees Biomass Energy Europe Methods & Data Sources for Biomass Resource Assessments for Energy. Version 3. – November 2010. – 272 p.
54. Методика узагальненої оцінки технічно-досяжного енергетичного потенціалу біомаси / В.О. Дубровін, Г.А. Голуб, С.В. Драгнєв, Г.Г. Гелетуха, Т.А. Железна, П.П. Кучерук, Ю.Б. Матвєєв, С.О. Кудря, Г.М. Забарний, З.В. Маслюкова. – К. : ТОВ «Віолпринт», 2013. – 25 с.
55. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А. Перспективи використання відходів сільського господарства для виробництва енергії в Україні. Аналітична записка БАУ№7 / Біоенергетична асоціація України, 2014. <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/04/position-paper-uabio-7-ua.pdf>
56. Визначення частки соломи та рослинних відходів для енергетичного використання С.В. Ключ, Відновлювана енергетика. – 2013, №4. – С. 82-85.
57. Использование растительных отходов для производства энергии Г.Н. Забарний, С.В. Ключ, Д.С. Довженко, Альтернативная энергетика и экология. – 2011, №8 (100). – С. 100-106.
58. Біоенергетичний потенціал лісостепової і поліської зон України та перспективи його використання: монографія / ред.: В.І. Лади́ка; Сум. облдержадмін., Сум. нац. аграр. ун-т. - Суми : Унів. кн., 2009. - 304 с.
59. Кухарець С. М. Оцінка потенціалу сировини рослинного походження для теплових потреб у Житомирській області / С. М. Кухарець, Я. Д. Ярош, С. В. Ярош // Вісник ЖНАЕУ. – 2017. – № 1 (58), т. 1. – С. 230–240.
60. Ярош Я.Д. Оцінка потенціалу сировини рослинного походження для теплових потреб в Україні за 2018 рік / Я.Д. Ярош, М.М. Кухарець / Наукові горизонти, 2019, № 3 (76). – 38-47 с.

61. Гальчинська Ю.М. Оцінка потенціалу біомаси побічної продукції сільськогосподарських культур в аграрному секторі економіки // Економіка АПК. - 2019. - № 5 - С. 15.
62. Коэффициенты пересчета зерна и семян в побочную продукцию и содержание основных элементов питания в побочной продукции сельскохозяйственных культур в Республике Беларусь / Е.Н. -Богатырева, Т.М. Серая, О.М. Бирюкова, Т.М. Кирдун, Ю.А. Белявская, М.М. Торчило // Почвоведение и агрохимия № 2(57). – 2016. – 78-89 с.
63. Рослинні відходи-важливі резерви твердого біопалива С.В. Ключ, Біоенергетика. – 2013, №2. – С. 25-27.
64. Підручник "Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії". С.О. Кудря, – К.: НТУУ "КПІ", 2012. – 492 С.
65. Оценка и прогноз потенциала твердого биотоплива Украины С.В. Ключ, Г.Н. Забарный Компрессорное и энергетическое машиностроении. – №2 (24). – 2011. – С. 8-13.
66. Визначення енергетичного потенціалу соломи і рослинних відходів за період незалежності України С.В. Ключ, Відновлювана енергетика. – 2012, №3. – С. 71-79.
67. An integrated assessment of the potential of agricultural and forestry residues for energy production in China / Ji Gao , Aiping Zhang, Shu Kee Lam, Xuesong Zhang, Allison M. Thomson, Erda Lin, Kejun Jiang, Leon E. Clarke, James A. Edmonds, Page G. Kyle, Sha Yu, Yuyu Zhou and Sheng Zhou // GCB Bioenergy (2016) 8, 880–893.
68. 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, 30 (2010) 1889–1897.
69. Nicolae Scarlat , Viorel Blujdea, Jean-Francois Dallemand Assessment of the availability of agricultural and forest residues for bioenergy production in Romania / Biomass and bioenergy, 35 (2011) 1995–2005.
70. Niclas Scott Bentsen, Claus Felby, Bo Jellesmark Thorsen Agricultural residue production and potentials for energy and materials services / Progress in Energy and Combustion Science 40 (2014) 59–73.
71. Tévécia Ronzon, Stephan Piotrowski Are Primary Agricultural Residues Promising Feedstock for the European Bioeconomy? Industrial Biotechnology. Volume 13, Issue 3. – 2017. – 113-127.
72. Characterisation of Agricultural Waste Co- and By-Products. D 1.2 Report of AgroCycle project, 2016.
http://www.agrocycle.eu/files/2017/10/D1.2_AgroCycle.pdf

73. Database/Inventory of the CEREALS AWCB value chain. D 1.1 Report of AgroCycle project, 2016. <http://www.agrocycle.eu/files/2018/02/CEREALS-AWCB-value-chain-.pdf>
74. Maximising the yield of biomass from residues of agricultural crops and biomass from forestry. Report of Ecofys project, 2016. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Ecofys%20-%20Final%20report%20EC_max%20yield%20biomass%20residues%2020151214.pdf
75. Shahab Sokhansanja, Anthony Turhollow, Janet Cushman, John Cundiff Engineering aspects of collecting corn stover for bioenergy / Biomass and Bioenergy, 23 (2002) – 347–355.
76. L. Kocsis, Z. Hudoba, T. Vojtela Investigation of the maize stalk gathering for energetic use <https://www.yumpu.com/en/document/read/35926184/investigation-of-the-maize-stalk-gathering-for-energetic-use>
77. Caroline Shneider, Hans Hartmann Maize as energy crop for combustion. Agricultural optimization of fuel supply. / Berichte aus dem TFZ, 2006. – 60 p.
78. Monika Fleschhut, Kurt-Jurgen Hulsbergen, Stefan Thurner, Joachim Eder Analysis of different corn stover harvest systems / LANDTECHNIK, 71 (6), 2016. – 252-270 p.
79. Körnermaisstroh als Biogassubstrat / LfL-Information, 2016. – 64 p.
80. Peter A. Vadas, Matthew F. Digman Production costs of potential corn stover harvest and storage systems / Biomass and bioenergy 54 (2013) 133–139.
81. Matt Darr, Keith Webster Corn Stover Harvesting Machinery. PM3051A (2014) <https://store.extension.iastate.edu/product/Corn-Stover-Harvesting-Machinery>
82. David Ertl Sustainable corn stover harvest / Iowa Corn Promotion Board, 2013. – 18 p.
83. Топливные свойства пожнивных остатков кукурузы / В. Г. Крамар, Н. М. Жовмир, В. И. Зубенко, С. М. Чаплыгин // Пром. теплотехника. - 2009. - 31, № 5. - С. 76-80.
84. Obernberger I. Decentralized Biomass Combustion: State of the Art and Future Development // Biomass and Bioenergy. -1998, vol.14, N 1, , pp. 33-56.
85. Аналіз умов горіння сумішей летких з повітрям при спалюванні біомаси М. М. Жовмір Відновлювана енергетика. -2014, №4(39). – С. 81-86.
86. Christiansen R. Combustion of Bio-fuels for the Production of Heat and Power. Proceedings of the European Seminar BLOWATT, Milan, Italy 4-5 October, 1993, p.531-556.
87. <https://metalerg.pl/main/>
88. <http://www.ipcet.ru/>

89. <https://passatenergy.com/en/1mv-passat-energy-2/>
90. <http://originalheating.com/wp-content/uploads/2012/11/Farm-2000-Big-Bale.pdf>
91. <https://www.reka.com/en/products/byfuel/straw/>
92. <http://www.udem.com.ua/>
93. <https://www.hotelexagon.it/2019/09/10/10651.html>
94. Тепло почти даром. Исследование технологий сжигания тюкованной соломы в топке водогрейного котла Н.М. Жовмир, Т.А. Железная, С.М. Чаплыгин, В.Я. Ковалев, Зерно, №5, 2008, с. 86-94.
95. Котли для спалювання соломи М.М. Жовмір, ЄМ Олійник, СМ, Чаплигін Агросектор, 2007, № 6, с.36-37
96. Альтернативное теплоснабжение за счет использования соломы Н. Жовмир, Е Олейник, С Чаплыгин, Коммунальное хозяйство, 2007, № 8, с 24-27
97. Тривалість періоду виходу летких речовин при спалюванні часток соломи та солом'яних гранул М. М. Жовмір Відновлювана енергетика.-2015, №4 – С. 72–79.
98. Кінетика термолізу та вигорання часток твердого біопалива. Частина 2. Швидкість термолізу сухих та вологих деревних та солом'яних гранул М. М. Жовмір Відновлювана енергетика. -2016, № 3 – С. 65–72.
99. Кінетика термолізу та вигорання часток твердого біопалива. Частина 3. Швидкість вигорання коксозольного залишку деревних і солом'яних гранул. Відновлювана енергетика. -2016, № 4 – С.86–93.
100. Температура деревних та солом'яних гранул при вигоранні вуглецю М. М. Жовмір Відновлювана енергетика. -2017, №3 – С. 87–95.
101. Кінетика термолізу та вигорання часток твердого біопалива. Частина 4. Вплив анізотропії гранул на швидкість окислення вуглецю з коксозольного залишку в осьовому та радіальному напрямках М. М. Жовмір Відновлювана енергетика. -2017, №4 – С. 93–100.
102. Использование соломы для производства тепловой энергии в отопительных котельных Донецкой области / А. И. Баштовой, Н. М. Жовмир, С. В. Радченко, С. М. Чаплыгин // Пром. теплотехника. - 2008. - 30, № 3. - С. 54-59.
103. Перспективи використання соломоспалювального обладнання в сільських опалювальних котельнях України / А. І. Баштовий // Пром. теплотехника. - 2009. - 31, № 4. - С. 94-97
104. Снежкін Ю.Ф., Михайлик В.А., Корінчук Д.М. Композиційні палива на основі торфу і рослинної біомаси: сировина, властивості, режими, обладнання, технології : монографія / Ю. Ф. Снежкін, Д. М. Корінчук, В. А.

Михайлик; НАН України, Ін-т техн. теплофізики. – К., 2012. – 212 с. – Бібліогр.: с. 196–211 - укр.

105. Снежкин Ю.Ф., Корінчук Д.М., Кашурин А.Н. Исследование возможности повышения калорийности брикетов на торфяной основе // Переработка энергоресурсных отходов. Проблемы экологической безопасности: VII науч.-практ. конф., 21-25 февраля 2005 г.: сб. материалов. – К., 2005, с. 20–23.

106. Снежкін Ю.Ф., Корінчук Д.М., Безгін М.М. Дослідження режимів термовологістної обробки біомаси для виробництва паливних гранул // Проблемы промышленной теплотехники: VIII межд. конф., 8-11 октября 2013 г.: тезисы докл. – К., 2013– Электронный ресурс <http://itf.kiev.ua/?p=2617>

107. Розробка композиційного палива на основі торфу і рослинної біомаси для використання в теплоенергетичних установках : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.06 / Д. М. Корінчук; Ін-т техн. теплофізики НАН України. - К., 2010. - 20 с.

108. Виробництво композиційних палив з відходів промисловості та сільського господарства / Б. М. Процишин, Л. Й. Воробйов, Є. Л. Лох, С. М. Павлюк, П. В. Гордієнко // Пром. теплотехника. - 2006. - 28, № 2. - С. 46-50.

109. Відновлювальні джерела енергії. Оптимальний склад біокомпозиції / М. С. Мальований, В. М. Атаманюк, Р. Я. Бать // Хім. пром-сть України. - 2007. - № 2. - С. 61-64.

110. Утилізація промислових відходів переробки деревини шляхом створення біопалива : автореф. дис. канд. техн. наук / Р. Я. Бать; Нац. ун-т "Львів. політехніка". - Л., 2008. - 18 с.

111. Развитие процессов и оборудования для производства топливных брикетов из биомассы / А. Г. Трошин, В. Ф. Моисеев, И. А. Тельнов, С. И. Завинский // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. - 2010. - № 3/8. - С. 36-40.

112. Досвід виробництва альтернативних екологічно чистих видів палива на Полтавщині / Г. А. Удовиченко, Л. В. Хоменко, Т. Л. Алєйнікова, В. В. Дерієнко, С. К. Ткаченко // Вісн. Полтав. держ. аграр. акад. - 2010. - № 3. - С. 159-164.

113. Сравнительная оценка качества твердых биотоплив / В. М. Побединский, Т. Иванова, А. Мунтян, А. Кандаков // Пр. Тавр. держ. агротехнол. ун-ту. - 2011. - Вип. 11, т. 5. - С. 17-25.

114. Гранулювання паливних матеріалів / М. С. Мальований, Р. Я. Бать // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. - 2011. - № 3/8. - С. 9-12.

115. Енергетичний аналіз технологій виробництва твердого біопалива / Снежкін Ю.Ф., Корінчук Д.М., Безгін М.М., Степчук І.В. // Одеська національна академія харчових технологій. Наукові праці, випуск 45, Т.3. - С. 187-190.
116. Оцінка енергоефективності вирощування зернових культур для виробництва біопалива С.В. Ключ, Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013, №3. – С. 12-15
117. Гайдай О.І. “Оцінка життєвого циклу виробництва теплової енергії з твердого біопалива за показниками енергетичної ефективності та скорочення викидів парникових газів”. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.
118. Ashish Manandhar, Ajay Shah. Life cycle assessment of feedstock supply systems for cellulosic biorefineries using corn stover transported in conventional bale and densified pellet formats. *Journal of Cleaner Production*. Volume 166, 10 November 2017, Pages 601-614
119. Lili Zhao, Xunmin Ou, Shiyang Chang. Life-cycle greenhouse gas emission and energy use of bioethanol produced from corn stover in China: Current perspectives and future prospectives. *Energy*, Volume 115, Part 1, 15 November 2016, Pages 303-313.
120. Whitman, Thea & Yanni, Sandra & Whalen, Joann. (2011). Life cycle assessment of corn stover production for cellulosic ethanol in Quebec. *Canadian Journal of Soil Science*. 91. 997-1012. 10.4141/CJSS2011-011.
121. Голуб, Г. А., & Гох, В. В. (2012). Використання жому і меляси в суміші з соломною для виробництва біогазу. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*, (170 (2)), 74-80.
122. Кучерук П.П., Матвєєв Ю.Б., Рудська В.О. Експериментальне дослідження показників виходу біогазу в процесі періодичного метанового бродіння соломи // *Відновл. енергетика*. - 2018. - №2. - С.88-97.
123. Експериментальне дослідження процесу метанового бродіння: Монографія / П.П. Кучерук, Ю.Б. Матвєєв, С.А. Шворов, В.Є. Лукін – К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2019. – 242 с.
124. Фльонц, І. В., Підховна, С. М., Голяш, Н. М. (2014). Попередня обробка екструдованої соломи пшениці розчином Са (ОН)₂ з метою підвищення виходу біогазу. *Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК*, (194).
125. Gabriele Mancini, Stefano Papirio, Piet N. L. Lens, Giovanni Esposito. Increased biogas production from wheat straw by chemical pretreatments / *Renewable Energy*. – V. 119. – April 2018. – P. 608-614

126. Li, Y., Merrettig- Bruns, U., Strauch, S., Kabasci, S., & Chen, H. (2015). Optimization of ammonia pretreatment of wheat straw for biogas production. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 90(1), 130-138.
127. Muhammad Jaffar Memon, Abdul Rehman Memon (2020). Wheat Straw Optimization via its Efficient Pretreatment for Improved Biogas Production. *Civil Engineering Journal*, Vol. 6 (6), p. 1056-1063
128. Shrestha, S., Fonoll, X., Khanal, S. K., & Raskin, L. (2017). Biological strategies for enhanced hydrolysis of lignocellulosic biomass during anaerobic digestion: current status and future perspectives. *Bioresource technology*, 245, 1245-1257.
129. Dahadha, S., Amin, Z., Bazyar Lakeh, A. A., & Elbeshbishy, E. (2017). Evaluation of different pretreatment processes of lignocellulosic biomass for enhanced biomethane production. *Energy & Fuels*, 31(10), 10335-10347.
130. Kong, X., Du, J., Ye, X., Xi, Y., Jin, H., Zhang, M., & Guo, D. (2018). Enhanced methane production from wheat straw with the assistance of lignocellulolytic microbial consortium TC-5. *Bioresource technology*, 263, 33-39.
131. Li, P., He, C., Li, G., Ding, P., Lan, M., Gao, Z., & Jiao, Y. (2020). Biological pretreatment of corn straw for enhancing degradation efficiency and biogas production. *Bioengineered*, 11(1), 251-260.
132. 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.
133. Bakker, R. R. C., Elbersen, H. W., Poppens, R. P., & Lesschen, J. P. (2013). *Rice Straw and Wheat Straw-Potential feedstocks for the Biobased Economy*. NL Agency.
134. Lynd, L.R., Weimer, P.J., van Zyl, W.H. & Pretorius, I.S. (2002). Microbial Cellulose Utilization: Fundamentals and Biotechnology. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 66(3), pp. 506-577.
135. Noike, T., Endo, G., Chang, J.-E., Yaguchi, J.-I. & Matsumoto, J.-I. (1985). Characteristics of carbohydrate degradation and the rate-limiting step in anaerobic digestion. *Biotechnology and Bioengineering*, 27(10), pp. 1482- 1489.
136. Bauer A. et al. Analysis of methane potentials of steam-exploded wheat straw and estimation of energy yields of combined ethanol and methane production. *Journ. Biotech.*; 2009;142. p. 50-55.
137. Dererie, D. Y., et. Al. (2011) Improved bio-energy yields via sequential ethanol fermentation and biogas digestion of steam exploded oat straw, *Bioresource Technology* 102, 4449-4455.

138. Lei, Z., et al. (2010) Methane production from rice straw with acclimated anaerobic sludge: Effect of phosphate supplementation. *Bioresource Technology* 101, 4343-4348.
139. Zhong, W., et al. (2011) Comparison of chemical and biological pretreatment of corn straw for biogas production by anaerobic digestion, *Renewable Energy* 36, 1875-1879.
140. Song, Z., Liu, X., Yan, Z., Yuan, Y., & Liao, Y. (2014). Comparison of seven chemical pretreatments of corn straw for improving methane yield by anaerobic digestion. *PloS one*, 9(4), e93801.
141. Laurinovica, L., Jasko, J., Skripsts, E., & Dubrovskis, V. (2013). Biochemical methane potential of biologically and chemically pretreated sawdust and straw. In *Proceedings of the 12th International Scientific Conference: Engineering for Rural Development* (pp. 468-471).
142. Osama, A. S., Khaled, M. A., & Abir, M. H. (2013). Bioconversion of Some Agricultural Wastes into Animal Feed by *Trichoderma* spp. *Journal of American Science*, 9(6).
143. Vintiloiu, A., Lemmer, A., Oechsner, H., & Jungbluth, T. (2012). Mineral substances and macronutrients in the anaerobic conversion of biomass: an impact evaluation. *Engineering in Life Sciences*, 12(3), 287-294.
144. Oechsner, H.-W.; Lemmer, A.; Hamhold, D.; Mathies, E.; Mayrhuber, E.; Preißler, D. Method for Producing Biogas in Controlled Concentrations of Trace Elements. Patent US20100304457 A1, 2 December 2008.
145. Гелетуха Г., Крамар В., Епiк О., Антошук Т., Тiтков В. Комплексний аналіз українського ринку пелет з біомаси (визначення точок зростання) / Програма розвитку ООН. – Київ, 2016. – 336 с. (Режим електронного доступу: http://uabio.org/img/files/docs/kompleksnii_analiz_ukrayinskogo_rinku_pelet_z_biomasi.pdf).
146. Janke, L., Leite, A., Nikolausz, M., Schmidt, T., Liebetrau, J., Nelles, M., & Stinner, W. (2015). Biogas production from sugarcane waste: Assessment on kinetic challenges for process designing. *International journal of molecular sciences*, 16(9), 20685-20703.
147. R. Crovetto, Evaluation of Solubility Data for the System CO₂-H₂O, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 20, 575, 1991.
148. P. G. T. Fogg and C. L. Young, Eds., IUPAC Solubility Data Series, Vol. 32, Hydrogen Sulfide, Deuterium Sulfide, and Hydrogen Selenide, Pergamon Press, Oxford, England, 1988.
149. H. L. Clever and C. L. Young, Eds., IUPAC Solubility Data Series, Vol. 27/28, Methane, Pergamon Press, Oxford, England, 1987.

150. Biomethane / [Michael Beil, Wiebke Beyrich, Uwe Holzhammer, Thomas Krause]. - Gülzow. : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 2013. - 48 p.
151. Biomethane in Germany - lessons learned / Frank Graf, Felix Ortloff, Thomas Kolb, Conference Paper, 26th World Gas Conference/ 1-5 June 2015, Paris, France. - 23 p.
152. *Skøtt T.* Straw to Energy. Status, technologies and innovation in Denmark 2011. – Tjele: Agro Business Park A/S, 2011, 40 p.
153. The potential of straw for the energy mix has been underestimated. Study: Straw could supply energy to several millions of households in Germany <http://www.ufz.de/index.php?en=32109>
154. *Weiser Ch., Zeller V., Reinicke F.* et al. Integrated assessment of sustainable cereal straw potential and different straw-based energy applications in Germany // *Applied Energy*. – 2014. – V. 114. – P. 749-762.
155. Christou M., Eleftheriadis I., Panoutsou C., Papamichael I., 2007. Current Situation and Future Trends in Biomass Fuel Trade in Europe. Country Report of Greece.
156. Katterer T., Andren O., Persson J., 2004. The impact of altered management on long-term agricultural soil carbon stocks – a Swedish case study. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 70, 179-187.
157. Siemons R., Vis M., van den Berg D., Mc Chesney I., Whiteley M., Nikolaou N. Bioenergy's role in the EU energy market. A view of developments until 2020. Report to the European Commission; 2004.
158. De Noord M., Beurskens L.W.M., De Vries H.J. Potentials and costs for renewable electricity production. A data Overview. ECN-C 03-006; 2004.
159. Monforti F., Bodis K., Scarlat N., Dallemand J.-F. The possible contribution of agricultural crop residues to renewable energy targets in Europe: A spatially explicit study // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, N 19, 2013, p. 666-677.
160. Ericsson K., Nilsson L.J., 2006. Assessment of the potential biomass supply in Europe using a resource focused approach. *Biomass and Bioenergy* 30, 1-15.
161. Nikolaou A., Remrova M., Jeliaskov I., 2003. Lot 5: Bioenergy's Role in the EU Energy Market. *Biomass Availability in Europe*.
162. Panoutsou C., Labalette F., 2006. Cereals straw for bioenergy and competitive uses. In: European Commission (Ed.), *Proceedings of the Cereals Straw Resources for Bioenergy in the European Union*, Pamplona, Pamplona, 18–19 October 2006. Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability.

163. Glassner, D.A., Hettenhaus, J.R., Schechinger, T.M., 1998. Corn stover collection project. In: US Department of Energy Great Lakes Regional Biomass Energy Program (Ed.), Proceedings of BioEnergy'98: Expanding BioEnergy Partnerships. Madison, WI, October 4-8, 1998. Coalition of Great Lakes Governors, Chicago, IL, pp. 1100-1111.

164. Kadam, K.L., McMillan, J.D., 2003. Availability of corn stover as a sustainable feedstock for bioethanol production. *Bioresource Technology* 88, 17-25.

165. United States Department of Agriculture-Natural Resource Conservation Service (USDA-NRCS), 2006. White Paper Crop Residue Removal for Biomass Energy Production: Effects on Soils and Recommendations.

166. Graham, R.L., Nelson, R., Sheehan, J., Perlack, R.D., Wright, L.L., 2007. Current and potential US corn stover supplies. *Agronomy Journal* 99, 1–11.

167. Patterson P.E., Makus L., Momont P., Robertson L., 1995. The Availability, Alternative Uses and Value of Straw in Idaho. Final Report of the Project BDK251, Idaho Wheat Commission, College of Agriculture, University of Idaho.

168. Van der Sluis E., Shane R., Stearns L., 2007. Local Biomass Feedstocks Availability for Fuelling Ethanol Production. *Biofuels, Food and Feed Tradeoffs*, Biofuels, Food and Feed Tradeoffs Conference, April 12–13, 2007, St. Louis, Missouri.

169. Walsh M.E., Perlack R.L., Turhollow A., de la Torre Ugarte D., Becker D.A., Graham R.L., Slinsky S.E., Ray D.E., 2000. Biomass Feedstock Availability in the US: 1999 State Level Analysis. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN.

170. С.М. Кухарець, Г.А. Голуб. Забезпечення енергетичної автономності агроєкосистем на основі виробництва біопалива // Вісник Житомирського національного агроєкологічного університету, 2012, №1 (30), т.1, с.345-352.

171. Голуб Г.А. Проблеми техніко-технологічного забезпечення енергетичної автономності агроєкосистем // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки, 2011, №7, с. 59-66.

172. С.М. Кухарець, Г.А. Голуб. Регулювання використання органічних ресурсів для виробництва біопалива // Сільськогосподарські машини, 2013, випуск 24, с. 187-194.

173. Кухарець С.М. Алгоритм розподілу органічних ресурсів у агроєкосистемах. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки, 2012, №10 т. 1 (58), с. 61-65. <http://repository.vsau.org/card.php?lang=&id=6606>

174. С.М. Кухарець, Г.А. Голуб. Регулювання використання органічних ресурсів для виробництва біопалива // Сільськогосподарські машини, 2013, випуск 24, с. 187-194.

175. Климчук О.В., Скорук О.П. Перспективні напрямки вирощування кукурудзи для використання на енергетичні потреби // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Економічні науки, 2011, № 1 (48), с.67-73 <http://econjournal.vsau.org/files/pdfa/263.pdf>
176. Study on Biomass Trade in Poland. Project 4Biomass, WP 4.2.4.
177. Proceedings of the Workshop: "Cereals straw and agricultural residues for bioenergy in European Union New Member States and Candidate Countries", 2 - 3 October 2007, Novi Sad, Serbia.
178. Калетнік Г.М., Булгаков В.М., Гриник І.В. Науково обґрунтовані та практичні підходи використання соломи та рослинних решток у сільському господарстві // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки, 2011, № 9, с. 62-68. <http://repository.vsau.org/card.php?lang=&id=6387>
179. Ключ С.В. Визначення частки соломи та рослинних відходів для енергетичного використання // Відновлювана енергетика, 2013, №4, с. 82-85.
180. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Трибой А.В. Перспективы использования отходов сельского хозяйства для производства энергии в Украине. Часть 2 // Промышленная теплотехника. – 2014, т. 36, № 5, с.73-80.
181. *Юрій Кривда*. Стан родючості ґрунтів України. Презентація на міжнародному семінарі «Агровідходи для біоенергетики. Проблеми та рішення», 27.09.2018, Київ. <http://www.uabio.org/img/files/Events/pdf/2-yuri-kryvda-workshop-agro-residues-27092018-small.pdf>
182. *Ян Петер Лешен*. Вплив використання аграрних залишків для біоенергетики на ґрунтовий вуглець та можливі рішення. Презентація на міжнародному семінарі «Агровідходи для біоенергетики. Проблеми та рішення», 27.09.2018, Київ <http://www.uabio.org/img/files/Events/pdf/5-jan-peter-lesschen-workshop-agro-residues-27092018.pdf>
183. *Ніколя Скарлат*. Просторово-деталізована оцінка сталого потенціалу рослинних решток в Європі. Презентація на міжнародному семінарі «Агровідходи для біоенергетики. Проблеми та рішення», 27.09.2018, Київ <http://www.uabio.org/img/files/Events/pdf/4-nicolae-scarlat-workshop-agro-residues-27092018.pdf>
184. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
185. Bioenergy Europe Statistical Report on Biomass Supply <https://bioenergyeurope.org/article/178-biomass-supply-report.html>
186. <http://www.vin.gov.ua/dep-zhkh/enerhoefektyvnist/424-oblasni-prohramy-z-enerhozberezhennia/15535-karta-potentsialu-biomasy-u-vinnytskii-oblasti-stanom-na-21122018>

187. https://stud.com.ua/18661/menedzhment/strategichne_planuvannya
188. <https://www.productplan.com/roadmap-basics/>
189. <https://www.officetimeline.com/roadmaps>
190. Рішення Ради національної безпеки і оборони України від 2 грудня 2019 р. Введено в дію Указом Президента України від 2 грудня 2019 р. № 874/2019 <https://www.president.gov.ua/documents/8742019-30769>
191. <https://menr.gov.ua/news/34424.html>
192. 2018 р. – дані Енергетичного балансу України за 2018 рік (Державна служба статистики України).
193. 2018 рік – дані Держенергоефективності
194. Lithuania's National Energy Independence Strategy http://enmin.lrv.lt/uploads/enmin/documents/files/National_energy_independence_strategy_2018.pdf
195. ABOUT DH SECTOR <https://lsta.lt/en/about-dh-sector/>
196. Обґрунтування наведено в Аналітичній Записці UABIO № 19 (2018) «Можливості заготівлі деревного палива в лісах України».
197. Олександр Домбровський, Георгій Гелетука. Як зробити тепло "зеленим". Економічна правда, 15 квітня 2020 р. <https://www.epravda.com.ua/columns/2020/03/5/657679/>
198. Кукурудза. Вирощування, збирання, консервування і використання / Під загальною редакцією Д. Шпаара. – К.: Альфа-стевія ЛТД – 2009. – 396 с.
199. Аналітична записка БАУ № 16 «Можливості заготівлі побічної продукції кукурудзи на зерно для енергетичного використання в Україні»
200. World Agricultural Production, USDA Reports <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>
201. <http://agriculture.by/articles/rastenievodstvo/urozhajnost-kukuruzy-budet-rasti.-pochemu>
202. <https://www.ocj.com/2019/12/2019-national-corn-yield-contest-hits-new-yield-record/>
203. Рослинництво України 2018. Статистичний збірник ДССУ, 2019 <http://www.ukrstat.gov.ua/>
204. L. Kocsis, Z. Hudoba and T. Vojtela. Investigation of the corn stalk gathering for energetic use www.tankonyvtar.hu/.../publikacio_67.pdf
205. Згідно даних Відділення рослинництва Національної академії аграрних наук України, отриманих листом № 5-2/256 від 16.11.2012.
206. Аналітична записка БАУ №7. <http://www.uabio.org/img/files/docs/position-paper-uabio-7-ua.pdf>

207. *Brittany Schon, Matt Darr. Corn Stover Ash.*
<https://store.extension.iastate.edu/Product/Corn-Stover-Ash>
208. Phyllis database containing information on the composition of biomass and waste <https://phyllis.nl/>
209. Інтенсифікація технологій вирощування кукурудзи на зерно – гарантія стабілізації урожайності на рівні 90-100 ц/га (практичні рекомендації) / Черенков А.В., Циков В.С., Дзюбецький Б.В., Шевченко М.С. та ін. // Дніпропетровськ: ДУ Інститут сільського господарства степової зони НААН України, 2012. – 31 с.
210. 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.
211. 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
212. Monika Fleschhut, Kurt-Jurgen Hulsbergen, Stefan Thurner, Joachim Eder Analysis of different corn stover harvest systems / LANDTECHNIK, 71 (6), 2016. – 252-270 p.
213. <https://www.becoolproject.eu/2018/10/22/recovering-maize-cob-converting-untapped-biomass-resource-into-valuable-feedstock/>
214. <http://www.etaflorence.it/proceedings/?detail=15215>
215. https://www.vermeer.com/NA/en/N/equipment/cob_harvester
216. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC
217. Гайдай О.І. “Оцінка життєвого циклу виробництва теплової енергії з твердого біопалива за показниками енергетичної ефективності та скорочення викидів парникових газів”. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.
218. International Organization for Standardization. (1997). *Environmental Management: Life Cycle Assessment: Principles and Framework* (Vol. 14040). ISO.
219. Nussbaumer, T., Oser, M. Evaluation of biomass combustion based energy systems by cumulative energy demand and energy yield coefficient. (2004). Report for International Energy Agency and Swiss Federal Office of Energy.
220. Дослідження енергоємності транспортної операції. Ільченко В.Ю., Деркач О.Д., Колбасін В.О. Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету. Екологія, рослинництво, землеробство. : науково-теоретичний, науково-практичний журнал. - 2008. - N2. - С. 63 – 69.

221. http://saee.gov.ua/sites/default/files/%D0%A1%D0%BB%D0%B0%D0%B9%D0%B4%20%D0%92%D0%94%D0%95%202019_0.jpg
222. <http://uare.com.ua/novyny/642-pririst-virobnitstva-elektrichnoji-energiji-z-vidnovlyuvanikh-dzherel.html>
223. <https://ua.energy/wp-content/uploads/2017/10/Zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-dostatnosti-generuyuchyh-potuzhnostej.pdf>
224. <https://ua.energy/wp-content/uploads/2019/10/Zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-vid-31.10.19.pdf>
225. <https://ua.energy/osnovni-podiyi/ukrenergo-proponuye-plan-s-rozvytku-vde/>
226. ЗУ Про теплопостачання, Стаття 13, 20
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2633-15>
227. <http://saee.gov.ua/uk/news/3347>
228. Кнорре Г.Ф. Топочные процессы. Госэнергоиздат, М. - Л. – 1951 – 326с.
229. Кнорре Г.Ф. Курс топочных процессов. Ч.II. основные приборы и механизмы топочных устройств. – М. – Л., ОНТИ, 1937.
230. Татищев С.В. Топочные устройства промышленных котельных. – М. – Л., Госэнергоиздат, 1956. – 352 с.
231. Reka Kedler/ Maskinfabrikken REKA A/S. Product catalog. -1996. – 30р.
232. Макаров А.С., Литвиненко Н.Н. Топочное устройство для сжигания высоковлажных древесных отходов. – Промышленная энергетика. –1988, № 9. – С. 20-22
233. Трембовля В.И., Фигнер Е.Д., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 416 с.
234. Янкелевич В.И. Наладка газомазутных промышленных котельных. — М.: Энергоатомиздат, 1998 — 216 с., ил.
235. Межгосударственный стандарт ГОСТ 30735—2001 Котлы отопительные водогрейные теплопроизводительностью от 0,1 до 4,0 МВт. Общие технические условия. — М.: Издательство стандартов, 2001. — 16 с.
236. Отраслевой стандарт ОСТ 21—39—82 Котлы отопительные водогрейные мощностью до 85 кВт. Методы государственных испытаний. Определение теплотехнических показателей. — М.: Министерство промышленности строительных материалов СССР, 1982. — 43 с.
237. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). Под ред. Н. В. Кузнецова – М.: Энергия, 1973. – 296 с.

238. Межгосударственный стандарт ГОСТ 2408.1—95 (ИСО 625—75) Топливо твердое. Методы определения углерода и водовода. — М.: Издательство стандартов, 1995. — 27 с.
239. Межгосударственный стандарт ГОСТ 30735-2001. Котлы отопительные водогрейные теплопроизводительностью от 0,10 до 4,0 МВт. Общие технические условия. Меж-государственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, Минск. М.: Издательство стандартов.2002. 19 с.
240. ГОСТ 11305-83 "Торф. Методы определения влаги"
241. ГОСТ 11306-83 "Торф и продукты его переработки. Методы определения зольности"
242. ОСТ 21-39-82 Котлы отопительные водогрейные мощностью до 85 кВт. Методы государственных испытаний. Определение теплотехнических показателей. Министерство промышленности строительных материалов СССР, 1982. — 43с.
243. Експериментальне дослідження процесу метанового бродіння: Монографія / П.П. Кучерук, Ю.Б. Матвеев, С.А. Шворов, В. Є. Лукін — К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2019. — 250 с. (ISBN 978-966-929-374-9)
244. Кучерук П.П. Дисертація на здобуття наукового ступеня к.т.н. «Підвищення ефективності виробництва біогазу шляхом сумісного метанового бродіння гнойових відходів та силосу кукурудзи», ІТТФ НАНУ, 2016 р.
245. <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/ID/ID-417-W.pdf>
246. <https://store.extension.iastate.edu/product/14077>
247. <http://zavod-kobzarenko.derevo.ua/catalog/details/6019>
248. <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0313-07>
249. https://www.youtube.com/watch?v=twM_nmZ7esg&t=4s
250. Novakovits, P & Doczekal, C (2016) “Biomethane tool for economic analysis of biogas production, gas upgrading and utilization of biomethane”
251. Результаты мониторингу функціонування ринку природного газу за I квартал 2019 р. / НКРЕКП, 2019
252. <http://ukravtogaz.com/perevagi-metanu>
253. <https://ibbk-biogas.com/cng-mobility-challenges-and-opportunities-for-biomethane/>
254. Biomethane in transport /EBA, 2016
255. <http://cng europe.com/>
256. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/902-2014-%D1%80>
257. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80>

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Біологічні ресурси і технології виробництва біопалива: Монографія / Я.Б.Блюм, Г.Г.Гелетука, І.П.Григорюк, К.В. Дмитрук, В.О.Дубровін, А.І.Ємець, Г.М.Забарний, Г.М.Калетнік, М.Д.Мельничук, В.Г.Мироненко, Д.Б.Рахметов, А.А. Сибірний, С.П.Циганков Київ: «Аграр Медіа Груп», 2010. 408 с.
2. Новітні технології біоенергоконверсії: Монографія / Я.Б.Блюм, Г.Г.Гелетука, І.П.Григорюк, В.О.Дубровін, А.І.Ємець, Г.М.Забарний, Г.М.Калетнік, М.Д.Мельничук, В.Г.Мироненко, Д.Б.Рахметов, С.П.Циганков. Київ: «Аграр Медіа Груп», 2010. 326 с.
3. G. Geletukha, C. Khawaja, R. Janssen, D. Rutz and others. Promoting sustainable use of underutilized lands for bioenergy production through a web-based platform for Europe // Proceedings of 27th European Biomass Conference and Exhibition, 27-30 May 2019, Lisbon, Portugal. p. 1921 – 1924, DOI: 10.5071/27thEUBCE2019-ICO.12.3. ISSN 2282-5819. Індексується у Scopus.
4. Geletukha G., Mergner R., Janssen R, Rutz D. and others. Fostering sustainable feedstock production for advanced biofuels on underutilized land in Europe // Proceedings of 25th European Biomass Conference and Exhibition, 12-15 June 2017, Stockholm, Sweden, p. 125-130. DOI: 10.5071/25thEUBCE2017-1CO.5.5. ISSN 2282-5819. Індекс. у Scopus.
5. Slenkin M., Geletukha G. Development of ecologically friendly technology for gasification of municipal solid wastes // In: Sheffield J.W., Sheffield Ç. (eds) Assessment of Hydrogen Energy for Sustainable Development. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht, 2007. p. 243-247. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6442-5_20 Індексується у Scopus.
6. Geletukha G.G., Martsenyuk Z.A. Energy potential of biomass in Ukraine // Heat Transfer Research: Volume 29 № 6 (1998), с 433-437 (ISSN: 1064-2285) DOI: [10.1615/heattransres.v29.i6-8.100](https://doi.org/10.1615/heattransres.v29.i6-8.100) Індексується у Scopus.
7. Aznar M.R., Borisov I.I., Geletukha G.G., Corella J., Khalatov A.A. and others. Producer gas cleaning from tars in a vortex bubbling device // Heat Transfer Research: Volume 30 № 1 (1999), с 50-58 (ISSN: 1064-2285). Індексується у Scopus.
8. Khalatov A.A., Kovalenko G.V., Geletuha G.G. Water boiling at tubular surfaces formed by cavities // Heat Transfer Research: Volume 29 № 1 (1998), с 8-13 (ISSN: 1064-2285). Індексується у Scopus.

<http://www.dl.begellhouse.com/references/46784ef93dddff27,2906653112975831,159ff3ec19ab21f1.html>

9. Khalatov A.A., Kovalenko G.V., Geletuha G.G. Heat transfer from a horizontal cylinder with cavities under water pool boiling conditions // Heat Transfer Research: Volume 29 № 4 (1998), с 275-280 (ISSN: 1064-2285). Індексуються у Scopus. <http://www.dl.begellhouse.com/journals/46784ef93dddff27,27da601e47fce063,06ca642404b5a9c9.html>

10. Borisov I.I., Khalatov A.A., Geletukha G.G., Kobzar' S.G., Shevtsov S.V. Heat exchange during cooling the producer gas in vortex bubbling unit // Xinxing Jianzhu Cailiao// New Building Materials, January 1998. Індексуються у Scopus.

11. Гелету́ха Г.Г. Аналіз концепції зеленого енергетичного переходу України до 2050 р. // Біоенергетика: 2020, № 1 (15), с. 38-39.

12. Гелету́ха Г.Г., Железна Т.А., Драгнєв С.В., Баштовий А.І. Потенціал та перспективи енергетичного використання агробіомаси в Україні. // Теплофізика та Теплоенергетика: Том 42 № 1 (2020), с. 42-51. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2020.5>

13. Гелету́ха Г.Г., Железна Т.А., Баштовий А.І. Дорожня карта розвитку біоенергетики України до 2050 року // Теплофізика та теплоенергетика, 2020. – Т. 42, №2. – С. 60-67. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2020.6>

14. Гелету́ха Г.Г. Аналіз виробництва пелет та брикетів з побічної продукції кукурудзи на зерно в Україні. // Теплофізика та теплоенергетика, 2020. – Т. 42, №2. – С. 83-91. <http://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/399>

15. Гелету́ха Г.Г. Застосування ТЕЦ на біомасі для балансування енергосистеми України. // Теплофізика та теплоенергетика, 2020. – Т. 42, №3. – С. 47-55. <http://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/405>

16. Гелету́ха Г.Г., Железна Т.А., Драгнєв С.В., Баштовий А.І. Аналіз можливостей виробництва і споживання паливних брикетів з біомаси сільськогосподарського походження в Україні. Частина 2. // Теплофізика та Теплоенергетика: Том 41 № 1 (2019), с. 67-73. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2019.9>

17. Гелету́ха Г.Г., Железна Т.А., Драгнєв С.В., Баштовий А.І. Аналіз бар'єрів для виробництва енергії з агробіомаси в Україні. Частина 1. // Теплофізика та Теплоенергетика: Том 41 № 3 (2019), с. 77-84. <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2019.11>

18. Гелету́ха Г.Г., Железна Т.А., Драгнєв С.В., Баштовий А.І. Аналіз бар'єрів для виробництва енергії з агробіомаси в Україні. Частина 2 // Теплофізика та теплоенергетика. 2019, т. 41, № 4, с. 44-50. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2019.6>

19. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Драгне́в С.В., Башто́вий А.І. Аналіз можливостей заготівлі деревного палива в лісах України // Промислова теплотехніка. 2018, т. 40, № 1, с. 61-67. <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2018.09>
20. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Драгне́в С.В., Башто́вий А.І. Перспективи використання біомаси від обрізки та видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень для виробництва енергії в Україні // Промислова теплотехніка. 2018, т. 40, № 1, с. 68-74. <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2018.10>
21. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Башто́вий А.І., Гелету́ха Г.І. Проблеми та перспективи розвитку біоенергетики в Україні // Промислова теплотехніка. 2018, т. 40, № 2, с. 41-48. <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2018.06>
22. Г.Г. Гелету́ха, Т.А. Желе́зна, С.В. Драгне́в, А.І. Башто́вий, І.Л. Роговський. Обґрунтування типових проектів виробництва і споживання паливних брикетів з агробіомаси в Україні // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка і енергетика АПК. 2018, вип. 282, с. 173-181. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2018_282_16
23. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Драгне́в С.В., Башто́вий А.І. Аналіз можливостей виробництва і споживання паливних брикетів з біомаси сільськогосподарського походження в Україні. Частина 1. // Промислова теплотехніка. 2018, т. 40, № 4, с. 62-68 <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.09>
24. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Башто́вий А.І. Енергетичний та екологічний аналіз технологій виробництва електроенергії з твердої біомаси. Частина 1 // Промислова теплотехніка. 2017, т. 39, № 1, с. 58-64. <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2017.09>
25. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А. Стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні // Промислова теплотехніка. 2017, т. 39, № 2, с. 60-64. <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2017.09>
26. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Башто́вий А.І. Енергетичний та екологічний аналіз технологій виробництва електроенергії з твердої біомаси. Частина 2 // Промислова теплотехніка. 2017, т. 39, № 3, с. 73-77. <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2017.11>
27. Драгне́в С.В., Желе́зна Т. А., Гелету́ха Г. Г. Можливості заготівлі побічної продукції кукурудзи на зерно для енергетичного використання в Україні. Частина 1 // Біоенергетика/Bioenergy. 2016, №1 (7). с. 18-22.
28. Драгне́в С.В., Желе́зна Т. А., Гелету́ха Г. Г. Можливості заготівлі побічної продукції кукурудзи на зерно для енергетичного використання в Україні. Частина 2 // Біоенергетика/Bioenergy. – 2016, №2 (8). с. 16-20.

29. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Башто́вий А.І. Аналіз енергетичних стратегій країн ЄС та світу і ролі в них відновлюваних джерел енергії. Частина 1 // Промислова теплотехніка. 2016, т. 38, № 2, с. 56-64. <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2016.07>

30. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Башто́вий А.І. Аналіз енергетичних стратегій країн ЄС та світу і ролі в них відновлюваних джерел енергії. Частина 2 // Промислова теплотехніка. 2016, т. 38, № 3, с. 57-66. <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2016.08>

31. Желе́зна Т.А., Башто́вий А.І., Гелету́ха Г.Г. Аналіз можливості отримання деревного палива з додаткових джерел в Україні // Промислова теплотехніка. 2016, т. 38, № 4, с. 71-77. <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2016.08>

32. Гелету́ха Г.Г., Желе́зная Т.А., Дроздова О.И. Энергетический и экологический анализ технологий производства энергии из биомассы. Часть 2 // Промышленная теплотехника. 2015, т. 37, № 1, с. 53-62. <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2015.07>

33. Гелету́ха Г.Г., Желе́зная Т.А., Кучерук П.П., Олейник Е.Н., Трибой А.В. Биоэнергетика в Украине: современное состояние и перспективы развития. Часть 1 // Промышленная теплотехника. 2015, т. 37, № 2, с. 68-76. <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2015.08>

34. Гелету́ха Г.Г., Желе́зная Т.А., Кучерук П.П., Олейник Е.Н., Трибой А.В. Биоэнергетика в Украине: современное состояние и перспективы развития. Часть 2 // Промышленная теплотехника. 2015, т. 37, № 3, с. 65-73. <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2015.08>

35. Гелету́ха Г.Г., Желе́зная Т.А., Трибой А.В. Перспективы выращивания и использования энергетических культур в Украине. Часть 1. // Промышленная теплотехника. 2015, т. 37, № 4, с. 53-60. <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2015.06>

36. Гелету́ха Г.Г., Желе́зная Т.А., Трибой А.В. Перспективы выращивания и использования энергетических культур в Украине. Часть 2. // Промышленная теплотехника. 2015, т. 37, № 5, с. 58-67. <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2015.07>

37. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А. Біоенергетика в Україні: стан розвитку, бар'єри та шляхи подолання // Біоенергетика. 2014, № 1 (3), с. 16-19.

38. Гелету́ха Г.Г., Крамар В.Г. Методика попередньої техніко-економічної оцінки та вибору парових турбін для проектів ТЕЦ на біомасі в комунальному теплопостачанні. Частина 1 // Промислова теплотехніка 2014. т. 36, №1. с. 66-73.

39. Гелету́ха Г.Г., Крамар В.Г. Методика попередньої техніко-економічної оцінки та вибору парових турбін для проектів ТЕЦ на біомасі в комунальному

теплопостачанні. Частина 2 // Промислова теплотехніка 2014. т. 36, №2. с. 78-85.

40. Гелету́ха Г.Г., Железная Т.А., Трибой А.В. Перспективы использования отходов сельского хозяйства для производства энергии в Украине. Часть 1 // Промышленная теплотехника. 2014, т. 36, № 4, с.36-42.

41. Гелету́ха Г.Г., Железная Т.А., Трибой А.В. Перспективы использования отходов сельского хозяйства для производства энергии в Украине. Часть 2 // Промышленная теплотехника. 2014, т. 36, № 5, с.73-80.

42. Гелету́ха Г.Г., Железная Т.А., Дроздова О.И. Энергетический и экологический анализ технологий производства энергии из биомассы. Часть 1 // Промышленная теплотехника. 2014, т. 36, № 6, с.78-88.

43. Гелету́ха Г.Г., Железная Т.А. Место биоэнергетики в проекте обновленной Энергетической стратегии Украины до 2030 года // Промышленная теплотехника. 2013, т. 35, № 2, с.64-70.

44. Гелету́ха Г.Г., Железна Т.А., Дроздова О.І. Комплексний аналіз технологій виробництва енергії з твердої біомаси в Україні. Частина 1. Солома // Промислова теплотехніка. 2013, т. 35, № 3, с.56-63. <https://uabio.org/wp-content/uploads/2013/06/complex-analysis-article-zheliezna.pdf>

45. Гелету́ха Г.Г., Железна Т.А., Дроздова О.І. Комплексний аналіз технологій виробництва енергії з твердої біомаси в Україні. Частина 2. Деревина // Промислова теплотехніка. 2013, т. 35, № 4, с.56-62.

46. Гелету́ха Г.Г., Железная Т.А. Барьеры для развития биоэнергетики в Украине. Часть 1 // Промышленная теплотехника. 2013, т. 35, № 4, с.63-71.

47. Гелету́ха Г.Г., Железная Т.А. Барьеры для развития биоэнергетики в Украине. Часть 2 // Промышленная теплотехника. 2013, т. 35, № 5, с.43-47.

48. Гелету́ха Г.Г., Железная Т.А., Олейник Е.Н. Перспективы производства тепловой энергии из биомассы в Украине // Промышленная теплотехника. 2013, т. 35, № 5, с.48-57.

49. Гелету́ха Г.Г., Железная Т.А., Олейник Е.Н., Гелету́ха А.И. Перспективы производства электрической энергии из биомассы в Украине // Промышленная теплотехника 2013, т. 35, № 6, с.67-75.

50. Гелету́ха Г.Г., Кучерук П.П., Матвеев Ю.Б., Куцый Д.В., Гелету́ха А.И. Перспективы производства и использования биогаза в Украине // Промышленная теплотехника 2013, т. 35, № 6, с.76-82.

51. Гелету́ха Г.Г., Железна Т.А., Дроздова О.І. Комплексний аналіз технологій виробництва енергії з біомаси // Промышленная теплотехника. 2012, т. 34, №1, с.87-95. <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/59059/11-Geletukha.pdf?sequence=1>

52. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Дроздова О.І. Аналіз механізмів стимулювання виробництва теплової енергії з біомаси в Європейському союзі // Промышленная теплотехника. 2012, т. 34, №3.- С. 67-72.

53. Гелету́ха Г.Г., Матвеев Ю.Б., Кучерук П.П., Хо́даковская Т.В., Гелету́ха А.И. Аналіз необхідності применения в Україні «зеленого» тарифа на електроенергію, вироблювану з біогазу // Промышленная теплотехника. 2012, Т.34, №4, - С.67-74.

54. Гелету́ха Г.Г., Желе́зная Т.А., Дроздова О.И. Возобновляемые источники энергии в Украине: стимулы и барьеры // Промышленная теплотехника. 2012, т. 34, №5. С. 58-63.

55. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Жовмір М.М., Матвеев Ю.Б., Дроздова О.І. Оцінка енергетичного потенціалу біомаси в Україні. Частина 2. Енергетичні культури, рідкі біопалива, біогаз // Промислова теплотехніка. 2011, т. 33, № 1, с.57-64. <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/60302/09-GeletukhaNEW.pdf?sequence=1>

56. Кучерук П.П., Матвеев Ю.Б., Хо́даківська Т.В., Гелету́ха Г.Г. Дослідження ефективності сумісного зброджування гною свиней та силосу кукурудзи // Механізація, екологізація і конвертація біосировини в тваринництві. 2011, №1(8) с. 92-100.

57. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Дроздова О.І. Аналіз механізмів стимулювання розвитку «зеленої» електроенергетики в Європейському Союзі // Промислова теплотехніка. 2011, т. 33, № 5, с.35-41.

58. Гелету́ха Г.Г., Жовмір М.М., Олійник Є.М., Радченко С.В. Біомаса як паливна сировина // Промышленная теплотехника. 2011-, т. 33, №5. с. 76-84. <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/60379/11-GeletukhaNEW.pdf?sequence=1>

59. Гелету́ха Г.Г. Желе́зна Т.А. Сучасний стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні. Частина 2 // Промышленная теплотехника. 2010. Т. 32, № 4. с. 94-100. <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/60593/12-Geletukha.pdf?sequence=1>

60. Гелету́ха Г.Г., Жовмір М.М., Олійник Є.М., Радченко С.В. Особливості теплотехнічних випробувань водогрійних котлів з періодичним спалюванням цілих тюків соломи // Промышленная теплотехника. 2010, т. 32, №6. с. 45-51. <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/60620/07-Geletukha.pdf?sequence=1>

61. Г.Г. Гелету́ха, Т.А. Желе́зна, М.М. Жовмір, Ю.Б. Матвеев, О.І. Дроздова. Оцінка енергетичного потенціалу біомаси в Україні. Частина 1. Відходи сільського господарства та деревна біомаса // Промышленная теплотехника.

2010. Т. 32, № 6. с. 58-65.

<http://dspace.nbuu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/60622/09-GeletukhaNEW.pdf?sequence=1>

62. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Матве́ев Ю.Б., Жовмі́р М.М. Використання місцевих видів палива для виробництва енергії в Україні // Промышленная теплотехника. 2006, т. 28, № 2, с. 85-93.

<http://dspace.nbuu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/61394/12-Geletukha.pdf?sequence=1>

63. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Жовмі́р М.М. Виробництво енергії з місцевих видів палива в Україні // Науковий вісник Національного аграрного університету. 2006, вип. 95. с. 118-127.

64. Гелету́ха Г.Г., Желе́зная Т.А., Жовмир Н.М., Матвеев Ю.Б. Современное состояние и перспективы развития биоэнергетики в Украине // Промышленная теплотехника. 2005, т. 27, № 1, с. 78-85.

65. Гелету́ха Г.Г., Желе́зная Т.А., Тишаев С.В., Кобзарь С.Г. Развитие биоэнергетических технологий в Украине // Экотехнологии и ресурсосбережение. 2002. № 3, с. 3-11.

Наукові праці, які засвідчують апробацію результатів дисертації:

66. Geletukha G., Zheliezna T. Bioenergy in Ukraine: State of the art and prospects for the development // Proceedings of 18th European Biomass Conference and Exhibition, 3-7 May 2010, Lyon, France. – P. 2106-2108. URL: https://euea-energyagency.org/wp-content/uploads/2012/08/OC12_4_Geletukha_Paper_18_BM_Conf_Lyon_2010a.pdf

67. Geletukha G., Edward Smeets, APC Faaijs and others. A Review and Harmonization of Biomass Resources Assessments // Proceedings of 17th European Biomass Conference & Exhibition “From Research to Industry and Markets”, Hamburg, Germany, 29 June-03 July 2009, P. 364-374.

68. Geletukha, G., Zheleyezna, T., Matveev, Y., Zhovmir, M. Analysis of the Present State and Prospects for Bioenergy Development in Ukraine // Proceedings of 16th European Biomass Conference and Exhibition «From Research to Industry and Markets», 2-6 June 2008, Valencia, Spain, p. 2570-2573.

69. G.Geletukha, P.Kucheruk, Yu.Matveev. Status and prospects of biogas energy use in Ukraine // Proceedings of the International Conference “Progress in Biogas. Biogas production from agricultural biomass and organic residues”, 18-21 September 2007, Stuttgart, Germany, p.29-34. URL: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21085528>

70. T. Zhelyezna, G. Geletukha, O. Morozova. Production of Liquid Biofuels in Ukraine: Present Status and Prospects // Proceedings of 15th European Biomass conference. 7-11 May 2007, Berlin, Germany, p. 2628-2630.

71. Sergii Chaplygin, Mykola Zhovmir, Georgiy Geletukha, Yevgen Oliynik. Experimental investigation of baled straw burning // Book of proceedings 3rd International Bioenergy Conference and Exhibition BIOENERGY 2007, 3-7 September 2007, Jyvaskyla, Finland, p. 535-539.

72. M. Zhovmir, G. Geletukha, S. Chaplygin, Ye. Oliynik. Energy Efficiency and Pollutants Emission at Whole Straw Bales Combustion // Proceedings of 15th European Biomass Conference and Exhibition From Research to Market Deployment, 7-11 May 2007, Berlin, Germany, p. 2433-2435.

73. Geletukha G., Zhelyezna T., Matveev Yu., Zhovmir N. Bioenergy Development in Ukraine: Present Status, Perspectives and New Possibilities in Frame of Kyoto Protocol Mechanisms // Труды 14-й Европейской конференции «Биомасса для производства энергии, промышленности и защиты климата», 17-21 октября, 2005 г, Париж, Франция, с. 1518-1521.

74. Гелетука Г.Г. Использование промышленных, лесных и сельскохозяйственных отходов для получения энергии в Украине // Труды 2-й МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «СОТРУДНИЧЕСТВО ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ОТХОДОВ», 9-10 февраля 2005 г., Харьков, Украина, с.332-336.

75. Гелетука Г.Г., Матвеев Ю.Б. Системы сбора и утилизации биогаза на полигонах твердых бытовых отходов в Украине: опыт и перспективы // Труды 2-й МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «СОТРУДНИЧЕСТВО ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ОТХОДОВ», 9-10 февраля 2005 г., Харьков, Украина, с.257-260.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

76. Когенерационные системы с тепловыми двигателями: Справочное пособие в 3-х частях. Часть 3: Инновационные технологии для когенерации / Клименко В.Н., Мазур А.И., Письменный Е.Н., Багрий П.И., Гелетука Г.Г. Київ: ИПЦ АЛКОН НАН України, 2016. 528 с.

77. Биоэнергетика в Украине: текущее состояние и перспективы развития: монография / Гелетука Г.Г., Железная Т.А, Олейник Е.Н.. Lambert Academic Publishing, 2014. 88 с.

78. Енергетичний потенціал біомаси в Україні / уклад.: Лакида П.І., Гелетука Г.Г., Василишин Р.Д., Железна Т.А., та ін., відповід. наук. ред.: д.с.-г.н., проф. П.І. Лакида. Київ: Видавничий центр НУБіП України, 2011. 28 с.

79. Комунальна теплоенергетика України: стан, проблеми, шляхи модернізації: колективна монографія у 2-х томах/ кол. авторів за заг. ред.

А.А. Долінського, Б.І Баска, Є.Т. Базєєва, І.А. Піроженко. Київ: ТОВ «Поліграф-Сервіс», 2007. Гелетуша Г.Г. Заходи щодо заміщення природного газу біомасою. том 2, с. 418-431.

80. Енергоефективність та енергозбереження: економічний, техніко-технологічний та екологічний аспекти: колективна монографія / кол. авторів за заг. ред. П. М. Макаренка, О. В. Калініченка, В. І. Аранчій. Полтавська державна аграрна академія, Опольський університет (Польща). Полтава: ПП «Астрия», 2019. 603 с. Гелетуша Г.Г., Олійник Є.М., Зубенко В.І. Роль біомаси для досягнення глобальних та національних цілей зі зниження викидів парникових газів, с. 457-462. Гелетуша Г.Г., Антоненко В.О., Радченко С.В. Забезпечення екологічних вимог при виробництві енергії з біомаси, с 463-468. Гелетуша Г.Г., Олійник Є.М., Зубенко В.І. Енергетичні властивості біомаси та економічна ефективність виробництва теплової енергії, с 469-474.

81. Проведення комплексного дослідження ринку котлів, що працюють на біомасі в Україні / Г.Гелетуша, Є.Олійник, В.Антоненко, С.Чаплигін, В.Зубенко, С.Радченко. Програма розвитку ООН. Київ, 2016. 212 с.

82. Комплексний аналіз українського ринку пелет з біомаси / Г.Гелетуша, В.Крамар, О.Епік, Т.Антощук, В.Тітков. Програма розвитку ООН. Київ, 2016. 334 с.

83. Підготовка та впровадження проектів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні: практи. посіб. / Олійник Є., Антоненко В., Чаплигін С., Зубенко В., Железна Т., Гайдай О., Крамар В., Епік О. за ред. Г. Гелетуши. Київ.: Поліграф плюс, 2015. 72 с.

84. Практичний посібник з використання біомаси у муніципальному секторі України (для представників агропромислового комплексу) / Г.Гелетуша, С.Драгнєв, П.Кучерук, Ю.Матвєєв. Програма розвитку ООН. Київ, 2017. 70 с.

85. Практичний посібник з використання біомаси у муніципальному секторі України (для представників державних установ та громадських організацій, що працюють в сфері екології) / Г.Гелетуша, Ю.Матвєєв, Є.Олійник, Д.Куций. Програма розвитку ООН. Київ, 2017. 54 с.

86. Развитие биогазовых технологий в Украине и Германии: нормативно-правовое поле, состояние и перспективы / Г.Г. Гелетуша, П. Кучерук, Ю. Матвеев, Д. Науменко, А Станев, Л. Матиюк. Киев-Гюльцов FNR, 2013. 72 с.

87. Організаційно-економічні механізми модернізації теплоенергетики України: тематичний збірник матеріалів / заг. ред. чл.-кор. НАНУ Б.І. Баска. Київ: Калита, 2015. Гелетуша Г.Г., Железна Т.А., Драгнєв С.В. Ефективність застосування поточних організаційних заходів виконавчої влади з

енергоефективності, енергозбереження та зменшення споживання природного газу. с. 179-187.

88. Гелету́ха Г.Г., Желізна Т.А., Баштовий А.І. Проблеми та перспективи розвитку когенерації в Україні. // Теплофізика та теплоенергетика: Том 41 № 1 (2019), с. 59-66. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2019.8>

89. Гелету́ха Г.Г., Желізна Т.А., Баштовий А.І. Проблеми та перспективи довгострокового планування у секторі теплопостачання України. // Теплофізика та Теплоенергетика: Том 41 № 2 (2019), с. 72-77. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2019.10>

90. Установка для швидкого піролізу біомаси: пат. [на винахід](#) Україна № 116598; заявл. 20.12.2016; опубл. 10.04.2018, бюл. № 7. Гелету́ха Г.Г.; Зубенко В.І.; Антощук Т.О.; Епiк О.В.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на профільних наукових конференціях:

1. Міжнародні конференції «Проблеми промислової теплотехніки» та «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» 2003-2019 рр., Київ, Україна;
2. Міжнародна конференція «Енергія з біомаси» 2004-2019 рр., Київ, Україна;
3. XIV Європейська конференція «Біомаса для виробництва енергії, промисловості та захисту клімату», 17-21 жовтня, 2005 р, Париж, Франція;
4. II Міжнародна конференція "Співробітництво для вирішення проблеми відходів", 9-10 лютого 2005 р., Харків, Україна;
5. 3rd International Bioenergy Conference and Exhibition Bioenergy 2007, 3-7 September 2007, Jyvaskyla, Finland;
6. 15th European Biomass Conference and Exhibition From Research to Market Deployment, 7-11 May 2007, Berlin, Germany;
7. International Conference "Progress in Biogas – Biogas production from agricultural biomass and organic residues", 18-21 September 2007, Stuttgart, Germany;
8. 16th European Biomass Conference and Exhibition From Research to Industry and Markets, 2-6 June 2008, Valencia, Spain;
9. 17th European Biomass Conference & Exhibition "From Research to Industry and Markets", 29 June-03 July 2009 Hamburg, Germany;
10. 18th European Biomass Conference and Exhibition, 3-7 May 2010, Lyon, France;
11. Наукова конференція «Біологічні ресурси і новітні біотехнології виробництва біопалив» 9-11 вересня 2014 р., Київ, Україна;
12. 4th Bioenergy Week 21-24 June 2016, Budapest, Hungary, Український форум з альтернативної енергетики, 3 листопада 2016 року, Київ, Україна;
13. Другий Німецько-Український ВЕА форум. Біоенергетика, енергоефективність, агробізнес. 7 листопада 2016 р., Харків, Україна;
14. Конференція Hard Talk «Нові можливості для розвитку сталої енергетики в Україні», 15 - 16 грудня 2016 року, Київ, Україна;
15. 5th Central European Biomass Conference, 18 - 20 January 2017, Graz, Austria;
16. IV Харківський міжнародний бізнес-форум. 21.06.2017 р., м. Харків, Україна;
17. Kyiv Smart City Forum 2017, 3 листопада 2017 р. Київ, Україна;
18. 2017 AEBIOM Conference, 21-22 листопада 2017, Брюссель, Бельгія;

19. Ukraine Renewable Energy & Power Infrastructure Investors Conference, 28 березня 2018, Київ, Україна;
20. «EU4Energy Vienna Policy Forum: Bioenergy for Heat», 24 April 2018, Vienna, Austria;
21. Конференція «Агроенергетика 2018», 14 червня 2018, Київ, Україна;
22. Конференція «AgroPower: Біогаз», 21 червня 2018, Київ, Україна;
23. Sustainable Energy Forum SEFF-2018, 16 жовтня 2018, Київ, Україна;
24. «Sweden Ukraine Bioenergy Cooperation Forum 2018», 23 жовтня 2018, Стокгольм, Швеція;
25. «Ukrainian Renewable Energy Forum'18» 19-21 листопада 2018, Київ, Україна;
26. «AgTech and Green Energy Forum», 10-11 December 2018, Baku, Azerbaijan;
27. 2nd Renewable Energy & Power Infrastructure Investors Conference RENPOWER Ukraine 2019, 31 січня 2019, Київ, Україна;
28. Конференція AgroPower.БІОГАЗ, 7 лютого 2019 р., Київ, Україна; «Reducing Open Agricultural Burning in Ukraine: Soil, Air Quality, and Public Health Paths for European Integration», 7 березня 2019 р., Київ, Україна;
29. Конференція «Покращення ефективності систем централізованого тепlopостачання в Центральній та Східній Європі», 23 - 25 квітня 2019 року, м. Київ, Україна;
30. Sustainable Energy Forum SEF 2019, 16 October 2019, Kyiv, Ukraine; X Міжнародний інвестиційний форум з відновлюваної енергетики, 28 листопада, 2019, Київ, Україна.

Всього результати роботи доповідалися на 32 міжнародних конференціях за кордоном і на 100 конференціях в Україні.

ДОДАТОК Б
Копії актів впровадження результатів роботи.



ТОВАРИСТВО з ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«ВОЛИНЬ-КАЛЬВІС»

45008, Волинська обл., м. Ковель, вул. Грушевського 110а

Тел./факс: (03352) 5-02-31, 3-46-04, 3-48-03

E-mail: v-kalvis@kv.lt.ukrtel.net

Р/р 2600301223483, ПАТ «Кредобанк», вул. Міцкевича, 1,

МФО 325365, код ЗКПО 34214554



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ "Волинь - Кальвіс"

А.М. Понікарчук

2020 рік

АКТ

**про впровадження результатів
дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук
Гелетуки Георгія Георгієвича**

Дійсний акт складено про те, що результати дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук Гелетуки Г.Г. використані ТОВ "Волинь - Кальвіс" для вдосконалення котельної продукції, яка виробляється на підприємстві.

Я, технічний директор ТОВ "Волинь - Кальвіс", Понікарчук Ігор Анатолійович, цим актом засвідчую, що рекомендації роботи дозволили розширити застосування технології спалювання відходів деревини в котлах з топковим пристроєм ретортного типу для деревного палива з вологістю до 50%. При цьому паливо може мати неоднорідний фракційний склад, а максимальний розмір його часток визначається пропускною спроможністю шнекового живильника.

Технічний директор
ТОВ "Волинь - Кальвіс"

І.А.Понікарчук

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор
ТОВ «Котлозавод «Крігер»



Д.Г. Хробок
2020 р.

АКТ
про впровадження результатів
дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук
Гелетухи Георгія Георгійовича

Я, Технічний директор ТОВ «Котлозавод «Крігер» Кужелюк О.Л., склав цей акт про те, що результати дисертаційного дослідження Гелетухи Г.Г. впроваджені на ТОВ «Котлозавод «Крігер».

Завдяки рекомендаціям роботи Гелетухи Г.Г. досягнуто стабільне вигорання та усунуто неповноту згорання тюка соломи, забезпечено стабільні показники поточної теплової потужності котла, зменшено емісію СО в водогрійних котлах періодичної дії.

Також завдяки рекомендаціям роботи Гелетухи Г.Г. забезпечено стабільне безперервне горіння малих тюків соломи разом з помірними викидами шкідливих речовин в водогрійних котлах ретортно-сигарного типу, до складу яких входить завантажувальний пристрій лоткового типу.

Технічний директор
ТОВ «Котлозавод «Крігер»

О.Л. Кужелюк

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

ПрАТ "МХП Еко Енерджи"



І.С. Тракслер

» _____ 2020 р.

АКТ

**про впровадження результатів
дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук
Гелетуخی Георгія Георгієвича**

Я, інженер I категорії ПрАТ "МХП Еко Енерджи", Фенюк Валерій Степанович, склав цей акт про те, що результати експериментальних досліджень анаеробного зброджування аграрних відходів і залишків (солома, стебла кукурудзи, лушпиння соняшника) здобуті при виконанні Гелетухою Г.Г. докторської дисертаційної роботи використані при проектуванні біогазових комплексів підприємства.

Інженер I категорії
ПрАТ "МХП Еко Енерджи"

В.С. Фенюк

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор НДІ економіки і менеджменту
Національного університету біоресурсів і
природокористування України,
доктор економічних наук, професор



М.П. Талавира
« 06 » 2020 р.

АКТ
про впровадження в навчальному процесі результатів дисертаційної
роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
Гелетухи Георгія Георгійовича

В навчальному процесі кафедри економічної теорії факультету аграрного менеджменту Національного університету біоресурсів і природокористування України при розробці робочих навчальних програм та лекційного матеріалу були впроваджені такі матеріали докторської дисертації Гелетухи Г.Г.:

- Методика оцінки енергетичного потенціалу біомаси України. Методика включає оцінку теоретичного, технічно досяжного та економічного потенціалу біомаси, придатної для енергетичного використання;
- Результати техніко-економічного обґрунтування заготівлі побічної продукції кукурудзи;
- Результати техніко-економічного обґрунтування виробництва пелет і брикетів з побічної продукції кукурудзи;
- Результати техніко-економічного обґрунтування анаеробного зброджування аграрних відходів і залишків;
- Результати техніко-економічного обґрунтування виробництва і використання біометану.

Кандидат економічних наук, доцент
Декан факультету аграрного менеджменту
Національного університету біоресурсів і
природокористування України

А.Д. Остапчук



**ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО З ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ УКРАЇНИ
(Держенергоефективності)**

пров. Музейний, 12, м. Київ, 01001
приймальня (044) 590-59-60, канцелярія (044) 590-59-74, ф.(044) 590-59-61, 590-59-75
Web: <http://www.sacee.gov.ua> Код ЄДРПОУ 37536010

№ _____

на № _____

від _____

**Директору Інституту
технічної теплофізики
НАН України**

Снежкіну Ю.Ф.

Шановний Юрію Федоровичу!

Інформую Вас, що у 2014-2018 роках Державним агентством з енергоефективності та енергозбереження України за активної участі співробітників ІТТФ НАН України було розроблено низку важливих для енергетичного сектору нормативно-правових документів, які сприяли стимулюванню заміщення природного газу відновлюваними джерелами енергії під час виробництва теплової та електричної енергії та стимулюванню виробництва і споживання біогазу в Україні. У співпраці з науковцями інституту велась робота над врегулюванням питання заготівлі твердого біопалива і його торгівлі через біопаливну біржу та розробленням пропозицій щодо стимулювання вирощування енергетичних культур.

Співробітники ІТТФ НАНУ к.т.н. Гелетука Г.Г., к.т.н. Железна Т.А., к.ф. м.н. Матвеев Ю.Б., к.т.н. Кучерук П.П. як експерти були залучені до розробки наступних документів:

- Закон України № 514-VIII від 04.06.2015 «Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електроенергії з альтернативних джерел енергії».
- Закон України № 1959-VIII від 21.03.2017 «Про внесення змін до Закону України "Про теплопостачання" щодо стимулювання виробництва теплової енергії з альтернативних джерел енергії».

- Закон України № 2712-VIII від 25.04.2019 «Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії».
- Проект Закону України № 7348 від 29.11.2017 «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо розвитку сфери виробництва рідкого палива з біомаси та впровадження критеріїв сталості рідкого палива з біомаси та біогазу, призначеного для використання в галузі транспорту».
- Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року, затвердженого розпорядженням Кабінету Міністрів України № 902-р від 01.10.2014.
- Постанова КМУ № 679 від 06.09.2017 «Про затвердження Порядку розрахунку середньозважених тарифів на теплову енергію, вироблену з використанням природного газу, для потреб населення, установ та організацій, що фінансуються з державного чи місцевого бюджету, її транспортування та постачання».
- Розпорядження КМУ № 791-р від 03.09.2014 «Про затвердження плану заходів з імплементації Директиви Європейського Парламенту та Ради 2009/28/ЄС».
- Пропозицій та розрахунків щодо необхідного обсягу стимулювання вирощування енергетичних культур (компенсації на гектар для таких енергетичних культур як тополя, верба, міскантус).

Також підтверджую, що співробітник ІТТФ НАНУ к.т.н. Гелетука Г.Г. протягом 2014-2018 рр. був радником на громадських засадах Голови Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України.

Відмічаю високий професійний рівень науковців інституту залучених до розробки вказаних нормативно-правових актів України та висловлюю Вам подяку за активну участь співробітників ІТТФ НАН України у цій діяльності.

З повагою
Голова



С. Савчук

Директору ІТТФ НАНУ
академіку НАН України
Сисажіну Ю.Ф.

Шановний Юрій Федорович!

Як виконуючий обов'язки голови Комітету Верховної Ради України з питань паливно-енергетичного комплексу, ядерної політики та ядерної безпеки у 2014-2019 роках засвідчую, що співробітники ІТТФ НАНУ к.т.н. Гелетука Г.Г., к.т.н. Железна Т.А. та к.ф.-м.н. Матвєєв Ю.Б., к.т.н. Кучерук П.П. були активно залучені до розроблення та обговорення наступних законів України:

- Закон України № 514-VIII від 04.06.2015, «Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електроенергії з альтернативних джерел енергії».
- Закон України № 1959-VIII від 21.03.2017 р «Про внесення змін до Закону України "Про теплопостачання" щодо стимулювання виробництва теплової енергії з альтернативних джерел енергії».
- Закон України № 2712-VIII від 25.04.2019 «Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії».
- Проект Закону України №7348 від 29.11.2017 р. «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо розвитку сфери виробництва рідкого палива з біомаси та впровадження критеріїв сталості рідкого палива з біомаси та біогазу, призначеного для використання в галузі транспорту».

Також підтверджую, що співробітник ІТТФ НАНУ к.т.н. Гелетука Г.Г. протягом 2014-2019 рр. був моїм помічником-консультантом народного депутата на громадських засадах.

Відмічаю високий професійний рівень науковців інституту залучених до розробки вказаних нормативно-правових актів України та висловлюю Вам подяку за активну участь співробітників ІТТФ НАН України у цій діяльності.

З глибокою повагою,

Народний депутат Верховної Ради України VII та VIII скликань

**Перший заступник Голови Комітету ВРУ з питань
паливно-енергетичного комплексу,
ядерної політики та ядерної
безпеки у 2014-2019 рр.**

Домбровський О.Г.

8.10.2019