

ОЦІНКА ПОТЕНЦІАЛУ ТА ШЛЯХІВ ВИРОБНИЦТВА ВОДНЮ ІЗ АГРАРНОЇ БІОМАСИ

С.М. Кухарець, докт. техн. наук, проф., **О.М. Сукманюк**, канд. іст. наук, доцент, **Я.Д. Ярош**, докт. техн. наук, проф., **М.М. Кухарець**, здобувач вищої освіти ступеня доктора філософії

Поліський національний університет,
10002, Старий бульвар, 7, м. Житомир, Житомирська область, Україна.

Метою статті є оцінка потенціалу виробництва водню із аграрної біомаси та визначення напрямків технічного забезпечення реалізації цього потенціалу. В статті наведено перспективну модель виробництва та використання біопалива аграрного походження. Згідно до цієї моделі доречно виробляти дизельне біопаливо, біоетанол (в кількості необхідній для забезпечення роботи мобільної техніки), біогаз, біоводень, генераторний газ, тверде біопаливо (рулони, паливні гранули, брикети із соломи).

Встановлено, що виробництво водню в аграрному виробництві можливе із використанням, як способу термохімічного перетворення біомаси, так і способу ферментації біомаси. При використанні термохімічного способу частка рослинної біомаси використовується для виробництва паливних гранул. Із гранул виробляється генераторний газ. Генераторний газ використовується для виробництва біоводню. Крім того частка біомаси рослинного походження, а також побічна продукція тваринництва може бути перероблена в біогаз за допомогою темної ферментації. Для виробництва біоводню термохімічним способом пропонується використання удосконалених газогенераторів, конструкція яких перешкоджає утворенню твердих відкладень на робочих поверхнях в камері утворення газу. Для виробництва біоводню способом ферментації пропонується використання обертових біореакторів.

Встановлено, що теоретичний потенціал виробництва водню із аграрної біомаси рослинного походження за допомогою термохімічного перетворення становить біля 4,8 млрд.м³ водню за рік. Теоретичний потенціал отримання водню за способом ферментації становить близько 1,4 млрд.м³ за рік.

Для практичної реалізації теоретичного потенціалу водню необхідні подальші теоретичні та експериментальні дослідження обох способів отримання водню в умовах аграрного виробництва. Бібл. 31, рис. 9.

Ключові слова: ферментація, термохімічне перетворення, газогенератор, біореактор, біопаливо.

THE POTENTIAL AND WAYS OF AGRICULTURAL BIOMASS HYDROGEN PRODUCTION ASSESSMENT

S. Kukharets¹, doctor of technical science, professor, **O. Sukmanyuk**¹, candidate of historical sciences, associate professor, **Ya. Yarosh**¹, doctor of technical science, professor, **M. Kukharets**¹, applicant higher education degree of doctor of philosophy

Polissia National University,
10002, 7, Staryy Blvd., Zhytomyr, Zhytomyr region, Ukraine.

The purpose of the article is to assess the agricultural biomass hydrogen production potential and determine the areas of technical support for the realization of this potential. The article presents a promising model of production and biofuels use of agricultural origin. According to this model, it is appropriate to produce diesel biofuel, bioethanol (in the amount necessary to ensure the mobile equipment operation), biogas, biohydrogen, generator gas, solid biofuels (rolls, fuel pellets, straw briquettes).

It is established that hydrogen production in agriculture is possible using both the method of biomass thermochemical conversion and the biomass fermentation method. When using the thermochemical method, the proportion of plant biomass is used for the production of fuel pellets. Generator gas is produced of granules. Generator gas is used to produce biohydrogen. Additionally, the biomass of plant origin proportion, as well as livestock by-products can be processed into biogas by dark fermentation. For the biohydrogen by thermochemical method production, the use of advanced gas generators is proposed, the design of which prevents the formation of solid deposits on the working surfaces in the gas formation chamber. For the biohydrogen by fermentation production, the use of rotating bioreactors is proposed.

It is established that the theoretical potential of hydrogen production of plant origin agricultural biomass by thermochemical transformation is about 4.8 billion m³ of hydrogen per year. The theoretical potential of hydrogen production by fermentation is about 1.4 billion m³ per year.

For the hydrogen theoretical potential practical implementation, further theoretical and experimental studies of both methods of obtaining hydrogen in the conditions of agricultural production are necessary. Ref. 31, fig. 9.

Keywords: fermentation, thermochemical transformation, gas generator, bioreactor, biofuel.



*S.M. Kukharets
S. Kukharets*

Відомості про автора: завідувачий кафедрою механіки та інженерії агроєкосистем Поліського національного університету, д.т.н., професор.

Освіта: Вища. Державна агроєкологічна академія. Спеціальність «Механізація сільського господарства»

Наукова сфера: технічна біоенергетика, технічне забезпечення агроєкосистем.

Публікації: 235 публікацій, з них 149 наукові (у тому числі 120 наукових праць, опублікованих у вітчизняних і 29 у міжнародних рецензованих фахових виданнях), 5 наукових монографій, 21 патент на винахід та 27 праць навчально-методичного характеру.

ORCID: 0000-0002-5129-8746

Контакти: +38(067)665-35-48

e-mail: saveliy_76@ukr.net

Author information: Head of the Department of Mechanics and Engineering of Agroecosystems of Polissia National University, Doctor of Technical Sciences, Professor.

Education: Higher. State Agroecological Academy. Specialty - "Agricultural Mechanization"

Research area: technical bioenergy, technical support of agroecosystems.

Publications: 235 publications, including 149 scientific (including 120 scientific papers published in native and 29 in international peer-reviewed professional magazines), 5 scientific monographs, 21 patents for inventions and 27 educational and methodological works.

ORCID: 0000-0002-5129-8746

Contacts: +38(067)6653548

e-mail: saveliy_76@ukr.net



*O.M. Sukmanjuk
O. Sukmanjuk*

Відомості про автора: заступник декана з навчальної роботи факультету інженерії та енергетики, к.і.н., доцент кафедри процесів, машин і обладнання в агроінженерії.

Освіта: Вища. Державний вищий навчальний заклад «Державний агроєкологічний університет» Спеціальність «Механізація сільського господарства».

Наукова сфера: механізація, історія техніки, поновлювальні джерела енергії.

Публікації: 170 публікацій, з них 73 наукових та 73 навчально-методичного характеру, 1 монографія, 11 фахових статей та 2 публікації містяться у наукометричній базі Scopus.

ORCID: 0000-0003-2485-488X

Контакти: +38(067)411-64-70

e-mail: sukmanjukolena@gmail.com

Author information: Deputy Dean for Academic Affairs of the Engineering and Energy Faculty, Ph.D., Associate Professor of Processes, Machines and Equipment in Agricultural Engineering.

Education: higher. State Higher Educational Institution "State Agroecological University" Specialty "Agricultural Mechanization".

Research area: mechanization, history of technology, renewable energy sources

Publications: 170 publications, including 73 scientific and 73 educational and methodological, 1 monograph, 11 professional articles and 2 publications are contained in the scientific database Scopus.

ORCID: 0000-0003-2485-488X

Contacts: +38(067)411-64-70

e-mail: sukmanjukolena@gmail.com



*Ya. Yarosh
Ya. Yarosh*

Відомості про автора: декан факультету інженерії та енергетики Поліського національного університету, д.т.н., професор кафедри електрифікації, автоматизація виробництва та інженерної екології.

Освіта: Тернопільський державний технічний університет ім. Івана Пулюя.

Наукова сфера: біоенергетичні системи аграрного виробництва, технологічні засоби формування екологічнобезпечних проектів у агрохарчовій галузі.

Публікації: 104 публікації, з них 84 наукові (у тому числі 56 наукових праць, опублікованих у вітчизняних і 18 у міжнародних рецензованих фахових виданнях), 5 патентів на винахід та 14 навчально-методичного характеру.

ORCID: 0000-0001-6590-7058

Контакти: +38(067)796-24-49

e-mail: yaroslav.yarosh76@gmail.com

Author information: Dean of the Engineering and Energy Faculty of Polissia National University, Doctor of Technical Sciences, Professor of Electrification, Automation of Production and Engineering Ecology.

Education: higher. Ternopil State Technical University. Specialty "Food Technology Equipment".

Research area: bioenergy systems of agricultural production, technological means of formation of ecologically safe projects in agrifood industry.

Publications: 104 publications, including 84 scientific (including 56 scientific papers published in native and 18 in international peer-reviewed professional magazines), 5 patents for inventions and 14 educational and methodological nature works.

ORCID: 0000-0001-6590-7058

Contacts: +38(067)796-24-49

e-mail: yaroslav.yarosh76@gmail.com



М.М. Кухарець
M. Kukharets

Відомості про автора: асистент кафедри електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології Поліського національного університету.

Освіта: вища. Житомирський національний агроєкологічний університет. Спеціальність «Агроінженерія»

Наукова сфера: технічна біоенергетика, отримання горючого газу із біомаси в умовах аграрних підприємств.

Публікації: 16 публікацій (у тому числі 4 наукові праці, опубліковані у вітчизняних і 2 у міжнародних рецензованих фахових виданнях).

ORCID: 0000-0002-2863-190X

Контакти: +38(097)756-15-69

e-mail: kolobok-777@ukr.net

Author information: Assistant Professor of Electrification, Production Automation and Engineering Ecology, Polissia National University.

Education: higher. Zhytomyr National Agroecological University. Specialty "Agroengineering".

Research area: technical bioenergy, obtaining combustible gas from biomass in the conditions of agricultural enterprises.

Publications: 16 publications (including 4 scientific papers published in native and 2 in international peer-reviewed professional magazines).

ORCID: 0000-0002-2863-190X

Contacts: +38(097)756-15-69

e-mail: kolobok-777@ukr.net

Вступ. Агровиробництво, в першу чергу, є постачальником харчової продукції [1]. Але в останні роки аграрне виробництво позиціонується також як виробник біопалива, а саме біогазу, дизельного біопалива, соломи в тюках, паливних гранул та брикетів (аграрне біопаливо). [2-4]. Хоча виробництво відновлюваної енергії із біомаси і викликає доречні побоювання науковців, щодо зменшення рівня виробництва основної продукції – продуктів харчування та зменшення надходження поживних речовин в ґрунт, через використання частини посівних площ для вирощування біоенергетичних культур та використання соломи як палива [5, 6], але виробництво аграрного біопалива уже стає традиційним.

Зокрема ряд науковців стверджує, що аграрне виробництво може повністю забезпечити себе енергетичними ресурсами [7, 8]. Але ці дослідження говорять лише про використання біомаси для виробництва генераторного газу, біогазу та дизельного біопалива.

Останнім часом актуальності набуває також виробництво водню, наприклад в Європейському союзі планують виробляти більше 1700 TWh на основі водневих технологій до 2050 року [9]. Тому доречним є використання водневих технологій отримання енергії і в аграрному виробництві.

Метою цієї статті є оцінка потенціалу виробництва водню із аграрної біомаси та визначення напрямків технічного забезпечення реалізації цього потенціалу.

З урахуванням технологій отримання водню перспективна модель виробництва та використання біопалива аграрного походження матиме вигляд (рис. 1). За цією моделлю доречно виробляти дизельне біопаливо, біоетанол (в кількості необхідній для забезпечення роботи мобільної техніки), біогаз, біоводень, генераторний газ, тверде біопаливо (рулони,

паливні гранули, брикети із соломи).

Для отримання водню із аграрної біомаси можна використовувати наступні способи виробництва водню – термохімічний та біоферментація. Частка рослинної біомаси (соломи) використовується для виробництва пелет (гранул). Із гранул виробляється генераторний газ. Генераторний газ використовується для виробництва біоводню. Із відходів тваринництва за допомогою ферментації виробляється біоводень.

Термохімічний спосіб отримання водню.

В процесі термохімічного перетворення (рис. 2) водень отримується в результаті розкладання біомаси рослинного походження [10].

Для термохімічного отримання водню із біомаси доречним є використання газогенераторів нового типу (рис. 3). розроблених авторами статті [11].

Основною перешкодою для виробництва генераторного газу із рослинної біомаси є утворення твердих агломератів (частинок, відкладень) на робочих поверхнях в камері утворення газу в процесі роботи газогенератора [12-14]. Для уникнення утворення агломератів авторами створено конструкцію газогенератора, в якій відсутня колосникова решітка, а відбір газу відбувається через пази в бічній поверхні зони відновлення [15].

Потенціал виробництва водню термохімічним способом. Для розрахунку теоретичного потенціалу виробництва водню термохімічним способом із рослинної сировини аграрного походження було використано данні про наявні валові збори культур в рослинництві [16] та використано середні коефіцієнти доступного, технічного і економічного потенціалу побічної продукції, які в добутку становили від 0,17 до 0,7 для різних аграрних культур [17-18]. Далі нами було враховано орієнтовний вихід газу

із кілограма сировини, який, наприклад, для соломи зернових становив до 2,8 м³/кг [19] та враховано вміст водню в отриманому газі (до 40%) і коефіцієнти втрат в процесі очищення

та використання отриманого водню (до 0,3) [20-21]. Результати розрахунку наведено у графічному вигляді на рис. 4.

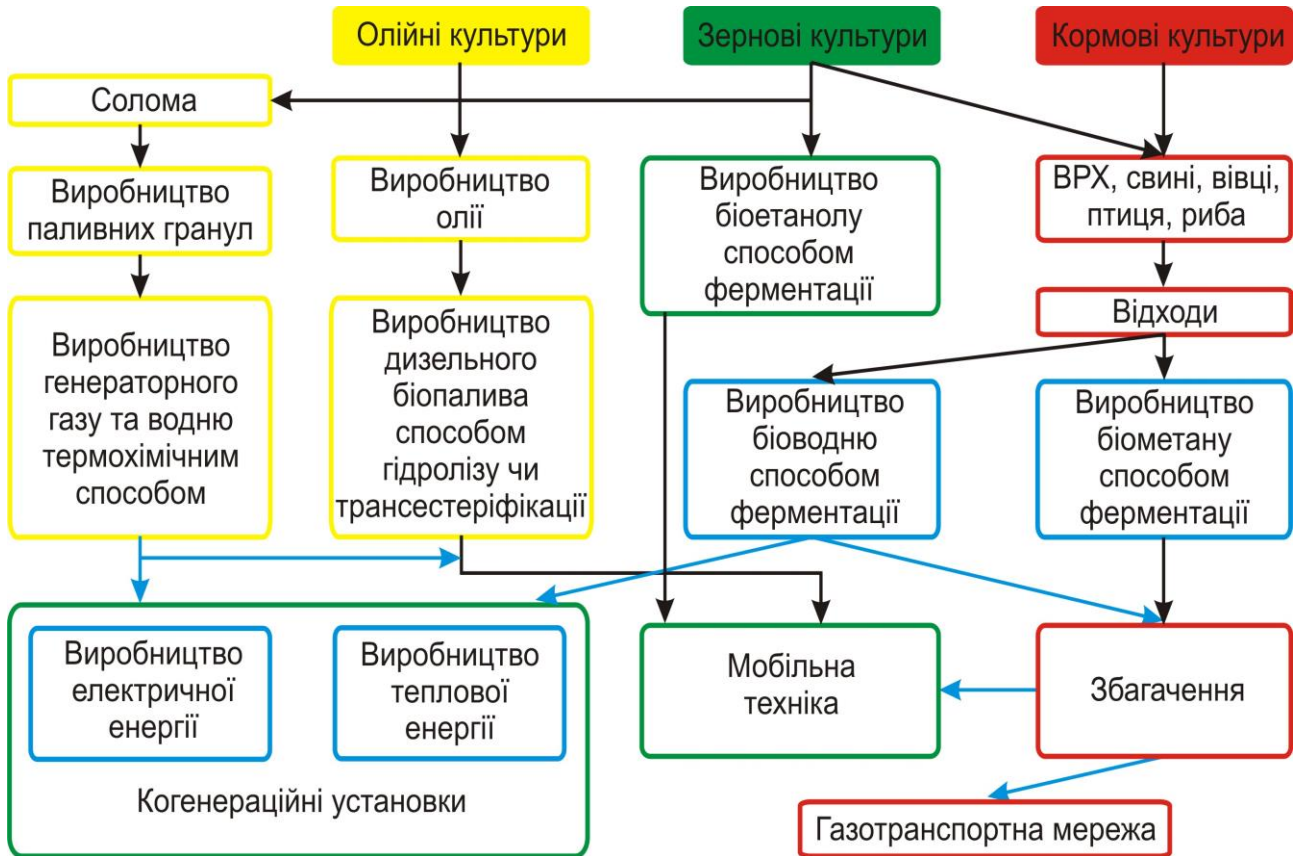


Рис. 1. Схема виробництва та використання біопалива в аграрних підприємствах.

Fig. 1. Scheme of biofuel production at agricultural enterprises.

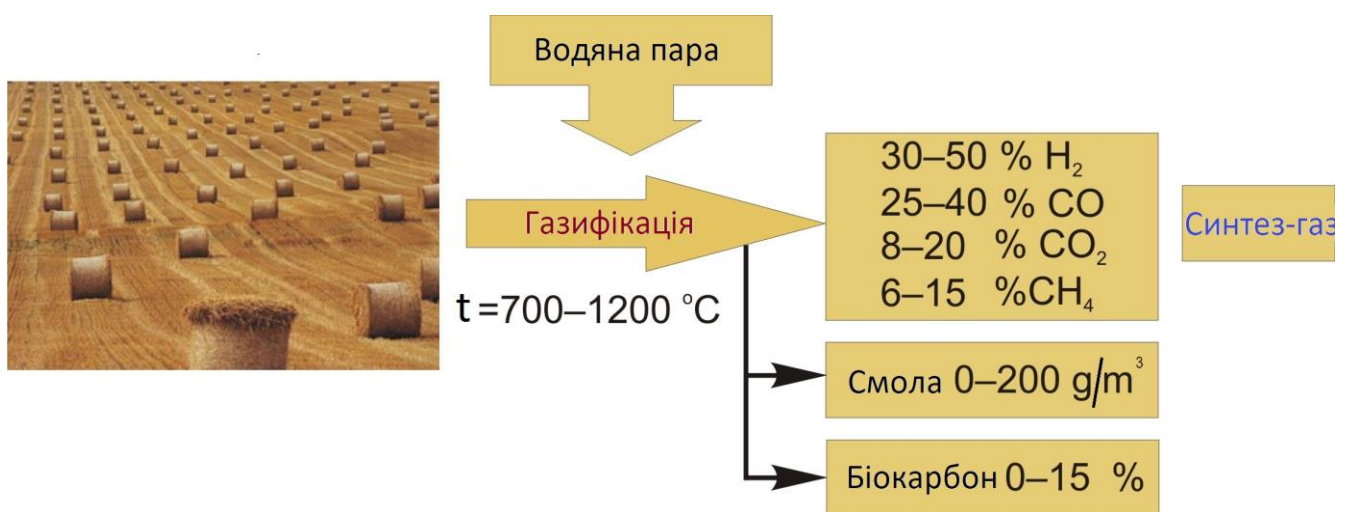


Рис. 2. Виробництво біоводню термохімічним способом.

Fig. 2. Biohydrogen production by thermochemical method.

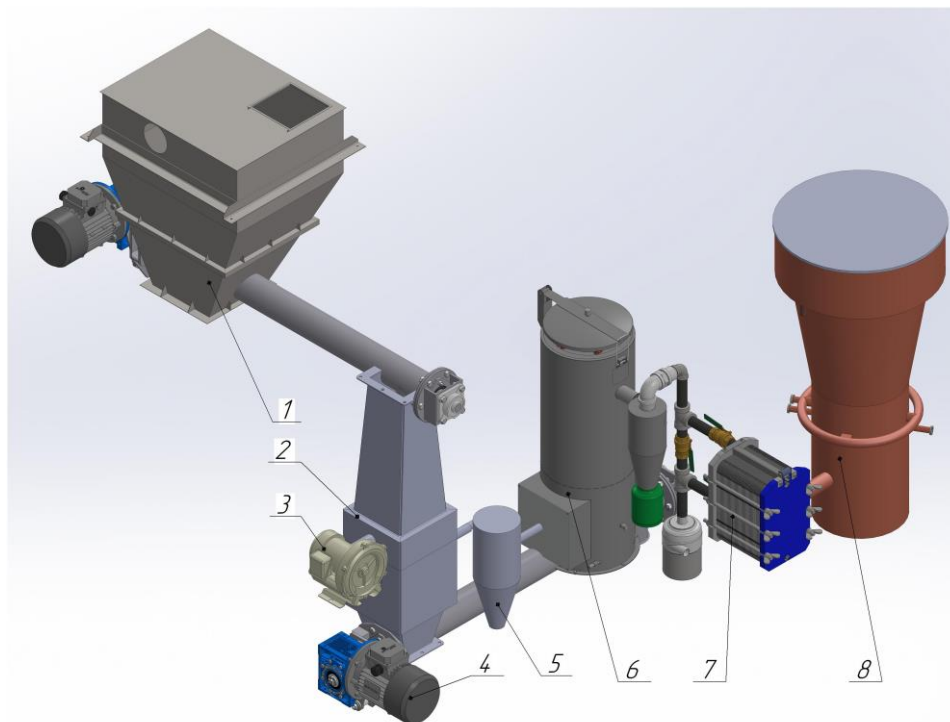


Рис. 3. Загальний вигляд установки для термохімічного отримання водню:

1 – бункер для біомаси; 2 – газогенератор; 3 – повітродувка для подачі повітря чи водяної пари; 4 – вивантажувач попелу чи біокарбону 5 – фільтр попереднього очищення газу; 6 – фільтр тонкого очищення газу; 7 – охолоджувач; 8 – фільтр повного очищення газу.

Fig. 3. General view of the installation for hydrogen thermochemical production:

1 – biomass hopper; 2 – gas generator ; 3 – blower for air or steam supply; 4 - ash or biocarbon unloader 5 – pre-gas filter; 6 – fine gas filter; 7 – cooler; 8 – full gas purification filter.

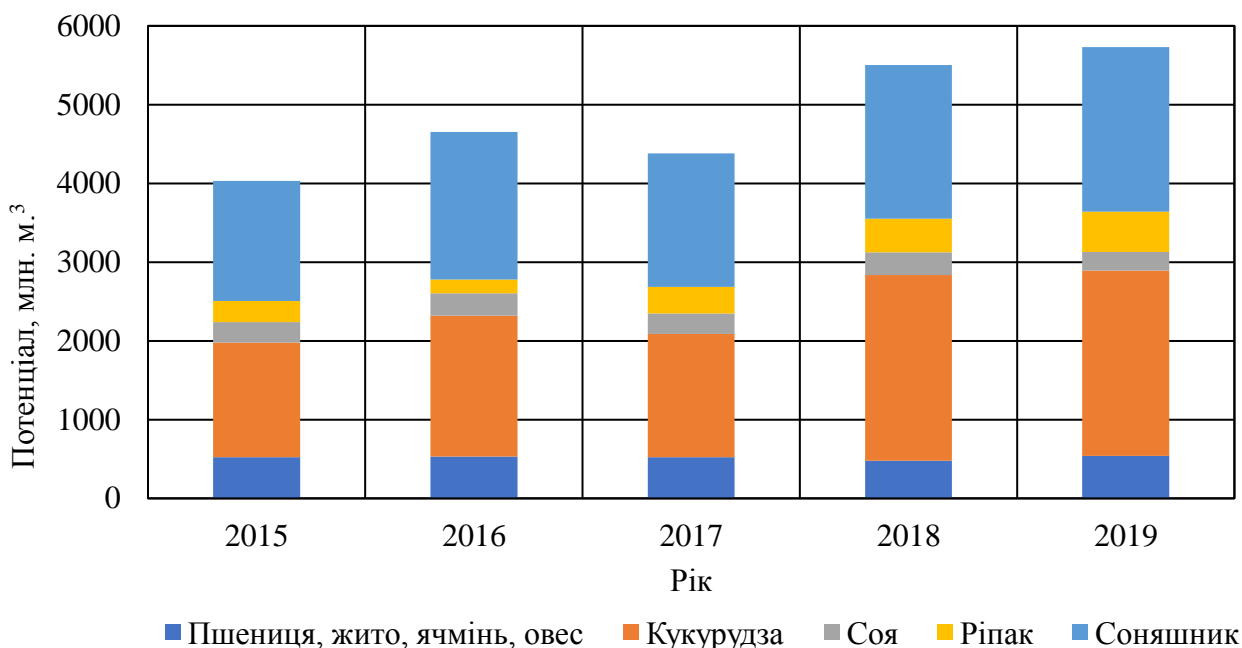


Рис. 4. Теоретичний потенціал виробництва водню із аграрної біомаси рослинного походження за допомогою термохімічного способу.

Fig. 4. The hydrogen production of agricultural biomass of plant origin theoretical potential using thermochemical method.

В результаті дослідження теоретичного потенціалу сировини для виробництва водню встановлено, що із аграрної біомаси рослинного походження за допомогою термохімічного перетворення теоретично можливо отримувати

біля 4,8 млрд.м³ водню щорічно.

Отримання водню способом ферментації.

В процесі ферментації (рис. 5 та рис. 6) водень отримують в результаті перероблення біомаси спеціальними бактеріями [22-24].

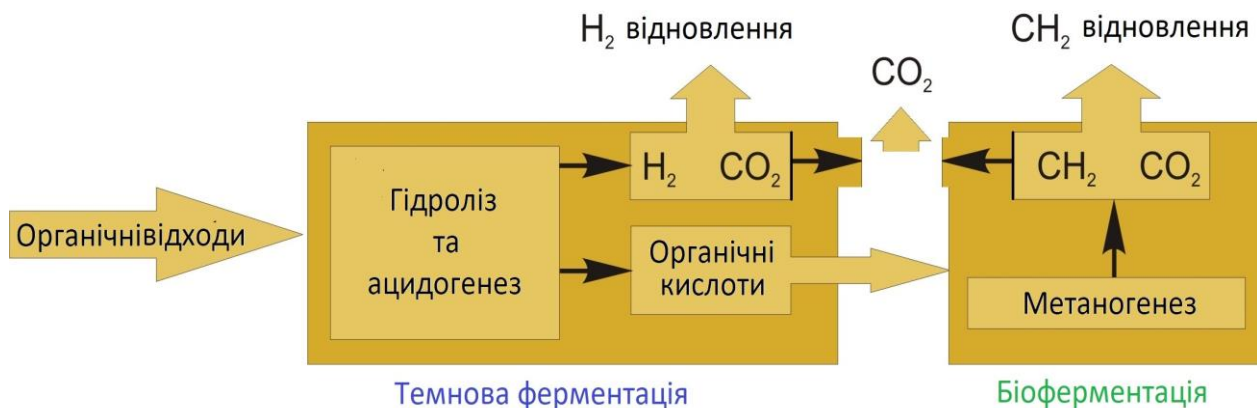


Рис. 5. Схема виробництва біоводню методом темної ферментації.

Fig. 5. The scheme of biohydrogen production by dark fermentation.

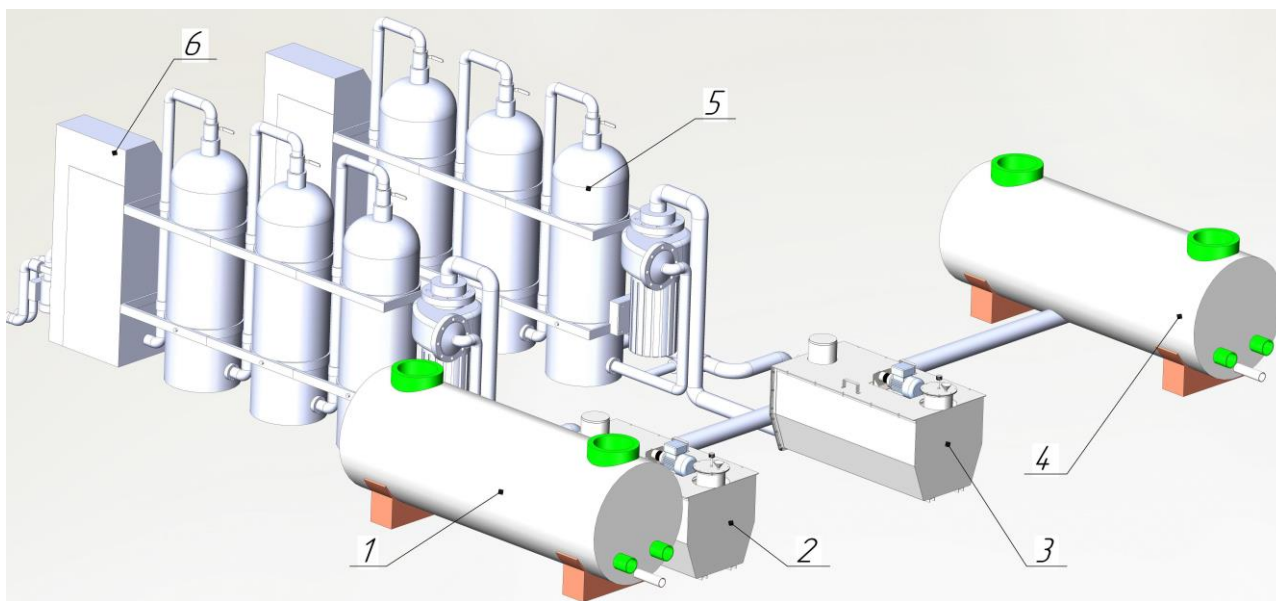


Рис. 6. Загальний вигляд установки для отримання водню методом ферментації:

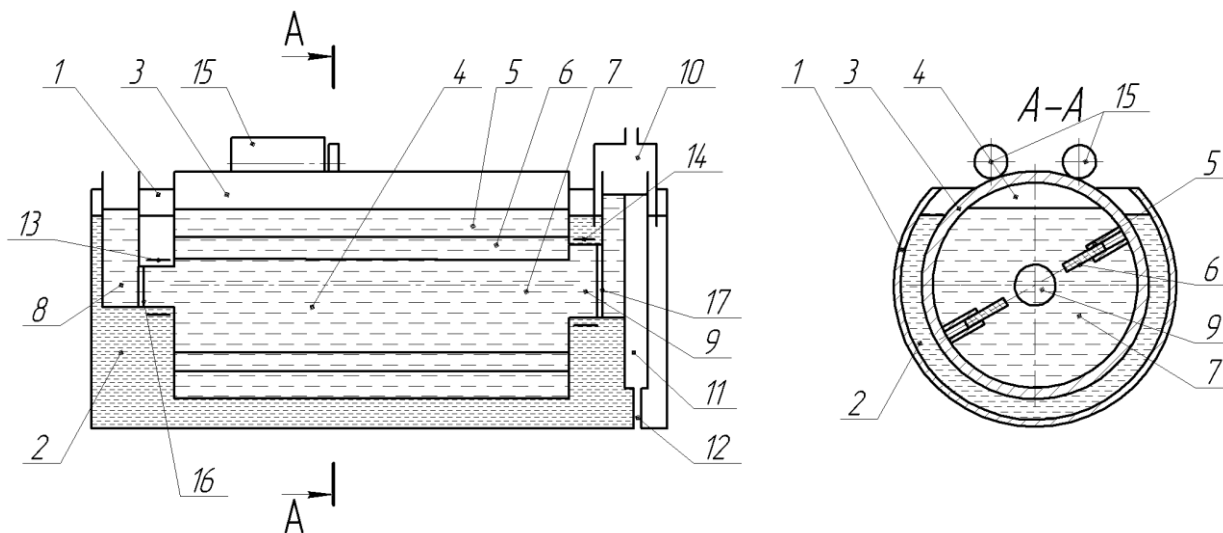
1 – ємкість для субстрату; 2 – біореактор для темної ферментації; 3 – біореактор для метаногенезу; 4 – ємкість для дигестату; 5 – модуль очищення та збагачення біоводню; 6 – модуль очищення та збагачення біометану.

Fig. 6. General view of the installation for the hydrogen production by fermentation:

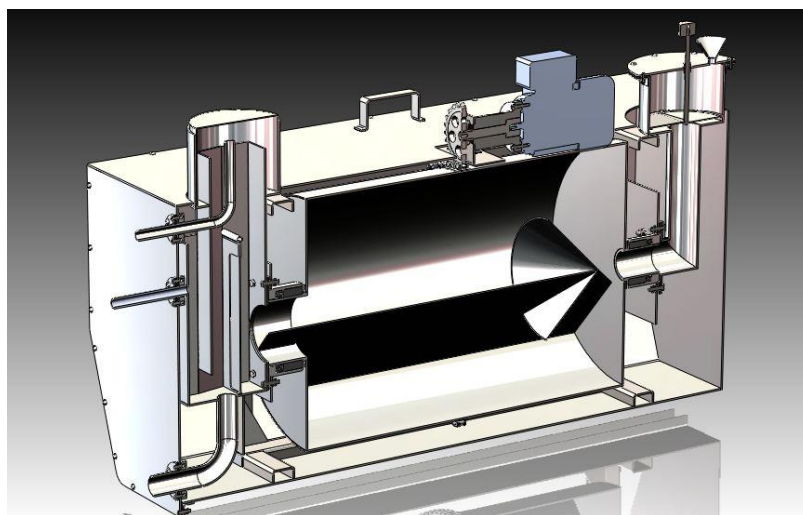
1 – roominess for substrate; 2 – dark fermentation bioreactor; 3 – bioreactor for methanogenesis; 4 - roominess for digestate; 5 – purification and enrichment of biohydrogen module; 6 – purification and enrichment of biomethane module.

Для забезпечення ефективного виробництва водню за допомогою ферментації в умовах аграрних підприємств ми пропонуємо

використовувати запропоновані авторами оборотні біореактори [25-26] (рис. 7).



a



b

Рис. 7. Біореактор, а - схема, б – модель: 1 - горизонтальний зовнішній корпус; 2 – рідина; 3 – циліндричний біореактор; 4 – ферментаційна камера; 5 – перегородка; 6 – рухомі пластини; 7 – органічна маса; 8, 9, 12 – патрубки; 10 – газовий колектор; 11 – розвантажувальна камера; 13, 14 – підшипники; 15 – зовнішній привід; 16, 17 – заслінка.

Fig. 7. Bioreactor, a – scheme, b – model: 1 – the horizontal outer case; 2 – liquid; 3 – the cylindrical bioreactor; 4 – the fermentation chamber; 5 – the bulkhead; 6 – the movable plates; 7 – organic mass; 8, 9, 12 – the sockets; 10 – the gas collector; 11 – the unloading chamber; 13, 14 – bearings; 15 – external drive; 16, 17 – hatch.

Авторами пропонуються нові технічні рішення в системі перемішування субстрату в біореакторі. Вони полягають у використанні зміни напрямку дії гравітаційних сил, що впливають на переміщення органічної і мінеральної фракцій біомаси. Корпус біореактора виконано у вигляді горизонтального циліндра, який обертається навколо горизонтальної осі. Біореактор обертається в рідині, яка знаходиться в зовнішньому корпусі. Така конструкція створює підймальну силу для обертального біореактора, розвантажуючи опорні підшипники. При цьому зменшується сила тертя і відповідно зменшується енергія, яка витрачається на обертання біореактора і перемішування субстрату.

Представлена конструкція біореактора дозволяє здійснювати рівномірне перемішування субстрату та ліквідує можливість створення плаваючої органічної частини та зануреного мінерального осаду.

Потенціал виробництва водню способом ферментації. Потенціал виробництва водню способом ферментації із побічної сировини тваринницьких аграрних підприємств було визначено за даними державної служби статистики [27]. Було використано дані про середньорічну чисельність поголів'я та дані про вихід екскрементів від однієї голови тварин у перерахунку на суху органічну речовину [28] та розраховано теоретичний потенціал сировини для

виробництва біогазу. Також було враховано коефіцієнти виходу газу із кілограма сухої біомаси тваринницького походження, який варіює від 0,0188 м³/кг до 0,0691 м³/кг [29] в залежності від виду біомаси та способу утримання тварин чи

птиці та коефіцієнти втрат в процесі очищення та використання отриманого водню (до 0,5) [30]. Розрахований таким чином потенціал виробництва водню способом ферментації із відходів тваринництва наведено на рис. 8.

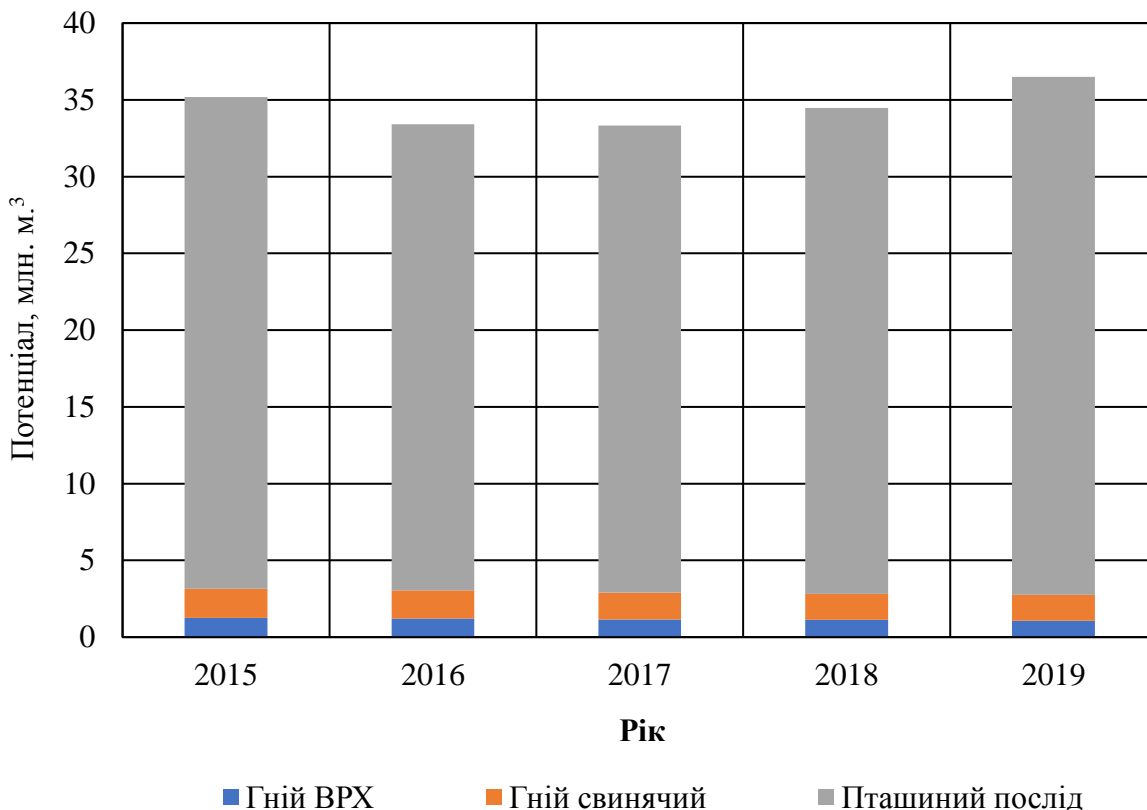


Рис. 8. Теоретичний потенціал виробництва водню із побічної продукції тваринництва способом ферментації.

Fig. 8. The hydrogen production of animal by-products theoretical potential by fermentation.

В результаті дослідження теоретичного потенціалу сировини для виробництва водню встановлено, що із аграрної біомаси тваринницького походження за допомогою ферментації теоретично можливо отримувати біля 34,6 млн.м³ водню щорічно.

Для розрахунку теоретичного потенціалу виробництва водню способом ферментації із рослинної сировини аграрного походження, аналогічно до способу термохімічного перетворення, було використано данні про наявні валові збори культур в рослинництві та використано середні коефіцієнти доступного, технічного і економічного потенціалу побічної продукції (від 0,17 до 0,7).

Також було враховано коефіцієнти виходу газу із кілограма сухої біомаси рослинного

походження, який варіює від 0,0383 м³/кг до 0,1280 м³/кг [31] в залежності від виду біомаси та коефіцієнти втрат в процесі очищення та використання отриманого водню. Розрахований таким чином потенціал виробництва водню способом ферментації із відходів тваринництва наведено на рис.9.

В результаті дослідження теоретичного потенціалу сировини для виробництва водню встановлено, що із аграрної біомаси рослинного походження за допомогою ферментації теоретично можливо отримувати біля 1,4 млрд.м³ водню щорічно. Загальний потенціал отримання водню за способом ферментації із аграрної побічної продукції становитиме близько 1,43 млрд.м³ щорічно.

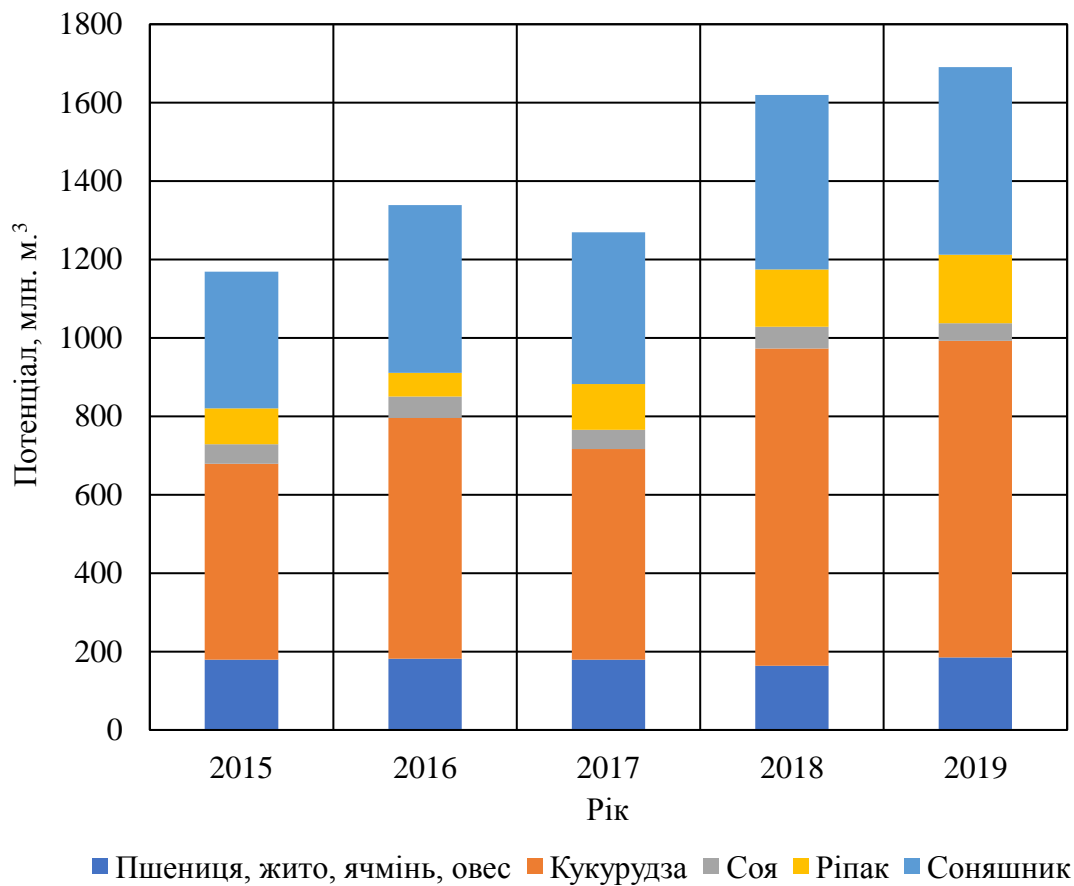


Рис. 9. Теоретичний потенціал виробництва водню із побічної продукції рослинництва способом ферментації.

Fig. 9. The hydrogen production of agricultural biomass of plant origin theoretical potential using by fermentation.

Потенціал отримання водню в аграрному виробництві для термохімічного перетворення приблизно в 10 разів вищий, ніж для ферментації. Проте виробництво водню способом ферментації дозволяє отримати крім основного продукту, ще й цінний побічний – органічні добрива. Крім того, мова йде про теоретичний потенціал виробництва водню, а щодо практичної реалізації цього потенціалу, тим чи іншим способом, необхідні подальші теоретичні та експериментальні дослідження обох способів отримання водню в умовах аграрного виробництва.

Висновки. Для аграрного виробництва доречним є виробництво біоводню за допомогою термохімічного перетворення біомаси чи ферментації. Для виробництва біоводню термохімічним способом доречним є використання удосконалених газогенераторів без колосникової решітки. Для виробництва біоводню способом ферментації доречним є використання обертових біореакторів. Проте, використання пропонованого обладнання для виробництва водню потребує подальших теоретичних та експериментальних досліджень.

В результаті дослідження теоретичного потенціалу сировини для виробництва водню встановлено, що із аграрної біомаси рослинного походження за допомогою термохімічного перетворення теоретично можливо отримувати біля 4,8 млрд.м³ водню щорічно. Загальний потенціал отримання водню за способом ферментації із аграрної побічної продукції становитиме близько 1,43 млрд.м³ щорічно. Із них близько 1,4 млрд.м³ із рослинної біомаси та близько 0,03 млрд.м³ із побічної продукції тваринництва.

Потенціал отримання водню в аграрному виробництві способом термохімічного перетворення приблизно в 10 разів вищий ніж для водню, що отримано за допомогою ферментації. Проте, виробництво водню способом ферментації дозволяє отримати органічні добрива.

Для практичної реалізації теоретичного потенціалу водню необхідні подальші теоретичні та експериментальні дослідження обох способів отримання водню в умовах аграрного виробництва.

1. *Golub G., Kukharets S., Yarosh Y., Zavadzka O.* Diversified production and bioenergy conversion for rural development. Proceedings of the 8th International Scientific Conference Rural Development. 2017. Pp. 333-337.
2. *Rzeznik W., Mielcarek P.* Agricultural biogas plants in Poland, Proceedings of 17th International Scientific Conference "Engineering for rural development". May 23-25. Pp. 1760-1765.
3. *Кухарець С.М.* Підвищення енергетичної автономності агроекосистем. Механіко-технологічні основи. монографія. Житомир: ЖНАЕУ. 2016. 192 с.
4. *Ovcharuk O., Hutsol T., Ovcharuk O., Rudskiy V., Mudryk Kr., Jewiarz M., Wrobel M., Styks J.* Prospects of Use of Nutrient Remains of Corn Plants on Biofuels and Production Technology of Pellets. Renewable Energy Sources: Engineering, Technology. Innovation. 01/2020. Pp. 293-300.
5. *Verdade, L.M., Pina C.L., Rosalino L.M.* Biofuels and biodiversity: Challenges and opportunities, Environmental Development. 2015. Pp. 64-78.
6. *Gomiero T.* Large-scale biofuels production: A possible threat to soil conservation and environmental services, Applied Soil Ecology. 2017. Pp. 729-736.
7. *Ярош Я.Д.* Енергетична автономність агроекосистем. монографія. Житомир. ЖНАЕУ. 2020. 316 с.
8. *Golub G., Skydan O., Kukharets V., Yarosh Y., Kukharets S.* The estimation of energetically self-sufficient agroecosystems model. Journal of Central European Agriculture. 2020. № 21(1). Pp. 168-175.
9. Gas Decarbonisation Pathways 2020–2050. [Електронний ресурс]. URL: https://gasforclimate2050.eu/sdm_downloads/2020-gas-decarbonisation-pathways-study/ (дата звернення: 31.10.2020).
10. *Pandey Bh., Prajapati Y.K., Sheth P.N.* Recent progress in thermochemical techniques to produce hydrogen gas from biomass. A state of the art review. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 44. Issue 47. 2019. Pp. 25384-25415.
11. *Golub G., Kukharets S., Skydan O., Yarosh Y., Chuba V., Golub V.* The Optimization of the Gasifier Recovery Zone Height When Working on Straw Pellets. International Journal of Renewable Energy Research. Vol. 10. No. 2. 2020. Pp. 529-536.
12. *Mac an Bhaird S., Walsh E., Hemmingway P., Maglinao A.L., Capareda S.C., McDonnell K.P.* Analysis of bed agglomeration during gasification of wheat straw in a bubbling fluidised bed gasifier using mullite as bed material. Powder Technology. 2014. № 254. Pp. 448-459.
13. *Wu Z., Meng H., Luo Z., Chen L., Zhao J., Wang Y.* Performance evaluation on co-gasification of bituminous coal and wheat straw in entrained flow gasification system. International Journal of Hydrogen Energy. 2017. № 42. Pp. 18884-18893.
14. *Sarker S., Arauzo J., Nielsen H.K.* Semi-continuous feeding and gasification of alfalfa and wheat straw pellets in a lab-scale fluidized bed reactor. Energy Conversion and Management. 2015. № 99. Pp. 50-61.
15. *Голуб Г.А., Скидан О.В., Кухарець С.М., Ярош Я.Д., Голуб В.А., Чуба В.В., Сабадаш О.С.* Пат. 121173 Україна. МПК (2006). B01J 7/00. F23C 7/00. Газогенератор. Заявник та патентовласник Голуб Г.А. № a201901587. заявл. 18.02.2019. опубл. 10.04.2020. Бюл. № 7.
16. Рослинництво України 2019. Статистичний збірник. Державна служба статистики України. Київ. 2020. 183 с.
17. *Гелетуха Г.Г., Железна Т.А.* Перспективи використання відходів сільського господарства для виробництва енергії в Україні. Аналітична записка БАУ. 2014. № 7. 33с.
18. *Федорчук Є.М.* Оцінка потенціалу твердої біомаси в сільському господарстві України. Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Економіка і менеджмент. 2014. Вип. 8. С. 48-54.
19. *Golub G., Kukharets S., Tsyvenkova N., Yarosh Ya., Chuba V.* Experimental study into the influence of straw content in fuel on parameters of generator gas. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. № 5/8(95). Pp. 76-86.
20. *Li Q., Song G., Xiao J., Sun T., Yang K.* Exergy analysis of biomass staged-gasification for hydrogen-rich syngas, International Journal of Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44. Issue 5. Pp. 2569-2579.
21. *Seçer A., Küçet N., Faki E., Hasanoğlu A.* Comparison of co-gasification efficiencies of coal, lignocellulosic biomass and biomass hydrolysate for high yield hydrogen production, International Journal of Hydrogen Energy. 2018. Vol. 43. Issue 46. Pp. 21269-21278.
22. *Baeyens J., Zhang H., Nie J., Appels L., Dewil R., Ansart R., Deng Y.* Reviewing the potential of bio-hydrogen production by fermentation. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 13.
23. *Cao L., Yu I.K.M., Xiong X., Tsang D.C.W., Zhang S., Clark J.H., Ok Y.S.* Biorenewable hydrogen production through biomass gasification: A review and future prospects. Environmental Research. 2020. Vol. 186.
24. *Ghimire A., Frunzo L., Pirozzi F., Trably E., Escudie R., Lens P.N.L., Esposito G.* A review on dark fermentative biohydrogen production from organic biomass: Process parameters and use of by-products. Applied Energy. 2015. № 144. Pp. 73-95.
25. *Golub G.A., Skydan O.V., Kukharets S.M., Marus O.A.* Substantiation of motion parameters of the substrate particles in the rotating digesters. INMATEH – Agricultural Engineering. 2019. Vol. 57. № 1. Pp. 179-186.
26. *Голуб Г.А., Кухарець С.М.* Пат. 110077 Україна. МПК C02F 11/04. C02F 3/28. Метантенк. Заявник і патентовласник Нац. ун.-т. біоресурсів і природокористування України. № a201409259. заявл. 19.08.2014. дата публікації 10.11.2015. Бюл. № 21.
27. Тваринництво України 2019. Статистичний збірник. Державна служба статистики України. Київ. 2020. 158 с.
28. *Грицай А.Г., Маслокова З.В.* Оцінка енергетичного потенціалу біогазу України. Наукові горизонти. 2019. № 10(83). С. 58-63.
29. *Łukajtis R., Hołowacz I., Kucharska K., Glinka M., Rybarczyk P., Przyjazny A., Kamiński M.* Hydrogen production from biomass using dark fermentation, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 91. Pp. 665-694.
30. *Kumar G., Shobana S., Nagarajan D., Lee D.-J., Lee K.-S., Lin C.-Y., Chang J.-S.* Biomass based hydrogen production by dark fermentation - recent trends and opportunities for greener processes. Current Opinion in Biotechnology. 2018. Vol. 50. Pp.136-145.
31. *Кухарець С.М., Голуб Г.А.* Сировинна база та ефективність виробництва біогазу. Наук. вісн. Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2015. Вип. 212. Ч. 1. С. 11-20.

REFERENCES

- agroecosystems]. Mechanical and technological bases. monograph. Zhytomyr. ZhNAEU.2016. 192 p. [in Ukrainian].
4. *Ovcharuk O., Hutsol T., Ovcharuk O., Rudskiy V., Mudryk Kr., Jewiarz M., Wrobel M., Styks J.* Prospects of Use of Nutrient Remains of Corn Plants on Biofuels and Production Technology of Pellets. Renewable Energy Sources. Engineering. Technology. Innovation. 01/2020. Pp. 293-300. [in English].
5. *Verdade, L.M., Pina C.I., Rosalino L.M.* Biofuels and biodiversity: Challenges and opportunities, Environmental Development. 2015. Pp. 64-78. [in English].
6. *Gomiero T.* Large-scale biofuels production: A possible threat to soil conservation and environmental services. Applied Soil Ecology. 2017. Pp. 729-736. [in English]
7. *Yarosh Y.D.* Enerhetychna avtonomnist ahroeoeksystem. [Energy autonomy of agroecosystems]. monograph. Zhytomyr. ZNAEU. 2020. 316 p. [in Ukrainian].
8. *Golub G., Skydan O., Kukharets V., Yarosh Y., Kukharets S.* The estimation of energetically self-sufficient agroecosystems model. Journal of Central European Agriculture. 2020. No. 21(1). Pp. 168-175. [in English].
9. Gas Decarbonisation Pathways 2020–2050. [Electronic resource]. URL: https://gasforclimate2050.eu/sdm_downloads/2020-gas-decarbonisation-pathways-study/ (Applying date 31.10.2020). [in English].
10. *Pandey Bh., Prajapati Y.K., Sheth P.N.* Recent progress in thermochemical techniques to produce hydrogen gas from biomass. A state of the art review, International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 44. Issue 47. 2019. Pp. 25384-25415. [in English].
11. *Golub G., Kukharets S., Skydan O., Yarosh Y., Chuba V., Golub V.* The Optimization of the Gasifier Recovery Zone Height When Working on Straw Pellets. International Journal of Renewable Energy Research. Vol. 10. No. 2. 2020. Pp. 529-536. [in English].
12. *Mac an Bhaird S., Walsh E., Hemmingway P., Maglinao A.L., Capareda S.C., McDonnell K.P.* Analysis of bed agglomeration during gasification of wheat straw in a bubbling fluidised bed gasifier using mullite as bed material. Powder Technology. 2014. No. 254 Pp. 448-459. [in English].
13. *Wu Z., Meng H., Luo Z., Chen L., Zhao J., Wang Y.S.* Performance evaluation on co-gasification of bituminous coal and wheat straw in entrained flow gasification system. International Journal of Hydrogen Energy. 2017. No. 42. Pp. 18884-18893. [in English].
14. *Sarker S., Arauzo J., Nielsen H.K.* Semi-continuous feeding and gasification of alfalfa and wheat straw pellets in a lab-scale fluidized bed reactor. Energy Conversion and Management. 2015. No. 99. Pp. 50-61. [in English].
15. *Golub G.A., Skydan O.V., Kukharets S.M., Yarosh Y.D., Golub V.A., Chuba V.V., Sabadash O.S.* Pat. 121173 Ukraina. MPK (2006). B01J 7/00. F23C 7/00 Hazohenerator. Zayavnyk ta patentovlasnyk. Golub G.A. [Pat. 121173 Ukraine. MPK (2006). B01J 7/00. F23C 7/00. Gas generator. Applicant and patent owner Golub G.A.]. No. a201901587. zaiavl. 18.02.2019. opubl. 10.04.2020. Biul. No. 7. [in Ukrainian].
16. Roslynnystvo Ukrainy 2019. [Crop production of Ukraine 2019]. Statystychnyi zbirnyk. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. Kyiv. 2020. 183 p. [in Ukrainian].
17. *Heletukha H.H., Zhelezna T.A.* Perspektyvy vykorystannia vidkhodiv silskoho hospodarstva dlia vyrobnytstva enerhii v Ukraini. [Prospects for the use of agricultural waste for energy production in Ukraine]. Analitychna zapyska BAU. 2014. No.7. 33 p. [in Ukrainian].
18. *Fedorchuk Ye.M.* Otsinka potentsialu tvrdoi biomasy v silskomu hospodarstvi Ukrainy. [Assessment of the potential of solid biomass in agriculture of Ukraine]. Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Seriya: Ekonomika i menezhment. 2014. Vol. 8. Pp. 48-54. [in Ukrainian].
19. *Golub G., Kukharets S., Tsyvenkova N., Yarosh Ya., Chuba V.* Experimental study into the influence of straw content in fuel on parameters of generator gas. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. No. 5/8(95). Pp. 76-86. [in English].
20. *Li Q., Song G., Xiao J., Sun T., Yang K.* Exergy analysis of biomass staged-gasification for hydrogen-rich syngas. International Journal of Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44. Issue 5. Pp. 2569-2579. [in English].
21. *Seçer A., Küçet N., Faki E., Hasanoglu A.* Comparison of co-gasification efficiencies of coal, lignocellulosic biomass and biomass hydrolysate for high yield hydrogen production, International Journal of Hydrogen Energy. 2018. Vol. 43. Issue 46. Pp. 21269-21278. [in English].
22. *Baeyens J., Zhang H., Nie J., Appels L., Dewil R., Ansart R., Deng Y.* Reviewing the potential of bio-hydrogen production by fermentation. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 13. [in English].
23. *Cao L., Yu I.K.M., Xiong X., Tsang D.C.W., Zhang S., Clark J.H., Ok Y.S.* Biorenewable hydrogen production through biomass gasification: A review and future prospects. Environmental Research. 2020. Vol. 186. [in English].
24. *Ghimire A., Frunzo L., Pirozzi F., Trably E., Escudie R., Lens P.N.L., Esposito G.* A review on dark fermentative biohydrogen production from organic biomass: Process parameters and use of by-products. Applied Energy. 2015. No. 144. Pp. 73-95. [in English].
25. *Golub G.A., Skydan O.V., Kukharets S.M., Marus O.A.* Substantiation of motion parameters of the substrate particles in the rotating digesters. INMATEH – Agricultural Engineering. 2019. Vol. 57. No. 1. Pp. 179-186. [in English].
26. *Golub G.A., Kukharets S.M.* Pat. 110077 Ukraina. MPK C02F 11/04. C02F 3/28. Metantenk. Zaiavnyk i patentovlasnyk Nats. un.-t. bioresursiv i pryrodokrustuvannia Ukrainy. [Pat. 110077 Ukraine. MPK C02F 11/04. C02F 3/28. Methanetank. Applicant and patent owner Nat. un.-t. bioresources and nature management of Ukraine]. No. a201409259. zaiavl. 19.08.2014. data publikatsii 10.11.2015. Biul. No. 21. [in Ukrainian].
27. Tvarynnystvo Ukrainy 2019. [Livestock of Ukraine 2019. Statistical collection]. Statystychnyi zbirnyk. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. Kyiv. 2020. 158 p. [in Ukrainian].
28. *Hrytsai A.H., Masliukova Z.V.* Otsinka enerhetychnoho potentsialu biohazu Ukrainy. [Assessment of energy potential of biogas of Ukraine]. Naukovi horyzonty. 2019. No. 10(83). Pp. 58-63. [in Ukrainian].
29. *Lukajtis R., Holowacz I., Kucharska K., Glinka M., Rybarczyk P., Przyjazny A., Kamiński M.* Hydrogen production from biomass using dark fermentation. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 91. Pp. 665-694. [in English].
30. *Kumar G., Shobana S., Nagarajan D., Lee D.-J., Lee K.-S., Lin C.-Y., Chang J.-S.* Biomass based hydrogen production by dark fermentation - recent trends and opportunities for greener processes. Current Opinion in Biotechnology. 2018. Vol. 50. Pp. 136-145. [in English].
31. *Kukharets S.M., Holub G.A.* Syrovynna baza ta efektyvnist vyrobnytstva biohazu. [Raw material base and efficiency of biogas production]. Nauk. visn. Nats. un-tu bioresursiv i pryrodokrustuvannia Ukrainy. Ser. Tekhnika ta enerhetyka APK. 2015. Vol. 212. No. 1. Pp. 11-20. [in Ukrainian].

Стаття надійшла до редакції 31.10.20

Остаточна версія 18.12.20