

УДК 620.92

## ПЕРСПЕКТИВИ ВИРОБНИЦТВА І СПОЖИВАННЯ БІОПАЛИВ ДРУГОГО ПОКОЛІННЯ В УКРАЇНІ

Т. А. Желєзна<sup>1</sup>, С. В. Драгнєв<sup>1</sup>, А. І. Баштовий<sup>1</sup>, І. Л. Роговський<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України, Україна.

<sup>2</sup>Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

Кореспонденція авторів: T.A.Zheliezna@nas.gov.ua.

Історія статті: отримано – березень 2018, акцентовано – травень 2018.

Бібл. 9, рис. 1, табл. 3.

**Анотація.** У статті проаналізовано поточний стан виробництва рідких біопалив другого покоління у світі та оцінено можливість започаткування такого виробництва в Україні. Актуальність роботи обумовлена тим, що рідкі біопалива можуть замінити певну частку моторних палив, що споживаються в Україні, сприяючи таким чином зміцненню енергетичної незалежності країни. Мета дослідження – оцінити життєздатність проекту з виробництва біоетанолу другого покоління в Україні, завдання – виконати попереднє техніко-економічне обґрунтування такого проекту. Методи дослідження включають огляд існуючих у світі установок з виробництва рідких біопалив другого покоління, оцінку та аналіз основних технічних та економічних показників типового проекту даного виду для умов України. Отримані результати показують, що за поточних умов (у тому числі співвідношення ціни бензину в Україні і Європі) проект з виробництва лігноцелюлозного біоетанолу є життєздатним тільки при продажу виробленого продукту на ринку Європи (термін окупності в рамках 5 років). Для можливості прибуткового виробництва і продажу біоетанолу другого покоління на внутрішньому ринку необхідно працювати в напрямку здешевлення капітальних та операційних витрат проекту. Україна має великий потенціал біомаси, у тому числі лігноцелюлозної сировини, доступної для виробництва рідких біопалив другого покоління. Для можливості успішної реалізації проектів у цьому секторі необхідне вдосконалення законодавчої бази і виконання науково-практичних робіт, спрямованих на здешевлення відповідних технологій.

**Ключові слова:** біомаса, біопалива, рідкі біопалива, біопалива другого покоління, лігноцелюлозна сировина, критерії сталості.

### Постановка проблеми

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю розвитку відновлюваної енергетики в Україні для зменшення споживання традиційних палив і енергоносіїв, у тому числі імпортованих, та скорочення викидів парникових газів. Рідкі біопалива

є важливим сегментом сектору біоенергетики, оскільки можуть замінити певну частку моторних палив, що споживаються в Україні. Особливий інтерес являє виробництво і використання рідких біопалив другого покоління з огляду на можливість виконання обов'язкових критеріїв сталості, визначених Директивою 2009/28/ЕС «Про стимулювання використання енергії з відновлюваних джерел» [1].

### Аналіз останніх досліджень

В роботі [2] проаналізовано проблемні питання виробництва рідких біопалив в Україні з акцентом на біопалива третього покоління (з водоростей). Авторами [3] розглянуто перспективи збільшення обсягів виробництва біопалива та підвищення його конкурентоспроможності шляхом формування кластерів. В роботах [4-9] розглянуто обов'язкові критерії сталості для рідких та газоподібних моторних біопалив, визначених Директивою 2009/28/ЕС.

### Мета досліджень

Мета дослідження – оцінити життєздатність проекту з виробництва біоетанолу другого покоління в Україні, завдання – виконати попереднє техніко-економічне обґрунтування такого проекту.

Матеріали і методи дослідження включають огляд існуючих в світі установок з виробництва рідких біопалив другого покоління, оцінку та аналіз основних технічних та економічних показників типового проекту даного виду для умов України.

### Результати досліджень

На сьогодні не існує єдиного загальноприйнятого визначення поняття рідких біопалив другого покоління. Зазвичай вважається, що це біопалива, вироблені з лігноцелюлозної сировини. У Директиві 2009/28/ЕС «Про стимулювання використання енергії з відновлюваних джерел» зазначено визначення терміну лігноцелюлозна сировина.

**Таблиця 1.** Кількість діючих установок з виробництва рідких біопалив другого покоління [5].

| Регіон світу     | Вид установок |                |                   | Загалом |
|------------------|---------------|----------------|-------------------|---------|
|                  | Пілотні       | Демонстраційні | Комерційні        |         |
| Африка           | 5             | 0              | 3                 | 8       |
| Азія та Океанія  | 6             | 5              | 4                 | 15      |
| Європа           | 7             | 7              | 5                 | 19      |
| Північна Америка | 5             | 6              | 9 (з них 8 у США) | 20      |
| Південна Америка | 1             | 1              | 3                 | 5       |
| Загалом          | 24            | 19             | 24                | 67      |

**Таблиця 2.** Установки з виробництва біоетанолу другого покоління в США і Бразилії [5].

| Назва, місце розміщення                           | Вид сировини  | Статус         | Рік початку роботи | Потужність, млн. л/рік |
|---|---|----------------|--------------------|------------------------|
| США:  |   |                |                    |                        |
| American Process, Аллена (Мічиган)                | деревна тріска  | комерційна     | 2012               | 3,6                    |
| American Process, Томастон (Джорджія)             | деревна тріска  | комерційна     | 2013               | нема даних             |
| Calgren Renewable Fuels, Пікслі (Каліфорнія)      | гній  | комерційна     | 2015               | нема даних             |
| DuPont, Невада (Айова)                            | стебла кукурудзи  | комерційна     | 2015               | 114                    |
| Gulf Coast Energy, Лівінгстон (Алабама)           | деревні відходи   | пілотна        | 2009               | 76                     |
| Indian River Bioenergy Center, Віро-Біч (Флорида) | тверді побутові відходи                                       | комерційна     | 2013               | 30                     |
| LanzaTech, Сопертон (Джорджія)                    | деревні відходи   | пілотна        | 2014               | 0,34                   |
| Pacific Ethanol, Стоктон (Каліфорнія)             | відходи зернової кукурудзи                                    | комерційна     | 2015               | 2,8                    |
| Project Liberty (POET), Емметсберг (Айова)        | відходи зернової кукурудзи                                    | комерційна     | 2014               | 76                     |
| Quad-Country, Галва (Айова)                       | відходи зернової кукурудзи                                    | комерційна     | 2014               | 7,6                    |
| Renmatix, Ром (Нью-Йорк)                          | Деревна тріска, смітні трави, відходи зернової кукурудзи, жом | демонстраційна | 2008               | нема даних             |
| Summit Natural Energy, Корнеліус (Орегон)         | Відходи харчової промисловості та сільського господарства     | пілотна        | 2009               | нема даних             |
| Tyton Biofuels (Рафорд, Північна Кароліна)        | відходи тютюнового виробництва                                | пілотна        | 2010               | 57                     |
| ZeaChem, Бордман (Орегон)                         | деревина  | демонстраційна | 2013               | 0,95                   |
| Бразилія:   |   |                |                    |                        |
| Bioflex 1 (GrandBio), Алагоас                     | жом, солома   | комерційна     | 2014               | нема даних             |
| Dedini, Сан-Паулу                                 | жом   | демонстраційна | 2002               |                        |
| Iogen, Сан-Паулу                                  | жом   | комерційна     | 2015               |                        |
| Raizen, Сан-Паулу                                 | жом   | комерційна     | 2015               |                        |

Лігноцелюлозна сировина – речовина, що складається з лігніну, целюлози та геміцелюлози, і до неї відноситься, серед іншого, лісова біомаса, відходи деревообробної промисловості, деревоподібні енергетичні культури [1]. До лігноцелюлозної сировини відносяться також побічні продукти, відходи та залишки сільського господарства (солома, стебла кукурудзи і соняшника та ін.).

Основною перевагою рідких біопалив другого покоління у порівнянні з біопаливами першого покоління (тобто «традиційними» біоетанолом і біодизелем з цукро-/крохмале- та олієвмісної сировини, відповідно) вважається те, що вони отримуються з сировини, яка не конкурує із виробництвом харчових продуктів. У Директиві 2009/28/ЕС навіть наведено окреме визначення для

нехарчової целюлозної сировини і у якості прикладів, серед іншого, зазначено солому, лушпиння, трав'янисті енергетичні культури з низьким вмістом крохмалю (міскантус, просо прутоподібне та ін.).

Масштабне виробництво рідких біопалив другого покоління на комерційному рівні розпочалося у світі у 2014-2015 роках. Найактивніше інвестують у цей сектор США, країни ЄС, Бразилія. На сьогодні загалом налічується 67 установок з виробництва такого біопалива, з них 24 комерційних, 19 демонстраційних і 24 пілотних (таблиця 1). Більшість установок, у тому числі комерційних, розташовані в США (таблиця 2). У жовтні 2015 р. у м. Невада (штат Айова) розпочав роботу найпотужніший у світі завод компанії DuPont з виробництва біоетанолу 2-го покоління із відходів зернової кукурудзи. Встановлена потужність заводу по кінцевому продукту складає більше 110 млн. л/рік. Загалом, за даними 2015 р., в США було використано

144 млн. т біомаси (головним чином, відходів виробництва кукурудзи на зерно) для отримання рідких біопалив, об'єм яких покритив 5% річної потреби країни в моторних паливах [5].

Існує три основні технології виробництва «целюлозних» біопалив – хімічна конверсія, біохімічна та термохімічна (рис. 1). Біохімічна конверсія біомаси у біоетанол 2-го покоління включає три етапи: попередня підготовка сировини, гідроліз та ферментація. Попередня підготовка спрямована на руйнування оболонки клітини рослини. На етапі гідролізу (у присутності кислоти або ензимів) целюлоза розпадається на менш складні полісахариди. В процесі ферментації відбувається конверсія цукрів у етанол. Для отримання біодизеля 2-го покоління лігноцелюлозна сировина піддається термохімічній конверсії (піроліз, газифікація).

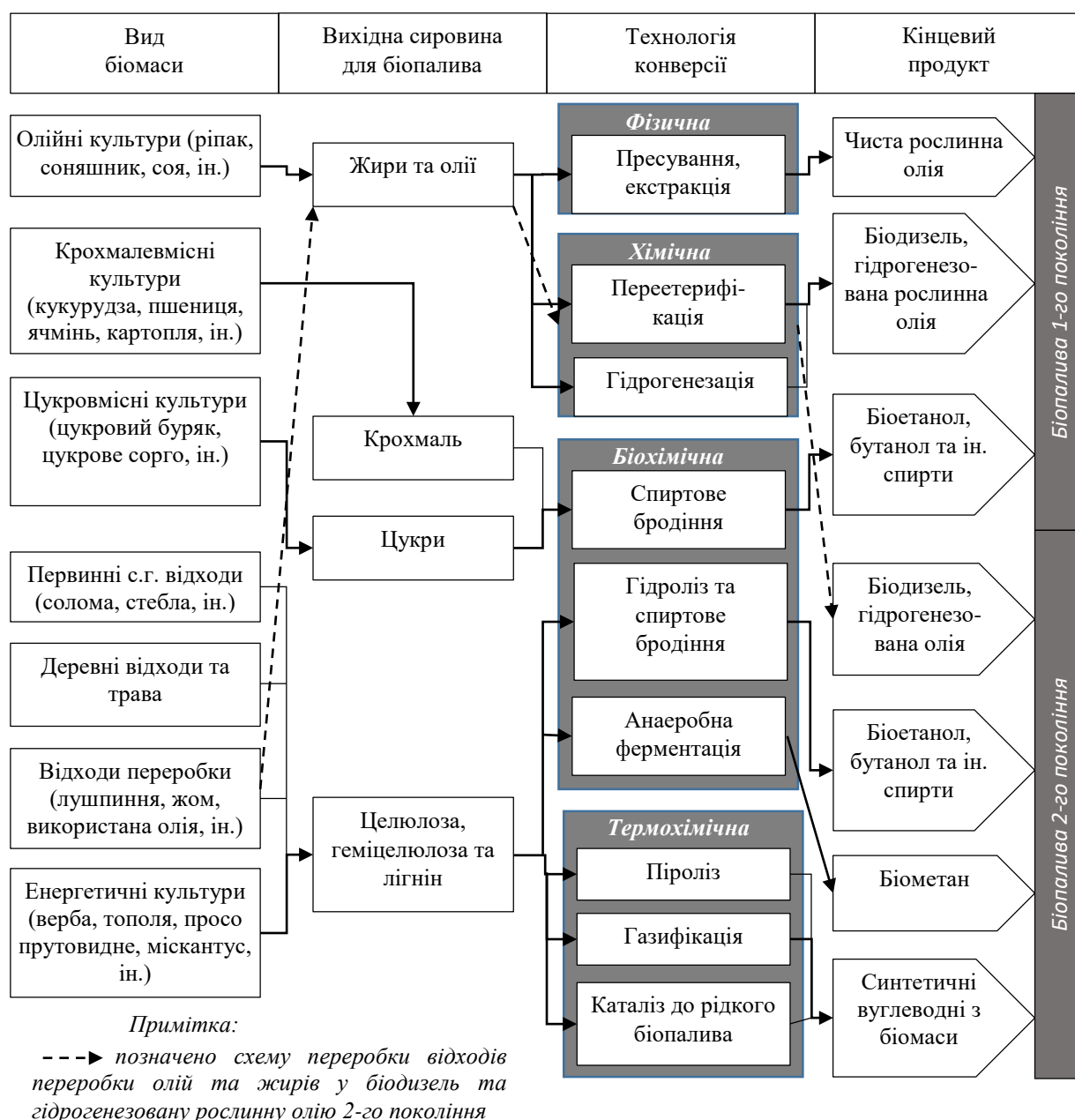


Рис. 1. Технології виробництва рідких біопалив 1-го та 2-го покоління.

Виробництво рідких біопалив другого покоління є важливим з точки зору можливості виконання обов'язкових критеріїв сталості, визначених Директивою 2009/28/ЕС [1]. Одним з критеріїв є скорочення викидів парникових газів від використання біопалив та біорідин. Це скорочення має бути не менше 50% з 01.01.2018 для біопалив та біорідин, вироблених на установках, які вже були в експлуатації до 05.10.2015 включно. Для установок, які розпочали роботу після 05.10.2015, мінімальне скорочення викидів парникових газів має становити 60%. Наразі зазначеним вимогам у більшості випадків можуть відповідати лише біопалива 2-го покоління. Так, наприклад, у Директиві 2009/28/ЕС вказано, що типове скорочення викидів парникових газів від використання біопалив складає (в дужках значення за замовчуванням): для етанолу з соломи пшениці – 87% (85%), для етанолу з деревних відходів – 80% (74%), для дизелю, отриманому з деревних відходів/лісової деревини за технологією Фішера-Тропша – 95% (95%/93% (93%). Аналогічні показники для біопалив 1-го покоління є такими: етанол з цукрових буряків – 61% (52%), етанол з пшениці – 32% (16%), біодизель з ріпаку – 45% (38%), біодизель з соняшника – 58% (51%).

В Україні виробництво «традиційного» біоетанолу і біодизелю свого часу так і не набуло достатньо великого масштабу. За даними Держенергоєфективності, підготовленими для звітування Енергетичному Співтовариству, у 2017 р. в Україні було вироблено всього 3,8 тис. т біоетанолу (у 2016 р. – 8,6 тис. т), а виробництво біодизелю у 2016-2017 рр. взагалі було відсутнє. При цьому навіть за консервативними оцінками, потенціал виробництва рідких біопалив в Україні становить близько 1 млн. т/рік біоетанолу і 180 тис. т/рік біодизелю [6].

Річне споживання бензину моторного в Україні складає близько 2,2 млн. т (у т.ч. у сільському та лісовому господарстві – 145 тис. т), дизельного палива – 5 млн. т (1,4 млн. т) [7]. Часткове заміщення традиційних моторних палив біопаливами сприятиме зменшенню залежності країни від викопних палив і покращенню екологічної ситуації. На підтримку розвитку даного напрямку розроблено проект Закону «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» (№ 7348 від 9.11.2017).

Видається, що в Україні є сенс активно розвивати виробництво і споживання рідких біопалив вже 2-го покоління. З одного боку, це потребує великих зусиль і капіталовкладень, але з іншого боку – це запорука виконання обов'язкових критеріїв сталості для біопалив і інвестування у майбутнє країни.

Підготовка і реалізація конкретного проекту з виробництва рідких біопалив потребує ретельного виконання техніко-економічного обґрунтування (ТЕО). Великий вплив на окупність проекту чинять ряд факторів, у тому числі вартість сировини і можлива ціна продажу готової продукції. Результати попереднього ТЕО виробництва етанолу з соломи, виконане для умов України, представлені в таблиці 3. Отримані результати показують, що за поточних умов (у тому числі співвідношення ціни бензину в Україні і Європі) проект є життєздатним тільки при продажу виробленого біоетанолу на ринку Європи (термін окупності в рамках 5 років). Для можливості прибуткового виробництва і продажу біоетанолу на внутрішньому ринку необхідно працювати в напрямку здешевлення капітальних та операційних витрат проекту.

**Таблиця 3.** Попереднє ТЕО виробництва біоетанолу 2-го покоління в Україні.

| Показники   | Величина                    |                  |
|---|-----------------------------|------------------|
|   | Варіант I**                 | Варіант II***    |
| Потужність по кінцевому продукту                    | 55 000 т/рік                |                  |
| Споживання сировини (солома)*                       | 315 000 т/рік (волога маса) |                  |
| Вартість сировини (солома)                          | 18 євро/т                   |                  |
| Капітальні витрати*                                 | 109 млн. євро               |                  |
| Експлуатаційні витрати*                             | 32 млн. євро/рік            |                  |
| Кредитні кошти (частка капітальних витрат)          | 60%                         |                  |
| Ставка по кредиту                                   | 8%                          |                  |
| Ціна продажу біоетанолу                             | 0,61 євро/л                 | 0,96 євро/л      |
| Дохід від продажу біоетанолу                        | 42 млн. євро/рік            | 67 млн. євро/рік |
| Простий термін окупності                            | > 10 років                  | 4,2 років        |
| Дисконтований термін окупності (ставка дисконту 7%) | > 10 років                  | 5,1 років        |
| Чиста приведена вартість (NPV)                      | ---                         | 179 млн. євро    |
| Внутрішня норма дохідності (IRR)                    | ---                         | 25%              |

\* За даними компаній Biochemtex та Beta Renewables.

\*\* Продаж біоетанолу на ринку України по ціні що відповідає середній ціні на бензин в Україні у серпні 2018 р.

\*\*\* Продаж біоетанолу на ринку Європи по ціні, що відповідає середній ціні на бензин в Європі у серпні 2018 р.

### Висновки

1. Виробництво та використання рідких біопалив другого покоління є важливим і перспективним сегментом біоенергетики України. Розвиток цього напрямку сприятиме досягненню цілей з відновлюваних джерел енергії, визначених Національним планом дій з відновлюваної енергетики до 2020 року.

2. Україна має великий потенціал біомаси, у тому числі лігноцелюлозної сировини, доступної для виробництва рідких біопалив другого покоління. Для можливості успішної реалізації проєктів в цьому секторі необхідне вдосконалення законодавчої бази і виконання науково-практичних робіт, спрямованих на здешевлення відповідних технологій.

### Список літератури

1. *Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources* [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02009L0028-20151005&from=EN>.

2. Скорук О. П., Токарчук Д. М., Всемірнова В. М. Перспективи виробництва біопалива третього покоління. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Економічні науки. 2011. №1 (48). С. 171–176.

3. Скорук О. П., Гримайло І. С. Перспективи формування кластерного виробництва біопалива в Україні. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Економічні науки. 2011. №1 (48). С. 176–180.

4. Гелетуха Г. Г., Железна Т. А., Трибой О. В., Баштовий А. І. Аналіз критеріїв сталого розвитку біоенергетики. Промислова теплотехніка. 2016. Т. 38. №6. С. 49–57.

5. Que N., Jim B. Global production of second generation biofuels: Trends and influences. 2017. Режим доступу до ресурсу: [http://www.dovetailinc.org/report\\_pdfs/2017/dovetailbiofuels0117.pdf](http://www.dovetailinc.org/report_pdfs/2017/dovetailbiofuels0117.pdf).

6. Гелетуха Г. Г., Железна Т. А., Драгнев 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.

7. Паливно-енергетичні ресурси України. Статистичний збірник Державної служби статистики України. 2017 рік. 191 с.

8. Waclaw Romaniuk, Victor Polishchuk, Andrzej Marczyk, Liudmyla Titova, Ivan Rogovskii, Kinga Borek. Impact of sediment formed in biogas production on productivity of crops and ecologic character of production of onion for chives. *Agricultural Engineering* (wir.ptir.org). Krakow. Poland. 2018. Vol. 22. № 1. P. 105–125. doi:10.1515/agriceng-2018-0010.

9. Гелетуха Г. Г., Железна Т. А., Драгнев С. В., Баштовий А. І., Роговський І. Л. Обґрунтування типових проєктів виробництва і споживання паливних

брикетів з агробіомаси в Україні. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ. 2018. Вип. 282. С. 173–181.

### References

1. *Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources*. (2018). <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02009L0028-20151005&from=EN>.

2. Skoruk, O. P., Tokarchuk, D. M., Vsemirnova, V. M. (2011). Perspective of the production of the 3<sup>rd</sup> generation biofuel. *Proceedings of VNAU. Series “Economics”*, 1, 171-176. (in Ukrainian).

3. Skoruk, O. P., Grimaylo, I. S. (2011). Prospects for the formation of cluster biofuel production in Ukraine. *Proceedings of VNAU. Series “Economics”*, 1, 176-180. (in Ukrainian).

4. Geletukha, G. G., Zheliezna, T. A., Tryboi, O. V., Bashtoyi, A. I. (2016). Analysis of the criteria for sustainable bioenergy development. *Industrial Heat Engineering*, V. 38, № 6, 49-57. (in Ukrainian).

5. Que Nguyen, Jim Bowyer et al. (2017). Global production of second generation biofuels: Trends and influences. Available at: [http://www.dovetailinc.org/report\\_pdfs/2017/dovetailbiofuels0117.pdf](http://www.dovetailinc.org/report_pdfs/2017/dovetailbiofuels0117.pdf).

6. Geletukha, G. G., Zheliezna, T. A., Drahnev, S. V., Bashtoyi, A. I. (2018). Prospects for using biomass from agrarian pruning and plantation removal in Ukraine. *Industrial Heat Engineering*, V. 40, № 1, 68-74. (in Ukrainian).

7. *Fuel and energy resources of Ukraine*. Statistical publication of the State Statistics Service of Ukraine. (2017). 191. (in Ukrainian).

8. Waclaw Romaniuk, Victor Polishchuk, Andrzej Marczyk, Liudmyla Titova, Ivan Rogovskii, Kinga Borek. (2018). Impact of sediment formed in biogas production on productivity of crops and ecologic character of production of onion for chives. *Agricultural Engineering* (wir.ptir.org). Krakow. Poland. Vol. 22. № 1. 105-125. doi:10.1515/agriceng-2018-0010.

9. Geletukha G. G., Zheliezna T. A., Drahnev S. V., Bashtoyi A. I., Rogovskii I. L. (2018). Substantiation of typical projects for production and consumption of agribiomass briquettes in Ukraine. *Scientific Herald of National University of Life and Environmental Science of Ukraine. Series: Technique and energy of APK*. Kyiv. Vol. 282. 173-181. (in Ukrainian).

### ПЕРСПЕКТИВИ ПРОИЗВОДСТА И ПОТРЕБЛЕНИЯ БИОТОПЛИВ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ В УКРАИНЕ

Т. А. Железная, С. В. Драгнев, А. И. Баштовой,  
И. Л. Роговский

**Аннотация.** В статье проанализировано текущее состояние производства жидких биотоплив второго поколения в мире и оценена возможность начала такого производства в Украине. Актуальность работы обусловлена тем, что жидкие биотоплива могут

заместить определенную долю моторных топлив, потребляемых в Украине, способствуя таким образом укреплению энергетической независимости страны. Цель исследования – оценить жизнеспособность проекта по производству биоэтанола второго поколения в Украине, задача – выполнить предварительное технико-экономическое обоснование такого проекта. Методы исследования включают обзор существующих в мире установок по производству жидких биотоплив второго поколения, оценку и анализ основных технических и экономических показателей типичного проекта данного вида для условий Украины. Полученные результаты показывают, что в текущих условиях (в том числе соотношении цены бензина в Украине и Европе) проект по производству лигноцеллюлозного биоэтанола является жизнеспособным только при продаже произведенного продукта на рынке Европы (срок окупаемости в рамках 5 лет). Для возможности прибыльного производства и продажи биоэтанола второго поколения на внутреннем рынке необходимо работать в направлении удешевления капитальных и операционных затрат проекта. Украина имеет большой потенциал биомассы, в том числе лигноцеллюлозного сырья, доступного для производства жидких биотоплив второго поколения. Для возможности успешной реализации проектов в этом секторе необходимо совершенствование законодательной базы и выполнение научно-практических работ, направленных на удешевление соответствующих технологий.

**Ключевые слова:** биомасса, биотоплива, жидкие биотоплива, биотоплива второго поколения, лигноцеллюлозное сырье, критерии устойчивости.

#### PROSPECTS FOR THE PRODUCTION AND CONSUMPTION OF SECOND GENERATION BIOFUELS UKRAINE

*Zheliezna T. A., Drahniev S. V., Bashtovyi A. I., Rogovskii I. L.*

**Abstract.** The article analyzes the current state of production of second generation biofuels in the world and evaluates the possibility of launching such production in Ukraine. The work is topical due to the fact that liquid biofuels can replace a certain share of motor fuels consumed in Ukraine, thus contributing to the strengthening of the country's energy independence. The purpose of the study is to assess feasibility of a project on the production of second generation bioethanol in Ukraine; the task is to carry out a preliminary feasibility study for such a project. The research methods include a review of the existing plants that produce second generation biofuels in the world, assessment and analysis of the main technical and economic indicators of a typical project of this type for the conditions of Ukraine. The obtained results show that under the current conditions (including the petrol price ratio in Ukraine and Europe), the project for the production of lingo-cellulosic bioethanol is feasible only with the sale of the product in the European market (the payback period is within 5 years). For the possibility of profitable production and sale of second generation bioethanol in the domestic market, it is necessary to work towards lowering the capital and operational costs of the project. Ukraine has

a big potential of biomass, including lingo-cellulosic feedstock available for the production of second generation biofuels. For the successful implementation of projects in this sector, it is necessary to improve legal basis and conduct scientific and practical work to bring down cost of corresponding technologies.

**Key words:** biomass, biofuels, second-generation biofuels, lingo-cellulosic feedstock, sustainability criteria.