

## МЕЛІОРАЦІЯ, ЗЕМЛЕРОБСТВО, РОСЛИННИЦТВО

УДК 633.15:633.522:620.952(477)

DOI <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2022.11.1>

### ПЕРСПЕКТИВНІ КУЛЬТУРИ ДЛЯ БІОЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ

**ВОЖЕГОВА Р.А.** – доктор сільськогосподарських наук, професор, академік Національної академії аграрних наук,  
*orcid.org/0000-0002-3895-5633*

Інститут зрошуваного землеробства Національної академії аграрних наук  
**ЛАВРИНЕНКО Ю.О.** – доктор сільськогосподарських наук, професор, академік Національної академії аграрних наук,  
*orcid.org/0000-0001-9442-8793*

Інститут зрошуваного землеробства Національної академії аграрних наук  
**МАРЧЕНКО Т.Ю.** – доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник  
*orcid.org/0000-0001-6994-3443*

Інститут зрошуваного землеробства Національної академії аграрних наук  
**МІЩЕНКО С.В.** – доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник  
*orcid.org/0000-0002-1979-4002*

Інститут луб'яних культур Національної академії аграрних наук  
**ПІЛЯРСЬКА О.О.** – кандидат сільськогосподарських наук  
*orcid.org/0000-0001-8649-0618*

Інститут зрошуваного землеробства Національної академії аграрних наук України  
**БАЗИЛЕНКО Є.О.** – здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні  
*orcid.org/0000-0002-7550-4102*

Інститут зрошуваного землеробства Національної академії аграрних наук

**Постановка проблеми.** Одним із найбільш перспективних альтернативних відновлювальних екологічно чистих джерел енергії є біомаса рослинного походження. Значну увагу в Світі приділяють проблемі переробки біомаси з метою отримання біопалива. Біомаса в енергетиці може бути використана безпосередньо шляхом спалювання, або як сировина, після попередньої переробки якої отримують дизельне паливо, етанол або газ. У той час як виробництво біоетанолу та біодизеля порушує ряд питань з підвищення їх рентабельності, з причини високих витрат на виробництво, проте в той же час кількість заводів із виробництва біогазу в ЄС протягом останніх років постійно зростає. Енергетичні рослини відрізняються високою врожайністю і невибагливістю до умов вирощування. В перерахунку на еквівалент енергії, витрати на вирощування таких культур значно менші, ніж вартість енергоносіїв, отриманих від традиційних джерел. Використання рослинної біомаси, за умови її безперервного відновлення, не призводить до збільшення концентрації діоксиду Карбону в атмосфері. Важливим у збільшенні продуктивності біологічного палива є використання всієї рослини, а не лише її частин. Це друге покоління біологічного палива, яке все ще досліджується і розвивається. Використання біологічних видів палива, як відновлюваних ресурсів енергії – один із стратегічних напрямів розвитку людської цивілізації. Важливим є впровадження енергозберігаючих технологій, орієнтованих на отримання максимальної продуктивності посівів певної культури [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Україна має певні проблеми у забезпеченні економіки і населення традиційними енергоресурсами, особливо, нафтою

та газом, які в основному імпортуються з інших країн. Частка відновлюваних джерел енергії в Україні становить 1,6 %, що в 6 разів нижче, ніж у Європейському Союзі [2].

Складна економічна ситуація в Україні та зростання цін на енергоносії, значну частку яких Україна імпортує, спонукають до пошуку альтернативних джерел їх отримання. Основним з них є продукція рослинництва, зокрема: олію ріпаку і соняшнику, конопель використовують для отримання біодизеля, біомасу та рослинні рештки – біогазу, зерно кукурудзи, пшениці, тритикале, коренеплоди буряків цукрових, цукрову тростину, деревну стружку, картоплю – для отримання біоетанолу [3].

Згідно з енергетичною стратегією України до 2030 р. (затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 15.03.2006 р. №145-р) очікується, що енергетичне використання всіх видів біомаси здатне щороку забезпечувати заміщення 9,2 млн т умовного викопного палива, у тому числі за рахунок енергетичного використання залишків сільськогосподарських культур, зокрема соломи – 2,9 млн т умовного палива, дров та відходів деревини – 1,6, торфу – 0,6, твердих побутових відходів – 1,1, одержання та використання біогазу – 1,3, виробництва паливного етанолу та біодизеля – 1,8 млн т умовного палива. Світовий ринок біопалива розвивається швидкими темпами, що пов'язано з проблемами екології і підвищенням цін на традиційні види палива (нафта, газ). Тому значну увагу надають переробці біомаси рослинного походження на біопаливо. Біомаса рослин є відновлюваним, екологічно чистим паливом за умови екологічно раціонального виробництва та використання [4].

Україна належить до енергодефіцитних країн, оскільки щороку споживає близько 200 млн т умовного палива, з якого лише 53 % власного виробництва. Її сучасний паливно-енергетичний комплекс базується на імпорті енергетичної сировини, ціна на яку постійно зростає. Тому для України актуальним є пошук альтернативних джерел енергії з постійним зменшенням частки викопних видів палива. Щорічна потреба в біоетанолі в якості добавки до всього обсягу палив, що виробляються в Україні, становить близько 1 млн. тонн (12,5 млрд. літрів) [5].

Біологічні види палива забезпечують збереження природних ресурсів, поліпшують екологічну ситуацію та створюють передумови енергетичної й економічної незалежності держави. При цьому досить дискусійним залишається питання вибору основних напрямів інвестиційної політики при виробництві біологічних видів палив, а також визначення найбільш конкурентоспроможної сировини для їх отримання [6].

Викопні види палива, такі як нафта, вугілля та природний газ, стали основними джерелами енергії в нинішню епоху. Проте очікується, що ці джерела вичерпаються протягом наступних 40–50 років. Очікувані екологічні збитки, такі як глобальне потепління, кислотні дощі та міський смог, спонукають нас зменшувати викиди вуглецю на 80% і перейти до використання різноманітних відновлюваних джерел енергії, таких як сонце, вітер, біопаливо тощо, що є менш шкідливими для довкілля. Етанол є одним з найбільш перспективних альтернативних видів біопалива. Хоча енергетичний еквівалент етанолу на 68% нижчий, ніж у нафтового палива, згоряння етанолу є чистішим (оскільки він містить кисень), і, таким чином, він визнається потенційною альтернативою біопалива бензину. Етанол часто використовується для змішаного бензину в діапазоні концентрацій 10–85%. Цукрова тростина і кукурудза є основним джерелом етанолу. Тим не менш, цього ледве вистачає для задоволення поточного попиту [7].

Наразі залежно від регіону світу на енергетичні цілі використовують різні культури. У США широке визнання отримали кукурудза та соя, в Європі – ріпак, льон, соя, кукурудза, зернові культури, буряки цукрові, у Бразилії – тростина цукрова, у Південно-Східній Азії – пальмова олія, у Китаї – конопі, соя, соргові та швидкорослі деревні рослини [8].

**Мета дослідження** – вивчення й аналіз світового досвіду вирощування кукурудзи та конопель для використання в біоенергетиці. Оцінка стану і потенціалу кукурудзи й конопель, найважливіших складових раціонального та різноманітного їх використання.

**Матеріали та методика досліджень** – матеріалами досліджень слугували наукові праці з питань поточних та перспективних ресурсних можливостей виробництва біопалива в Україні та світі, енергетичний потенціал кукурудзи та конопель. Методи: кількісне та якісне порівняння, абстрактно-логічний, аналітичний.

**Результати досліджень.** Наразі кукурудза все більше використовується в якості відновлюваної сировини для виробництва різних видів біопалива, тому вона є досить важливою високо енергетичною конку-

рентоспроможною культурою в Україні. Зважаючи на перспективи розвитку сировинної бази для виготовлення біологічних видів палива із кукурудзи, складаються передумови для становлення галузі біоенергетики і в нашій країні [9].

Для виробництва біогазу з енергетичних культур кукурудза як сировина має найбільше значення. Кукурудза як рослина з C4-типом фотосинтезу має найвищий врожайний потенціал. Вирощування і зберігання силосної кукурудзи технічно розвинене і широко оптимізоване [10]. Як субстрат для виробництва біогазу вирощують спеціальні енергетичні гібриди кукурудзи з урожайністю сухої маси 9–30 т/га [11]. Це орієнтовно становить 5 300–9 000 м<sup>3</sup>/га метану залежно від гібриду кукурудзи, кліматичних умов вирощування та фази збирання [12].

Дослідженнями P. Weiland та ін. встановлено кукурудза – це більш однорідний матеріал, ферментація якого у біогазовій установці становить 90%, а різних видів трав лише 50% [13]. На думку I. Lewandowski встановлено, що правильно проведена ферментація 1 кг сухої маси може забезпечити отримання близько 0,4 м<sup>3</sup> біогазу з теплотворною здатністю 16,8–23,0 МДж, а після відділення CO<sub>2</sub> його теплотворна здатність зростає до 35,7 МДж [14]. За даними H. Oechsner і A. Lemmer з 1 тонни біомаси трав можливо отримати 100 м<sup>3</sup> біогазу, а з 1 тонни кукурудзи, зібраної у фазу воскової стиглості, 180 м<sup>3</sup> [15].

В останні роки кукурудза широко використовується для виробництва біоетанолу (з 1 т зерна можна отримати до 470 л етилового спирту). Використання палива на основі біоетанолу, який охопив значну частину світового ринку енергоносіїв, з кожним роком набуває все більшої актуальності, оскільки експерти прогнозують зростання обсягів його виробництва в усьому світі. Цілком очевидно, що енергетичний баланс кукурудзи при виробництві з неї біоетанолу залежить від урожайності зерна та біомаси з одиниці площі: із збільшенням урожайності кукурудзи ефективність виробництва 1 т біоетанолу буде зростати. При цьому ефективність вирощування потребує відповідного обґрунтування, важливе місце в якому посідає розробка бізнес-плану, де враховуються реальні можливості підприємства, перспективи розвитку й засоби його реалізації в умовах нестабільного ринку та глобальної фінансової кризи [16]. В процесі планування максимального економічно-ефективного виробництва паливного етанолу, слід враховувати не лише видові та гібридні розбіжності за вмістом крохмалю, але й за показниками ефективності трансформації сировини в спирт етиловий. Тому проблема підвищення економічної ефективності виробництва кукурудзи набуває все більшої гостроти [17].

Біоетанол традиційно виготовляють шляхом бродіння зерна кукурудзи, цукрової тростини і меляса з буряка. Основними виробниками біоетанолу є США, Бразилія, Франція, Німеччина, Іспанія, Китай та Канада [18]. Етанол виготовляють із сировини, що містить крохмаль, який спочатку перетворюють у цукор, потім у процесі бродіння цукор перетворюється в алкоголь, після чого розчин піддають очищенню та випаровуванню [19].

У Європі головними джерелами сировини для біоетанолу є цукрові буряки, пшениця і кукурудза, у Північній

Америці – кукурудза і пшениця, а в Південній Америці – цукрова тростина, їх загальний врожай, вміст цукру і крохмалю, а також вихід алкоголю визначають придатність цих культур для виробництва біоетанолу [20]. В США близько 40% урожаю кукурудзи (130 млн тонн на рік) переробляється для отримання кукурудзяного етанолу, з 1 тонни кукурудзи виробляють близько 400–500 літрів біоетанолу [21]. Частка біоетанолу в суміші з бензином у США досягає 20 % [22], у Франції – 5 %. Суміш бензину з біоетанолом (10–12%) успішно використовується в Канаді та Бразилії [23]. Традиційним для України є виробництво біоетанолу з відходів цукробурякового виробництва – меляси, проте його можна виробляти і з проміжних продуктів переробки солодких коренеплодів: бурякового (дифузійного) соку, цукрового сиропу, зеленої патоки тощо. Використання якраз проміжних продуктів для виробництва біоетанолу дає змогу збалансувати потреби України в цукрі та зберегти й розвинути земельні площі під вирощування цукрових буряків, що важливо як з точки зору сівозміни, так і з екологічної [24].

Сьогоднішній світовий «біоетанольний бум» спричинив підвищення попиту на зернову кукурудзу. Листостеблова маса при цьому може використовуватися як тверде біопаливо для опалення. Теплотворна здатність стебел кукурудзи складає 12,5 МДж/кг, що на 19% більше, ніж у соломи колосових культур і гілок плодкових дерев. Порівняно із іншими культурами кукурудза має великий вміст крохмалю в зерні та забезпечує найвищий рівень отримання біоетанолу із гектара. З 1 тонни її зерна можна отримати до 470 л етанолу, тоді як із 1 т ячменю – 330, жита – 357, пшениці – 375 л, тритикале – 428 л, сорго – 464 л. Хоча сорго має більший вміст крохмалю, однак його важче гідролізувати, і тому вихід біоетанолу з кукурудзи більший. Для виробництва 1,0 т біоетанолу необхідно 0,64 га пшениці або 0,47 га кукурудзи [25, 26].

У зв'язку з цим великого значення у виробничій сфері набуває оцінювання сучасних гібридів кукурудзи за придатністю використання їх зерна для виробництва біоетанолу [27]. У зерні кукурудзи переважаючим компонентом є вуглеводи (крохмаль, цукри, клітковина, геміцелюлоза та пентозани), вміст яких може становити, залежно від підвиду 60–80 % [28, 29]. Для отримання крохмалю, а відповідно і етанолу, практичну цінність мають чотири підвиди кукурудзи крохмалистий (71,5–82,0%), зубовидний (68,0–75,5 %), напівзубоподібний (66,9–74,2 %) і кремений (65,0–73,0 %) [30, 31].

Біоетанол відіграє важливу роль у структурі використання бензину як добавка. У країнах Європейського Союзу застосовують кілька марок пального з використанням біоетанолу, зокрема E5, E10, E85 (E – від англ. *ethanol*, а цифра – відсоток етанолу у пальному). У Бразилії використовують пальне марки E100 [24]. Сьогодні етанол як джерело палива має позитивний вплив на сільські райони Америки, навколишнє середовище та енергетичну безпеку Сполучених Штатів. Біоетанол із кукурудзи та пшениці вважається біопаливом першого покоління порівняно з іншими джерелами біопалива, оскільки лише гексозний цукор призначений для ферментації. Високого титру етанолу (>5%) можна

отримати з кукурудзи та пшениці, використовуючи простіші етапи (подрібнення/розмелювання, варіння та зрідження) перед ферментацією за допомогою штаму дріжджів (*Saccharomyces cerevisiae*) [32].

Майже весь біоетанол сьогодні виробляється з істивних культур, головним чином з цукрової тростини, кукурудзи та пшениці. Виробництво біоетанолу, особливо з кукурудзи та пшениці, скоротило їх постачання в якості їжі. Це стало джерелом багатьох проблем, так як кукурудза та пшениця є основним продуктом харчування в деяких частинах Африки, Азії та інших регіонів. Наразі гостро стоїть дилема «їжа проти палива» і вимагає негайного вирішення [33].

Метою дослідження Bautista K. та ін. було використання гібриду кукурудзи цукрової (*Zea mays saccharata*) hi-brix 53 для виробництва біоетанолу. Через ферментацію (24–120 год) з використанням дріжджів (*Saccharomyces cerevisiae*) утворився 6,01% (об/об) біоетанолу. Ці результати свідчать про те, що сік стебла гібриду кукурудзи hi-brix 53 є ідеальним субстратом для виробництва біоетанолу [34].

Дослідженнями Yangcheng H. та ін. порівнювали вихід етанолу у звичайної (*Zea mays indurata*) та воскової (*Zea mays ceratina*) кукурудзи за допомогою процесу холодного бродіння. Вихід етанолу позитивно корелює з вмістом крохмалю в зернах звичайної та воскової кукурудзи. Середня ефективність перетворення крохмалю в етанол воскової кукурудзи (93,0%) була значно більшою, ніж у звичайної кукурудзи (88,2%). Восковий кукурудзяний крохмаль складався з дуже малої кількості амілози і переважно амілопектину, який мав коротшу середню довжину ланцюга розгалуження, ніж звичайний кукурудзяний амілопектин [35].

Визначено вплив гібриду кукурудзи на ефективність виробництва етанолу, шляхом проведення скринінгу 258 різних зразків кукурудзи. Зразки кукурудзи розтирали та ферментували за допомогою винокурних дріжджів *Saccharomyces cerevisiae*, які виробляли етанол із кукурудзяного суслу, що давало максимальний вихід 81,33% від теоретичного значення. Відзначено, що зразки кукурудзи з більшим вмістом крохмалю мали нижчу ефективність оцукрювання крохмалю. Цей факт створює негативну кореляцію між змінними «етанол – вміст крохмалю». Найвищий рівень редуруючих цукрів у зерні призвів до підвищення продуктивності етанолу. Порівняння в групах, створених за допомогою багатоваріантних дослідницьких методик (кластерний аналіз, кластеризація k-середніх, PCA), показали, що можна виділити статистично різний кластер з найвищим виходом етанолу (35,6 л етанолу на 100 кг зерна) [36, 37].

За свідченням академіка Я.М. Гадзало, створені гібриди кукурудзи з врожайністю 8,14 т/га та виходом крохмалю з 1 гектара понад 6 тонн. За його словами, одним із найперспективніших напрямів селекції кукурудзи є створення гібридів із високим вмістом крохмалю для виробництва біоетанолу [38].

Вміст крохмалю в зерні залежить від сортових особливостей, тому дослідження змісту виходу біоетанолу та біогазу у гібридів кукурудзи різних груп ФАО є актуальним.

Важливим етапом підвищення виробництва біопалива є дослідження з встановлення потенційної продуктивності гібридів кукурудзи та з розрахунку потенційного виходу біоетанолу та біогазу з гектара.

В Інституті зрошуваного землеробства НААН висівали гібриди кукурудзи різних груп ФАО з метою встановлення їх продуктивності зерна та біомаси для встановлення розрахункового виходу біоетанолу та біогазу.

У наших дослідженнях мінімальні значення розрахункового питомого виходу біогазу на основі вмісту елементів у силосній масі зафіксовано у ранньостиглого гібриду кукурудзи Степовий (ФАО 190) – 6,113 тис. м<sup>3</sup>/га. Максимальними ці показники були у гібриду кукурудзи Арабат (ФАО 430) – 7,041 тис. м<sup>3</sup>/га (таблиця. 1).

Максимальну врожайністю сирови надземної маси у «фазу молочна стиглість зерна» показали гібриди кукурудзи середньопізньої групи Арабат (ФАО 430) та Віра (ФАО 430).

Вихід біоетанолу залежить перш за все від вмісту крохмалю у зерні, що визначається групою стиглості, підвидом гібриду. Так, гібрид Степовий (ФАО 190) має невисоку урожайність зерна та вихід крохмалю, це можна пояснити тим, цей гібрид ранньостиглий та має зерно кременистого типу, що міститься менше крохмалю.

Найбільший вміст крохмалю у середньому за три роки відзначено у групі середньопізніх гібридів:

Тронка – 70,55%, Арабат – 71,21%, Віра – 72,82%, також у цих гібридів відмічався максимальний вихід крохмалю – 9,64, 9,84, 10,07 т/га відповідно (табл. 2).

Дослідженнями встановлено залежність виходу біоетанолу від груп стиглості гібридів, їх сортових особливостей. Вихід біоетанолу у групі ранньостиглих гібридів становив 4,387 тис. л/га, середньоранніх – 4,088–5,207 тис. л/га, а середньостиглих – 5,422–6,105 тис. л/га, середньопізніх 6,151–6,39, тобто використання середньостиглих гібридів кукурудзи забезпечує додатковий вихід цього біопалива 1,764–2,311 тис. л/га порівняно зі скоростиглими формами.

Вирощування гібридів кукурудзи селекції Інституту зрошуваного землеробства НААН середньопізньої групи Тронка (ФАО 380), Арабат (ФАО 430), Віра (ФАО 430) має максимальний розрахунковий вихід біогазу та біоетанолу.

Глобальна енергетична криза на тлі зростання споживання викопного палива, забруднення довкілля та загроза парникового ефекту викликали динамічний розвиток ринків альтернативних джерел енергії. Все більшої актуальності набуває використання біомаси конопель (*Cannabis sativa* L.) як енергетичної сировини, оскільки за теплотворною здатністю стебла конопель (3760) дещо поступаються кам'яному вугіллю (4800), але перевищують аналогічний показник для м'яких

Таблиця 1

**Показники урожайності гібридів кукурудзи та розрахунковий вихід біогазу залежно від генотипу гібриду Т**

Гібрид	Урожайність зерна, т/га	Сира надземна маса у «фазу молочна стиглість зерна», т/га	Суша надземна маса у «фазу фізіологічна стиглість зерна», т/га	Розрахунковий вихід біогазу, тис. м <sup>3</sup> /га
Степовий (ФАО 190)	9,75	47,50	18,39	6,113
Хотин (ФАО 250)	9,86	48,21	18,74	6,204
Скадовський (ФАО 290)	11,57	50,33	20,67	6,477
Асканія (ФАО 320)	12,05	50,25	21,43	6,467
Каховський (ФАО 350)	13,56	52,31	21,94	6,732
Тронка (ФАО 380)	13,67	53,45	22,12	6,879
Арабат (ФАО 430)	13,83	54,71	22,38	7,041
Віра (ФАО 430)	14,22	54,28	23,01	6,985
НІР <sub>05</sub>	0,27	0,85	0,48	

Таблиця 2

**Вміст та вихід крохмалю, розрахунковий вихід біоетанолу у гібридів кукурудзи залежно від генотипу гібриду**

Група стиглості	Гібрид	Вміст крохмалю, %	Вихід крохмалю, т/га	Розрахунковий вихід біоетанолу, тис. л/га
Ранньостигла	Степовий (ФАО 190)	67,99	6,63	4,387
Середньоранній	Хотин (ФАО 250)	68,01	6,71	4,088
	Скадовський (ФАО 290)	68,45	7,91	5,207
Середньостигла	Асканія (ФАО 320)	68,59	8,26	5,422
	Каховський (ФАО 350)	69,21	9,38	6,105
Середньопізній	Тронка (ФАО 380)	70,55	9,64	6,151
	Арабат (ФАО 430)	71,21	9,84	6,223
	Віра (ФАО 430)	72,82	10,07	6,399

порід дерев (2700) і торфу (2030 ккал/кг). Використання стебел конопель на енергетичні цілі є перспективним напрямом ще й тому, що існує можливість використовувати на паливо як усе стебло (але це є менш рентабельним), так і його окремі складові, наприклад, кострицю, яка утворюється в процесі переробки, чи рослинні рештки, що залишаються після збирання насінневих посівів (це є більш економічно вигідно). Також виникло питання про заміну целюлози, одержаної з деревини лісових порід, на конопляну, адже 1 га лісу в Україні дає річний приріст деревини залежно від породи та погодних умов 2,0–2,4 т/га, тоді як окремі сорти конопель мають урожайність сухих стебел вище 14 т/га [39].

Вирощування конопель для отримання насіння в даний час інтенсивно розвивається, але частина біомаси конопель (післяжнивні рештки) залишається невикористаною в полі, саме вона може бути сировиною для біоенергетичного виробництва. Коноплі – культура з порівняно коротким вегетаційним періодом, що становить 3,5–4,5 місяці, та швидким ростом у висоту до 4–5 м, добрий попередник у ланках сівозмін, вони зменшують забур'яненість полів, покращують структуру ґрунту та корисні для рекультивативної деградованих територій. Коноплі також надзвичайно стійкі та чудово адаптуються до різних кліматичних умов. Вони ростуть практично на будь-якому типі ґрунту, не схильні до впливу різних шкідників і збудників хвороб і рідко вимагають використання засобів захисту рослин [40, 41].

Коноплі здатні накопичувати загальну суху біомасу до 20 т і більше, яка може бути використаною для виробництва енергії у таких напрямках: спалювання для обігрівання приміщень чи вироблення електричної енергії; виробництво з біомаси синтетичного газу, що має вміст енергії біля 40% від дизельного пального та може бути використаним для вироблення тепла або електричної енергії; отримання з олії конопель дизельного пального; виробництво гідролізного (ферментного) спирту з целюлози; отримання біогазу (під час анаеробних процесів виділяється метан, який використовують для вироблення тепла й електроенергії) та збагаченого Нітрогеном органічного добрива [39].

Коноплі є конкурентоздатними, порівняно з іншими біоенергетичними культурами, наприклад цукровими буряками, при виробництві біогазу і багаторічними рослинами при виробництві твердого біопалива, оскільки дають високі урожаї біомаси і добрий питомий вихід метану з потенціалом збільшення за умови попередньої обробки сировини [42–45]. Найбільше метану з гектара посіву можна отримати при збиранні конопель восени, коли найбільший урожай біомаси. Вихід енергії з одиниці площі конопель при використанні на тверде біопаливо також найбільший восени, при цьому біомаса даної культури демонструє відмінності у властивостях палива (теплотворна здатність, теплота згорання, зольність тощо) залежно від сезону: ліпшими вони є при збиранні взимку та весною. Наприклад, теплота згорання біомаси конопель, зібраної у серпні – грудні складала 18,4, а у січні – квітні – 19,1 МДж/кг, перевищуючи аналогічні показники топінамбура (16,5) і незначним чином поступаючись міскантусу (19,8 МДж/кг) [46, 47].

Біомаса конопель є перспективною лігноцелюлозною сировиною для виробництва біоетанолу. Вона містить у своїй структурі полімерний комплекс – лігноцелюлозу, який відносно важко розкладається. Лігноцелюлозний комплекс, виявлений у клітинних стінках конопель, складається з целюлози, геміцелюлози та лігніну. Целюлоза та геміцелюлоза після ефективного розкладання можуть стати продуктивними субстратами у процесі ферментації. Лігнін, що складається з похідних фенольних спиртів, є значною перешкодою для утворення біоетанолу з рослинної біомаси, тому виробництво біопалива з лігноцелюлозного матеріалу потребує руйнування клітинної стінки на окремі полімери та гідролізу вуглеводів до мономерних цукрів [48–50].

Загалом виробництво біоетанолу з лігноцелюлозного матеріалу можна розділити на три послідовні етапи: 1) фізична обробка; 2) хімічна попередня обробка; 3) ферментативний гідроліз і ферментація етанолу. Для дезінтеграції біомаси та видалення лігніну часто використовуються кілька методів попередньої обробки, зокрема фізичні, хімічні та біологічні методи. Фізичні методи попередньої обробки лігноцелюлозної біомаси, метою яких є зменшення розміру субстрату, а також полегшення доступу біоактивних речовин до поверхні, зниження ступеня полімеризації та кристалізації лігноцелюлози, включають подрібнення, метод екструзії та попередню обробку ультразвуком. Хімічні процеси включають обробку кислотою (зазвичай сульфатною чи хлоридною), лугом (натрій гідроксидом, кальцій карбонатом), гарячою водою або іншими речовинами. Процес попередньої хімічної обробки повинен вирішити такі проблеми: декристалізувати целюлозу, не викликаючи її гідролізу, деполімеризувати геміцелюлозу, обмежити утворення інгібіторів гідролізу вуглеводів [50–52]. Наступним етапом є ферментативний гідроліз за участі дріжджів. Дія ферментів включає атаку на целюлозу шляхом зв'язування з целюлозними волокнами в аморфних місцях, розрив целюлозних ланцюгів, відсікання великих фрагментів, а потім руйнування їх до отримання полімеру глюкози. Останньою стадією виробництва є ферментація етанолу [50, 53].

Сучасні дослідження щодо використання післяжнивних решток конопель для виробництва біоетанолу спрямовані на встановлення залежності його виходу від способу попередньої обробки сировини (гаряча вода, сульфатна кислота, натрій гідроксид) [50, 54, 55], оскільки до цього часу жоден з описаних методів обробки лігноцелюлозної біомаси одночасно не відповідає поставленим критеріям, від селекційного сорту [50] й агротехнічних прийомів вирощування, зокрема системи удобрення [56]. Розрахунки показують, що з 1 т сухої біомаси конопель можна отримати 149 кг етанолу [54]. Максимальну урожайність стебел конопель можна отримати за умови застосування комплексних фосфорно-калійних й азотних добрив, але при цьому виявлений найменший вихід біоетанолу ( $7,11 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), а найбільший ( $9,93 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) за умови удобрення лише фосфорно-калійними добривами [56].

У контексті формування біоекономіки замкнутого циклу промислової біомаси конопель є цінним ресур-

сом для біопереробних заводів. Потенційно всі основні компоненти конопель можуть знайти застосування у різних технологіях біопереробки, що підвищить цінність традиційного виробництва волокна та насіння даної сільськогосподарської культури. Ті складові біомаси рослин конопель, що часто розглядається як малоцінні залишки, дійсно можуть відігравати ключову роль у стійкому виробництві як біоенергетики, так і цінних біопродуктів. Розрахунки показують, що виробництво біоетанолу з конопель може давати прибуток 75–325 €/га на рік [57].

**Висновки.** Аналіз досліджень проблеми виробництва і впровадження альтернативних відновлюваних джерел енергії засвідчує, що вчені багатьох країн світу активно працюють над її розв'язанням. Використання біопалива та інших поновлюваних джерел енергії розглядається та обговорюється насамперед у контексті охорони навколишнього середовища та прагнення гарантувати умови сталого регіонального і місцевого розвитку. Розвиток альтернативних джерел енергії відкриває нові перспективи для кукурудзи, коноплі на ринку України і розширення площ посіву в усіх регіонах, сприятливих для їх вирощування.

Таким чином, промислове виробництво біологічних видів палива в Україні є надзвичайно важливим фактором, що дозволить не тільки зменшити імпорт енергоносіїв та заощадити значні валютні ресурси, а також зміцнити економічну незалежність держави, покращити екологічну ситуацію, створити нові робочі місця, забезпечити розвиток спиртової галузі та підвищити інтерес аграріїв до вирощування сільськогосподарських енергетичних культур. При цьому потрібно здійснити неодмінне впровадження заходів з інтенсифікації й здешевлення вирощування та збору біосировини.

#### **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:**

1. Железна Т.А., Драгнев С.В., Баштовий А.І., Роговський І.Л. Перспективи виробництва і споживання біопалив другого покоління в Україні. *Machinery & Energetics*. 2018. Vol. 9. № 2. P. 61–66.
2. Перспективи розвитку ринку біоетанолу в Україні. URL: [http://saee.gov.ua/sites/default/files/Schulmeister\\_bioethanol\\_1.pdf](http://saee.gov.ua/sites/default/files/Schulmeister_bioethanol_1.pdf).
3. Бузовський Є.А. Нетрадиційні поновлювальні джерела енергії. Навчально-методичний посібник. Київ: ННІ ПО НАУ, 2007. С. 21.
4. Гелетуа Г.Г., Железная Т.А. Анализ основных положений «Энергетической стратегии Украины на период до 2030 года». *Промышленная теплотехника*. 2006. №5. С. 82–92.
5. Grabovskyi M., Lozinskyi M., Grabovska T., Roubik H. Green mass to biogas in Ukraine—bioenergy potential of corn and sweet sorghum. *Biomass Conv. Bioref.* (2021). <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01316-0>
6. Heiermann M., Plöchl M., Linke B., Schelle H., Herrmann C. Biogas Crops – Part I: Specifications and Suitability of Field Crops for Anaerobic Digestion. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2009. Vol. XI. P. 1087–1093.
7. Vohra M., Manwar J., Manmode R., Padgilwar S., Patil S. Bioethanol production: Feedstock and current technologies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2014, Vol.2, Iss. 1. P. 573–584. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.10.013>
8. Скрипниченко В.А. Інноваційні аспекти виробництва біопалива на Україні: стан, проблеми, перспективи 2009. [http://www.nbu.gov.ua/portal/chem\\_biol/nvnu/2009\\_142\\_1/09sva.pdf](http://www.nbu.gov.ua/portal/chem_biol/nvnu/2009_142_1/09sva.pdf)
9. Грабовский Н.Б., Грабовская Т.А., Курило В.Л. Выращивание сорго сахарного и кукурузы как биоэнергетических культур в совместных посевах. *Вестник Палесскага дзяржаўнага ўніверсітэта. Серыя прыродазнаўчых навук*. Пінск, 2018. № 2. 33 С. 3–10.
10. Amon Th., Kryvoruchko V., Amon B., Bodirosa V., Zollitsch W., Voxberger J. Biogas Production from Energy Maize. *Landtechnik*. 2006. № 2. P. 86–87.
11. Vozhehova R., Marchenko T., Piliarska O., Lavrynenko Y., Halchenko N., Lykhovyd P. (2021). Grain corn product yield and gross value depending on the hybrids and application of biopreparations in the irrigated conditions. *Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development*. 21(4), 611–619.
12. Amon T., Kryvoruchko V., Amon B. Methane production from maize, grassland and animal manures through anaerobic digestion. *Sustainable Organic Waste Management for Environmental Protection and Food Safety II*. 2004. P. 175–182.
13. Weiland P., Billetowski B., Werner P., Dornack C., Stegmann R., Rettenberger G., Faulstich M., Wittmaier M. Trockenfermentation in der Landwirtschaft-Welche Substrate und Techniken finden Anwendung. *Anaerobe biologische Abfallbehandlung*. 2008. p. 235–245.
14. Lewandowski I., Heinz A. Delayed harvest of miscanthus – influences on biomass quantity, quality, and environmental impacts of energy production. *European Journal of Agronomy*. 2003. № 19. P. 45–63.
15. Oechsner H, Lemmer A. Was kann die Hydrolyse bei der Biogasvergärung leisten? VDI-Gesellschaft Energietechnik: Biogas 2009. *Energieträger der Zukunft*. 2009. P. 37–46.
16. Козачок Ю.І. Бізнес-планування вирощування насінневої кукурудзи на біоетанол. *Збірник наукових праць ВНАУ*. Вінниця, 2010. Вип. 42. Т. 1. С. 34–38.
17. Новітні технології біоенергоконверсії: Монографія. Блюм Я.Б., Гелетуа Г.Г., Григорюк І.П. та ін. К.: «Аграр Медіа Груп», 2010. 326 с.
18. Калетнік Г.М. Біопаливо. Продовольча, енергетична та екологічна безпека України: монографія. К. : Хай-Тек Прес, 2010. 516 с.
19. Полішкевич О.Р. Ефективність використання кукурудзи для виробництва альтернативних палив. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2011. Вип. 3(60). С. 76–80.
20. Паламарчук В.Д., Віннік О.В., Коваленко О.А. Вміст крохмалю у зерні кукурудзи та вихід біоетанолу залежно від умов вегетації та факторів технології вирощування. *Аграрні інновації*. 2021. № 5. С. 135–143.
21. Аналітика українського ринку експорту кукурудзи. 2015. Інтернет клуб «Мій бізнес». URL: [http://tradehub.com.ua/ru/5546obzory/view/5383/analitika\\_kukuruzi.htm](http://tradehub.com.ua/ru/5546obzory/view/5383/analitika_kukuruzi.htm).
22. Прутська О.О. Державне регулювання розвитку ринку біопалива в Україні. *Вісник Запорізького аграрного університету*. 2010. № 1. С. 179–182.

23. Бразилія: в 2009 р. Споживання етанолу перевищить споживання бензину. URL: <http://www.agribusiness.kiev.ua/uk/news/ukraine/11-03-008/2875>. 11.03.2008
24. Титко Р., Калініченко В. Відновлювальні джерела енергії (досвід Польщі для України). Варшава : OWG, 2010. 533 с.
25. Каменщук Б.Д. Оцінка гібридів кукурудзи на придатність до виробництва біоетанолу. *Агроном*. 2013. № 3. С. 162–163.
26. Фадеев Л. Кукурудза на пути к миллиарду тонн в год. *Зерно*. 2015. № 4(109). С. 78–84.
27. Каменщук Б.Д. Агроекологічний вплив умов вирощування на зернову продуктивність гібридів кукурудзи різних груп стиглості. Стан та перспективи розвитку рослинницької галузі в умовах змін клімату: 4-та міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених, 1–3 липня 2009 р.: тези доповідей. Харків : ІР ім. В.Я. Юр'єва УААН, 2009. С. 125–126.
28. Дудка Т.В. Доцільність отримання біоетанолу із зерна кукурудзи. *Сортовивчення та охорона прав на сорти рослин*. 2012. № 1. С. 44–47.
29. Рибалка О.І., Червоніс М.В., Моргун Б.В., Починок В.М., Поліщук С.С. Генетичні та селекційні критерії створення сортів зернових культур спирто-дистилятного напрямку технологічного використання зерна. *Фізіологія і біохімія культ. рослин*. 2013., Т. 45. № 1. С. 3–20.
30. Павлов А.Н. Накопление белка в зерне пшеницы и кукурузы. М.: Издательство Наука, 1967. 340 с.
31. Гулюк Н.Г., Жушман А.И., Ладур Т.А., Штыркова Е.А. Интенсивные технологии. Крохмал и крахмалопродукты. Под ред. Н.Г. Гулюка. М. : Агропромиздат, 1985. 240 с.
32. Sujit K., Mohanty, Manas R., Swain. Chapter 3 – Bioethanol Production From Corn and Wheat: Food, Fuel, and Future. *Bioethanol Production from Food Crops. Sustainable Sources, Interventions, and Challenges*. 2019. P. 45–59. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813766-6.00003-5>
33. Karimi K., Chisti Y. Future of bioethanol... *Biofuel Research Journal*. Winter 2015.: 147-147. DOI:10.18331/BRJ2015.2.1.2.
34. Katherine Bautista, Yuwalee Unpaprom, Ramesprabu Ramaraj. Bioethanol production from corn stalk juice using *Saccharomyces cerevisiae* TISTR 5020. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2019. Vol. 41, Iss. 13. <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1549136>
35. Hanyu Yangcheng, Hongxin Jiang, Michael Blanco and Jay-lin Jane Characterization of Normal and Waxy Corn Starch for Bioethanol Production. *J. Agric. Food Chem*. 2013. Vol. 61. Iss.2. P. 379–386. <https://doi.org/10.1021/jf305100n>.
36. Gumienna M., Szwengiel A., Lasik M., Szambelan K., Majchrzycki D., Adamczyk J., Nowak J., Czarnecki Z. Effect of corn grain variety on the bioethanol production efficiency. *Fuel*. 2016. Vol. 164, P. 386–392. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.033>.
37. Грабовський М. Б. Особливості технології вирощування кукурудзи як сировини для виробництва біогазу. *Рослинництво та ґрунтознавство*. Київ, 2019. Т. 10. № 2. С. 12–17.
38. В Україні зареєстровано гібрид кукурудзи для виробництва біоетанолу. URL: <https://superagronom.com/news/4996-v-ukrayini-zareyestrovano-gibrid-kukuruzidlya-virobnitstva-bioetanolu>
39. Коноплі / за ред. М. Д. Мигаля, В. М. Кабанця. Суми, 2011. 384 с.
40. Міценко С.В., Лайко І.М., Ткаченко С.М. Перспективи створення і впровадження сортів промислових конопель на основі конвергентних схрещувань в аспекті сталого розвитку сільських територій. *Стійкий розвиток сільських територій у контексті реалізації державної екологічної політики та енергозбереження*: колективна монографія / за заг. ред. Т. О. Чайки. Полтава, 2021. С. 78–89.
41. Žuk-Gołaszewska K., Gołaszewski J. Cannabis sativa L. – cultivation and quality of raw material. *J. Elem*. 2018. Vol. 23, Iss. 3. P. 971–984. DOI: 10.5601/jelem.2017.22.3.1500.
42. Adamovics A. M., Ivanovs S. A., Dubrovskis V. S. Methane production from industrial hemp. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2019. Vol. 13, Iss. 2. P. 20–26. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-13-2-20-26
43. Asquer C., Melis E., Scano E.A. et al. Opportunities for green energy through emerging crops: biogas valorization of *Cannabis sativa* L. residues. *Climate*. 2019. Vol. 7, Iss. 12. 142. DOI: 10.3390/cli7120142
44. Kraszkiewicz A., Kachel M., Parafiniuk S. et al. Assessment of the possibility of using hemp biomass (*Cannabis sativa* L.) for energy purposes: a case study. *Appl. Sci*. 2019, Vol. 9. 4437. DOI: 10.3390/app9204437
45. Rehman M. S. U., Saif A., Mahmood T. et al. Potential of bioenergy production from industrial hemp (*Cannabis sativa*): Pakistan perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 18. P. 154–164. DOI: 10.1016/j.rser.2012.10.019.
46. Prade T. Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) – a high-yielding energy crop: doctoral thesis. Alnarp, 2011. 93 p.
47. Prade T., Svensson S. E., Mattsson J. E. Energy balances for biogas and solid biofuel production from industrial hemp. *Biomass and Bioenergy*. 2012. Vol. 40. P. 36–52. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.01.045
48. Kim D. Physico-chemical conversion of lignocellulose: inhibitor effects and detoxification strategies: a mini review. *Molecules*. 2018. Vol. 23, Iss. 2. 309. DOI: 10.3390/molecules23020309.
49. Rahikainen J. L., Martin-Sampedro R., Heikkinen H. et al. Inhibitory effect of lignin during cellulose bioconversion: the effect of lignin chemistry on non-productive enzyme adsorption. *Bioresour. Technol.* 2013. Vol. 133. P. 270–278. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.01.075.
50. Wawro A., Batog J., Gieparda W. Chemical and enzymatic treatment of hemp biomass for bioethanol production. *Appl. Sci*. 2019. Vol. 9, Iss. 24. 5348. DOI: 10.3390/app9245348.
51. Kumar A. K., Sharma S. Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review. *Bioresour. Bioprocess*. 2017. Vol. 4. 7. DOI: 10.1186/s40643-017-0137-9.
52. Parawira W., Tekere M. Biotechnological strategies to overcome inhibitors in lignocellulose hydrolysates for ethanol production: review. *Crit. Rev. Biotechnol.* 2011. Vol. 31, Iss. 1. P. 20–31. DOI: 10.3109/07388551003757816
53. Lee C. R., Sung B., Lim K. M. et al. Co-fermentation using recombinant *Saccharomyces cerevisiae* yeast strains hyper-secreting different cellulases for the production

of cellulosic bioethanol. *Sci Rep.* 2017. Vol. 7. 4428. DOI: 10.1038/s41598-017-04815-1

54. Kuglarz M., Alvarado-Morales M., Karakashev D. et al. Integrated production of cellulosic bioethanol and succinic acid from industrial hemp in a biorefinery concept. *Bioresource Technology.* 2016. Vol. 200. P. 639–647. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.10.081

55. Zhao J., Xu Y., Wang W. et al. Conversion of liquid hot water, acid and alkali pretreated industrial hemp biomasses to bioethanol. *Bioresource Technology.* 2020. Vol. 309. 123–135. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123383

56. Frankowski J., Wawro A., Batog J. et al. New Polish oilseed hemp cultivar Henola – cultivation, properties and utilization for bioethanol production. *Journal of Natural Fibers.* 2021. DOI: 10.1080/15440478.2021.1944439

57. Moscariello C., Matassa S., Esposito G. et al. From residue to resource: the multifaceted environmental and bioeconomy potential of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.). *Resources, Conservation and Recycling.* 2021. Vol. 175. 105–120. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105864

#### REFERENCES:

1. Zhelezna, T.A., Dragnev, S.V., Bashtovy, A.I., & Rogovsky, I.L. (2018). Perspektyvy vyrobnytstva i spozhyvannia biopalyv druhoho pokolinnia v Ukraini [Prospects for the production and consumption of second-generation biofuels in Ukraine]. *Machinery & Energetics*, 9(2), 61–66 [in Ukrainian].

2. Perspektyvy rozvytku rynku bioetanolu v Ukraini [Prospects for the development of the bioethanol market in Ukraine]. URL: [http://sae.gov.ua/sites/default/files/Schulmeister\\_bioethanol\\_1.pdf](http://sae.gov.ua/sites/default/files/Schulmeister_bioethanol_1.pdf) [in Ukrainian].

3. Buzovskyi, Ye.A. (2007). Netradytsiini ponovliuvalni dzherela enerhii [Unconventional renewable energy sources]. *Navchalno-metodychnyi posibnyk – Educational and methodical manual.* Kyiv [in Ukrainian].

4. Geletukha, G.G., & Zheleznaya, T.A. (2006). Analiz osnovnykh polozhenyi «Enerhetycheskoi stratehyy Ukrainy na peryod do 2030 hoda» [Analysis of the main provisions of the "Energy Strategy of Ukraine for the period up to 2030"]. *Industrial heat engineering – Promishlennaia teplotekhnika*, 5, 82–92 [in Russian].

5. Grabovsky, M., Lozinsky, M., Grabovska, T., & Roubík, H. Green mass to biogas in Ukraine – bioenergy potential of corn and sweet sorghum. *Biomass Conv. Bioref.* (2021). <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01316-0> [in English].

6. Heiermann, M., Plöchl, M., Linke, B., Schelle, H., & Herrmann, C. (2009). Biogas Crops – Part I: Specifications and Suitability of Field Crops for Anaerobic Digestion. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, XI, 1087–1093 [in English].

7. Vohra M., Manwar J., Manmode R., Padgilwar S., & Patil S. Bioethanol production: Feedstock and current technologies. *Journal of Environmental Chemical Engineering.* March 2014, Vol.2, Iss. 1. P.573–584. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.10.013> [in English].

8. Skrypnychenko, V.A. (2009). Innovatsiini aspekty vyrobnytstva biopalyva na Ukraini: stan, problemy, perspektyvy [Innovative aspects of biofuel production in Ukraine: state, problems, prospects 2009]. [http://www.nbu.gov.ua/portal/chem\\_biol/nvnau/2009\\_142\\_1/09sva.pdf](http://www.nbu.gov.ua/portal/chem_biol/nvnau/2009_142_1/09sva.pdf) [in English].

9. Grabovsky, N.B., Grabovska, T.A., & Kurilo, V.L. (2018). Vyrashchivanie sorgo sahnogo i kukuruzy kak

bioenergeticheskikh kul'tur v sovmetnykh posevah. Growing of sugar sorghum and corn as bioenergy crops in joint crops. *Vesnik Paleskaga dzyarzhaynaga universiteta. Seryya pryrodaznaychyh navuk – Bulletin of Polesie State University. A series of natural sciences.* Pinsk, 2(33), 3–10. [in Ukrainian].

10. Amon, Th., Kryvoruchko, V., Amon, B., Bodiroza, V., Zollitsch, W., & Boxberger, J. (2006). Biogas Production from Energy Maize. *Landtechnik*, 2, 86–87 [in English].

11. Vozhehova, R., Marchenko, T., Piliarska, O., Lavrynenko, Y., Halchenko, N., & Lykhovyd, P. (2021). Grain corn product yield and gross value depending on the hybrids and application of biopreparations in the irrigated conditions. *Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development*, 21(4), 611–619 [in English].

12. Amon, T., Kryvoruchko, V., & Amon, B. (2004). Methane production from maize, grassland and animal manures through anaerobic digestion. *Sustainable Organic Waste Management for Environmental Protection and Food Safety II*, 175–182 [in English].

13. Weiland, P., Bilitewski, B., Werner, P., Dornack, C., Stegmann, R., Rettenberger, G., Faulstich, M., & Wittmaier, M. (2008). Trockenfermentation in der Landwirtschaft-Welche Substrate und Techniken finden Anwendung. *Anaerobe biologische Abfallbehandlung*, 235–245 [in English].

14. Lewandowski, I., & Heinz, A. (2003). Delayed harvest of miscanthus – influences on biomass quantity, quality, and environmental impacts of energy production. *European Journal of Agronomy*, 19, 45–63 [in English].

15. Oechsner, H., & Lemmer, A. (2009). Was kann die Hydrolyse bei der Biogasvergärung leisten? VDI-Gesellschaft Energietechnik: Biogas 2009. *Energieträger der Zukunft*, 37–46 [in English].

16. Kozachok, Yu. I. (2010). Biznes-planuvannia vyroshchuvannia nasinnievoi kukurudzy na bioetanolu [Business planning for growing corn seed on bioethanol] *Zbirnyk naukovykh prats VNAU – Collection of scientific works of VNAU*, 42(1), 34–38 [in Ukrainian].

17. Blum, J.B., Geletukha, G.G., & Grigoryuk, I.P. (2010). *Novitni tekhnolohii bioenerhokonversii [The latest technologies of bioenergy conversion]*. Kyiv [in Ukrainian].

18. Kaletnik, H.M. (2010). *Biopalyvo. Prodovolcha, enerhetychna ta ekolohichna bezpeka Ukrainy [Food, energy and ecological security of Ukraine]*. Kyiv [in Ukrainian].

19. Polishkevich, O.R. (2011). Efektyvnist vykorystannia kukurudzy dlia vyrobnytstva alternatyvnykh palyv [Efficiency of using corn for the production of alternative fuels]. *Visnyk ahranoi nauky Prychornomoria – Bulletin of Agrarian Science of the Black Sea Coast*, 3(60), 76–80 [in Ukrainian].

20. Palamarchuk, V.D., Vinnik, O.V., & Kovalenko, O.A. (2021). Vmist krokhmalii u zerni kukurudzy ta vykhid bioetanolu zalezno vid umov vehehatsii ta faktoriv tekhnolohii vyroshchuvannia [The starch content in corn grain and the yield of bioethanol depending on the growing conditions and factors of cultivation technology]. *Ahrarni innovatsii – Agrarian innovations*, 135–143 [in Ukrainian].

21. Analysis of the Ukrainian corn export market. 2015. My Club Internet Club. Analitika ukrainskoho rynku eksportu kukurudzy. 2015. Internet klub «Mii biznes». URL: [http://tradehub.com.ua/ru/5546obzory/view/5383/analitika\\_kukuruza.htm](http://tradehub.com.ua/ru/5546obzory/view/5383/analitika_kukuruza.htm) [in Ukrainian].



22. Prutska, O.O. (2010). Derzhavne rehuliuвання rozvytku rynku biopalyva v Ukraini [State regulation of biofuel market development in Ukraine]. *Visnyk Zaporizkoho ahrarnoho universytetu – Bulletin of Zaporizhia Agrarian University*, 1, 179–182 [in Ukrainian].
23. Brazylia: v 2009 r. Spozhyvannia etanolu perevyshchyt spozhyvannia benzynu [Brazil: In 2009, ethanol consumption will exceed gasoline consumption]. URL: <http://www.agribusiness.kiev.ua/uk/news/ukraine/11-03-008/2875.11.03.2008> [in Ukrainian].
24. Titko, R., & Kalinichenko, V. (2010). *Vidnovliuvalni dzherela enerhii (dosvid Polshchi dlia Ukrainy) [Renewable energy sources (Polish experience for Ukraine)]*. Varshava: OWG, 533 [in Ukrainian].
25. Kamenshchuk, B.D. (2013). Otsinka hibrydiv kukurudzy na prydatnist do vyrobnytstva bioetanolu [Evaluation of maize hybrids for suitability for bioethanol production]. *Ahronom – Agronomist*, 3, 162–163 [in Ukrainian].
26. Fadeev, L. (2015). Kukurudza na puty k mylyardu tonn v hod [Corn on the way to a billion tons a year]. *Zerno–Grain*, 4(109), 78–84 [in Russian].
27. Kamenshchuk, B.D. (2009). Agroecological influence of growing conditions on grain productivity of maize hybrids of different maturity groups. [Ahroekolohichniy vplyv umov vyroshchuvannia na zernovu produktyvnist hibrydiv kukurudzy riznykh hrup styhlosti] *Stan ta perspektyvy rozvytku roslynnytskoi haluzi v umovakh zmin klimatu: 4-ta mizhnar. nauk.-prakt. konf. molodykh uchenykh, tezy dopovidei – Status and prospects of crop production in the context of climate change: 4th International. scientific-practical conf. young scientists, July 1-3, 2009: abstracts*. Kharkiv: IR them. V.Ya. Yurieva UAAS, 125–126 [in Ukrainian].
28. Dudka, T.V. (2012). Dotsilnist otrymannia bioetanolu iz zerna kukurudzy. [Expediency of obtaining bioethanol from corn grain]. *Sortovyvchennia ta okhorona prav na sorty roslin – Variety research and protection of plant variety rights*, 1, 44–47 [in Ukrainian].
29. Rybalka, O.I., Chervonis, M.V., Morgun, B.V., Pochinok, V.M., & Polishchuk, S.S. (2013). Genetic and selection criteria for the creation of varieties of grain crops of alcohol-distillate direction of technological use of grain [Henetychni ta selektsiini kryterii stvorennia sortiv zernovykh kultur spyрто-dystyliatnogo napriamu tekhnolohichnoho vykorystannia zerna]. *Physiology and biochemistry cult. plants – Fyziolohyia y byokhymyia kult. Rastenyi*, 45, 1, 3–20 [in Ukrainian].
30. Pavlov, A.N. (1967). *Accumulation of protein in wheat and corn grains. [Nakoplenye belka v zerne psheynytsu y kukuruzu]*. M.: Yzdatelstvo Nauka, 340 [in Russian].
31. Huliuk, N.H., Zhushman, A.Y., Ladur, T.A., & Shturkova, E.A. (1985). Yntensyvnie tekhnolohyy [Krokhmal y krakhmaloproduktu]. *Intensive technologies – Starch and starch products*, 240 [in Russian].
32. Sujit K. Mohanty & Manas R. Swain. (2019). Chapter 3 – Bioethanol Production From Corn and Wheat: Food, Fuel, and Future. *Bioethanol Production from Food Crops. Sustainable Sources, Interventions, and Challenges*. 45–59. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813766-6.00003-5> [in English].
33. Karimi, K., & Chisti, Y. Future of bioethanol... *Biofuel Research Journal*. Winter 2015: 147–147. DOI:10.18331/BRJ2015.2.1.2 [in English].
34. Bautista, K., Unpaprom, Y., & Ramesprabu, R. (2019). Bioethanol production from corn stalk juice using *Saccharomyces cerevisiae* TISTR 5020. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 41(13). <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1549136> [in English].
35. Yangcheng, H., Jiang, H., Blanco, M., & Jane, Jaylin. (2013). Characterization of Normal and Waxy Corn Starch for Bioethanol Production. *J. Agric. Food Chem*, 61, 2, 379–386. <https://doi.org/10.1021/jf305100n> [in English].
36. Gumienna, M., Szwengiel, A., Lasik, M., Szambelan, K., Majchrzycki, D., Adamczyk, J., Nowak, J., & Czarnecki, Z. (2016). Effect of corn grain variety on the bioethanol production efficiency. *Fuel*, 164, 386–392. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.033> [in English].
37. Sokolik, S.P. (2016). Perspektyvy vykorystannia kukurudzy na zerno v yakosti biopalyva. [Prospects for the use of corn for grain as a biofuel]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka – Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture*, 173, 168–176 [in Ukrainian].
38. *V Ukraini zareiestrovano hibryd kukurudzy dlia vyrobnytstva bioetanolu [A maize hybrid for bioethanol production has been registered in Ukraine]*. URL: <https://superagronom.com/news/4996-v-ukrayini-zareiestrovano-gibrid-kukurudzidlya-virobnitstva-bioetanolu> [in Ukrainian].
39. Migalya, M. D., Kabancya, V. M. (2011). Konopli [Hemp]. Sumy, 384 [in Ukrainian].
40. Mishchenko, S. V., Laiko, I. M., & Tkachenko, S. M. (2021). *Perspektyvy stvorennia i vprovadzhennia sortiv promyslovykh konopel na osnovi konverhentnykh skhreshchuvan v aspekti staloho rozvytku silskykh terytorii. Stiiki rozvytok silskykh terytorii u konteksti realizatsii derzhavnoi ekolohichnoi polityky ta enerhozberezhennia [Prospects for the creation and implementation of varieties of industrial hemp on the basis of convergent crosses in terms of sustainable development of rural areas. Sustainable development of rural areas in the context of the implementation of state environmental policy and energy conservation]*. Poltava, 78–89 [in Ukrainian].
41. Żuk-Gołaszewska, K., & Gołaszewski, J. (2018). Cannabis sativa L. – cultivation and quality of raw material. *J. Elem.* 23, 3, 971–984. DOI: 10.5601/jelem.2017.22.3.1500 [in English].
42. Adamovics, A.M., Ivanovs, S.A., & Dubrovskis, V.S. (2019). Methane production from industrial hemp. *Agricultural Machinery and Technologies*. 13, 2. 20–26. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-13-2-20-26 [in English].
43. Asquer, C., Melis, E., & Scano, E.A. (2019). Opportunities for green energy through emerging crops: biogas valorization of *Cannabis sativa* L. residues. *Climate*. 7, 12. 142. DOI: 10.3390/cli7120142 [in English].
44. Kraszkiewicz, A., Kachel, M., & Parafiniuk, S. (2019). Assessment of the possibility of using hemp biomass (*Cannabis sativa* L.) for energy purposes: a case study. *Appl. Sci.* 9. 4437. DOI: 10.3390/app9204437 [in English].
45. Rehman, M.S.U., Saif, A., & Mahmood, T. (2013). Potential of bioenergy production from industrial hemp (*Cannabis sativa*): Pakistan perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18. 154–164. DOI: 10.1016/j.rser.2012.10.019 [in English].
46. Prade, T. (2011). Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) – a high-yielding energy crop: doctoral thesis. Alnarp, 93 [in English].

47. Prade, T., Svensson, S.E., & Mattsson, J.E. (2012). Energy balances for biogas and solid biofuel production from industrial hemp. *Biomass and Bioenergy*. 40. 36–52. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.01.045 [in English].

48. Kim, D. (2018). Physico-chemical conversion of lignocellulose: inhibitor effects and detoxification strategies: a mini review. *Molecules*. 23, 2. 309. DOI: 10.3390/molecules23020309 [in English].

49. Rahikainen, J.L., Martin-Sampedro, R., & Heikkinen, H. (2013). Inhibitory effect of lignin during cellulose bioconversion: the effect of lignin chemistry on non-productive enzyme adsorption. *Bioresource Technology*, 133, 270–278. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.01.075 [in English].

50. Wawro, A., Batog, J., & Gieparda, W. (2019). Chemical and enzymatic treatment of hemp biomass for bioethanol production. *Appl. Sci.* Vol. 9, Iss. 24. 5348. DOI: 10.3390/app9245348 [in English].

51. Kumar, A.K., & Sharma, S. (2017). Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review. *Bioresour. Bioprocess.* 4. 7. DOI: 10.1186/s40643-017-0137-9 [in English].

52. Parawira, W., & Tekere, M. (2011). Biotechnological strategies to overcome inhibitors in lignocellulose hydrolysates for ethanol production: review. *Crit. Rev. Biotechnol.* 31, 1, 20–31. DOI: 10.3109/07388551003757816 [in English].

53. Lee, C. R., Sung, B., & Lim, K. M. (2017). Co-fermentation using recombinant *Saccharomyces cerevisiae* yeast strains hyper-secreting different cellulases for the production of cellulosic bioethanol. *Sci Rep.* 7. 4428. DOI: 10.1038/s41598-017-04815-1 [in English].

54. Kuglarz, M., Alvarado-Morales, M., & Karakashev, D. (2016). Integrated production of cellulosic bioethanol and succinic acid from industrial hemp in a biorefinery concept. *Bioresource Technology*. 200. 639–647. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.10.081 [in English].

55. Zhao, J., Xu, Y., & Wang, W. (2020). Conversion of liquid hot water, acid and alkali pretreated industrial hemp biomasses to bioethanol. *Bioresource Technology*. 309. 123–135. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123383 [in English].

56. Frankowski, J., Wawro, A., & Batog, J. (2021). New Polish oilseed hemp cultivar Henola – cultivation, properties and utilization for bioethanol production. *Journal of Natural Fibers*. DOI: 10.1080/15440478.2021.1944439 [in English].

57. Moscariello, C., Matassa, S., & Esposito, G. (2021). From residue to resource: the multifaceted environmental and bioeconomy potential of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.). *Resources, Conservation and Recycling*, 175, 105–120. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105864 [in English].

**Вожегова Р.А., Лавриненко Ю.О., Марченко Т.Ю., Міщенко С.В., Пілярська О.О., Базиленко Є.О. Перспективні культури для біоенергетики України**

**Мета.** Вивчення й аналіз світового досвіду вирощування кукурудзи та конопель для використання в біоенергетиці. Оцінка стану і потенціалу кукурудзи й конопель, найважливіших складових раціонального та різноманітного їх використання. **Методи.** Кількісне та якісне порівняння, абстрактно-логічний, аналітичний. **Матеріалами** досліджень слугували наукові праці з питань поточних та перспективних ресурсних можли-

востей виробництва біопалива в Україні та світі, енергетичний потенціал кукурудзи та конопель. **Результати.** Вирощування кукурудзи разом із продовольчим та кормовим нині асоціюється з новим напрямом використання, таким як переробка на біоетанол, оскільки зерно кукурудзи має високий вміст крохмалю (60–85%). Крохмаль, який міститься в зерні, спочатку розкладається до цукру, потім цей цукор у процесі бродіння перетворюється на алкоголь, після чого розчин піддають очищенню та випаровуванню. Вихід біоетанолу залежить перш за все від вмісту крохмалю у зерні, що визначається групою стиглості, підвидом гібриду. Найбільший вміст крохмалю (НІР<sub>05</sub> гібрид = 0,42%) у середньому за три роки відзначено у групі середньопізніх гібридів: Тронка – 70,55%, Арабат – 71,21%, Віра – 72,82%, також у цих гібридів відмічався максимальний вихід крохмалю – 9,64, 9,84, 10,07 т/га відповідно. У наших дослідженнях максимальну врожайність сирієї надземної маси у «фазу молочна стиглість зерна» показали гібриди кукурудзи середньопізньої групи Арабат (ФАО 430) та Віра (ФАО 430). Максимальні значення розрахункового питомого виходу біогазу на основі вмісту елементів у силосній масі зафіксовано у гібриду кукурудзи Арабат (ФАО 430) – 7,041 тис. м<sup>3</sup>/га. Коноплі є конкурентоздатними, при виробництві біогазу і твердого біопалива, оскільки дають високі урожаї біомаси і добрий питомий вихід метану з потенціалом збільшення за умови попередньої обробки сировини. **Висновки.** Селекційна робота та вирощування вітчизняних сортів конопель та гібридів кукурудзи, є необхідною для України, що дозволить не тільки зменшити імпорт енергоносіїв та заощадити значні валютні ресурси, а також зміцнити економічну незалежність держави, покращити екологічну ситуацію, створити нові робочі місця, забезпечити розвиток спиртової галузі та підвищити інтерес аграріїв до вирощування сільськогосподарських енергетичних культур.

**Ключові слова:** кукурудза, коноплі, гібрид, сорт, крохмаль, біомаса, біогаз, біоетанол.

**Vozhegova R.A., Lavrynenko Yu.O., Marchenko T.Yu., Mishchenko S.V., Piliarska O.O., Bazilenko Ye.O. Perspective culture for bioenergetics of Ukraine**

**Purpose.** Study and analysis of world experience in growing corn and hemp for use in bioenergy. Assessment of the condition and potential of corn and hemp, the most important components of their rational and diverse use. **Methods.** Quantitative and qualitative comparison, abstract-logical, analytical. Research **materials** on current and future resource opportunities for biofuel production in Ukraine and the world, the energy potential of corn and hemp were used as research materials. **Results.** Growing corn together with food and feed is now associated with a new direction of use, such as processing into bioethanol, as corn grain has a high starch content (60–85%). The starch contained in the grain is first decomposed into sugar, then this sugar in the fermentation process is converted into alcohol, after which the solution is subjected to purification and evaporation. The yield of bioethanol depends primarily on the starch content in the grain, which is determined by the group of maturity, a subspecies of the hybrid. The highest starch content (НІР<sub>05</sub> hybrid = 0.42%) on average for three years was observed in the group of mid-late hybrids: Tronka –

70.55%, Arabat – 71.21%, Vira – 72.82%, also in these hybrids there was a maximum starch yield - 9.64, 9.84, 10.07 t/ha, respectively. In our studies, the maximum yield of raw aboveground mass in the "phase of milk ripeness of grain" showed hybrids of corn of the late Late group Arabat (FAO 430) and Vira (FAO 430). The maximum values of the estimated specific yield of biogas based on the content of elements in the silage were recorded in the hybrid maize Arabat (FAO 430) – 7,041 thousand m<sup>3</sup>/ha. Hemp is competitive in the production of biogas and solid biofuels, as it gives high biomass yields and good

specific methane yield with the potential to increase with pre-treatment of raw materials. **Conclusions.** Selection and cultivation of domestic varieties of hemp and maize hybrids is necessary for Ukraine, which will not only reduce energy imports and save significant foreign exchange resources, but also strengthen economic independence, improve the environment, create new jobs, develop the alcohol industry and to increase the interest of farmers in the cultivation of energy crops.

**Key words:** mays, hemp, hybrid, variety, starch, biomasa, biogas, bioethanol.