

УДК 633.78: 620.91: 661.72

DOI <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2019.110-1.2>

## ВИКОРИСТАННЯ ЦИКОРІЮ КОРЕНЕПЛІДНОГО ЯК БІОЕНЕРГЕТИЧНОЇ КУЛЬТУРИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОЕТАНОЛУ

**Бахмат М.І.** – д.с.-г.н., професор,

завідувач відділу рослинництва та кормових виробництв,

Подільський державний аграрно-технічний університет

**Ткач О.В.** – к.т.н., доцент,

завідувач відділу енергозберігаючих технологій та енергоменеджменту,

Подільський державний аграрно-технічний університет

**Моргун А.В.** – к.с.-г.н., старший науковий співробітник,

Дослідна станція тютюнництва Національного наукового центру,

Інститут землеробства Національної академії аграрних наук України

У світі дедалі більше як моторне паливо або добавки до нього використовується біоетанол, виробництво якого зростає щороку. В Україні є можливість замінити частину імпортованих нафтопродуктів біоетанолом, отриманим з власної рослинної сировини. Сировиною для виробництва біоетанолу можуть бути біоенергетичні культури, як крохмаловмісні, так і цукровмісні. Найбільш перспективними з цукровмісних є буряк цукровий, кормовий та картопля. Доцільно також використовувати нетрадиційні культури, такі як цикорій коренеплідний.

Здійснено аналіз техніко-технологічних особливостей виробництва біопалива з рослинної сировини. Узасгалнено світові тенденції розвитку технологій біопалива із рослин, охарактеризовано стан їх ефективності використання в контексті енергетичної та екологічної безпеки нашої держави. Наведено дані щодо ефективності використання технології вирощування і переробки цикорію коренеплідного в біоетанол.

За результатами дослідження середня врожайність цикорію в межах 40,0 т/га, це дасть можливість отримати 3,2-3,5 т/га спирту, або з 1 т – 90-110 л. за цим показником цикорій переважає зерно пшениці та наближається до картоплі. Цикорій містить вуглеводи в формі інуліну, який відноситься до типу складномолекулярних цукрів. Технічна цінність інуліну – нерозчинність в холодній воді, лише під дією кислот і відповідної температури поліцукри гідролізуються і переходять в легкорозчинну форму – фруктозу. Фруктоза без особливих витрат перетворюється на форму густого сиропу в рівному об'ємі і концентрації в 1,5–2 рази більше ніж концентрація бурякового цукру.

Отже, з 1 га посівів цикорію коренеплідного з урожайністю 37,5 т/га та вмістом інуліну 17,0% можна отримати 3,49 т. біоетанолу, що є еквівалентом 87,0 ГДж енергії.

**Ключові слова:** Цикорій коренеплідний, фруктоза, коренеплоди, біопаливо, біоетанол, інулін.

### **Bakhmat M.I., Tkach O.V., Morhun A.V. Use of chicory root as a bio-energy culture for bioethanol production**

In the world, more and more motor fuel or additives use bioethanol, and its production is growing annually. In Ukraine, it is possible to replace some of the imported petroleum products with bioethanol obtained from our own plant materials. Bioenergy crops, both starch-containing and sugar-containing, can be raw materials for the bioethanol production. The most promising sugar-containing crops are sugar beets, fodder and potatoes. It is also advisable to use non-traditional crops, such as chicory root.

The paper makes technical and technological features analysis of the biofuels production from plant materials. It provides a review of global trends in the biofuel technologies development from plants, and describes the effectiveness of their use in the context of energy and environmental safety of our country. The data on the efficiency of using the technology of growing and processing chicory root in bioethanol are presented.

According to the results of the study, the average yield of chicory is in the range of 40.0 t/ha, this will make it possible to obtain 3.2–3.5 t/ha of alcohol, or 1 t – 90–110 l. According to

*this indicator, chicory is dominated by wheat and is approaching potatoes. Chicory contains carbohydrates in the form of inulin, which is a type of folding molecular sugar. The technical value of inulin is insoluble in cold water, only under the influence of acids and the corresponding temperature, the polycysts are hydrolyzed and pass into an easily soluble form - fructose. Fructose without any particular costs turns into a thick syrup form in an equal volume and concentration 1.5-2 times more than the concentration of beet sugar.*

*So, from 1 hectare of chicory root crops with a yield of 37.5 t/ha and an inulin content of 17.0%, 3.49 tons can be obtained. Bioethanol is the equivalent of 87.0 GJ of energy.*

**Key words:** *Root chicory, fructose, root crops, biofuel, bioethanol, inulin.*

**Постановка проблеми.** Для України особливо важливе має значення розвиток біоенергетики. Важливим складником біоенергетичного сектору є енергетичні культури. З огляду на аграрну спрямованість економіки України найбільш швидкими темпами здатна розвиватись біоенергетика. Згідно з енергетичною стратегією України на період до 2030 року очікується, що енергетичне використання всіх видів біомаси здатне щорічно забезпечити заміщення 9,2 млн. т у. п. викопних палив, у тому числі за рахунок енергетичного використання залишків сільськогосподарських культур [1].

Враховуючи сприятливі ґрунтово-кліматичні умови для вирощування рослин, найбільш перспективним видом біоенергетики для України є фітоенергетика, яка базується на біосировині рослинного походження. До основних переваг рослинної біомаси як джерела енергії можна віднести екологічну чистоту викидів, порівняно з викопними видами палива, відсутність негативного впливу на баланс вуглекислого газу в атмосфері. Під час згорання біопалива на основі рослинної біомаси в атмосферу викидається менше вуглекислого газу, ніж поглинається рослинами в процесі фотосинтезу, утворюється в 20–30 разів менше оксиду сірки і в 3–4 рази менше золи порівняно з вугіллям. Побічним продуктом у процесі виробництва рідкого та газоподібного біопалива та в результаті згорання твердого біопалива є органічна речовина, яку можна використовувати в якості добрив.

Сьогодні точиться чимало дискусій щодо заміни бензину та дизпалива іншими енергоносіями, зокрема етанолом і дизпаливом, які отримуються з сировини рослинного походження (біоетанол та біодизельне паливо). Останнє десятиріччя ознаменувалось значним посиленням уваги до пошуку та розвитку ефективних шляхів використання біологічних ресурсів як продуцентів або джерел отримання поновлюваної енергії (біопалив). Це зумовлюється загрозою вичерпання запасів викопних джерел енергії і, відповідно, їх значним подорожчанням у найближчому майбутньому. Ще одним стимулом для розвитку новітніх технологій біоенергоконверсії є потенційна можливість зменшення викидів у атмосферу вуглекислого газу за розширення споживання біоетанолу та біодизеля, покращення властивостей пального за рахунок біологічних домішок. За даними ФАО та ОЕСР, у 2012 р. світове виробництво біоетанолу перевищило 100 млрд літрів (80 млн т). Лідери з виробництва паливного етанолу – Бразилія, США, Китай та Франція – переробляють у біоетанол цукор та крохмаль [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В Україні не використовується наявний потенціал у сфері виробництва біоетанолу. Це пов'язано з відсутністю сучасних підприємств з виробництва паливного біоетанолу. В Україні частка біомаси в енергопостачанні становить близько 0,5%, проте потенційно вона може бути у десять і більше разів вищою. Науковцями встановлено, що біомаса в нашій країні може задовольняти 9% в обсязі споживання первинної енергії, однак досягнення такого рівня потребує залучення значних інвестицій. Україна має потужний сільськогосподарський потенціал, тому доцільним є широкомасштабне виробництво біологічних видів палива. Зокрема, в Україні для виробництва біопалив уже використовуються

різні сировинні джерела: пшениця, кукурудза, цукровий буряк та ріпак. Економічно обґрунтованим в Україні є виробництво біоетанолу шляхом переробки цукрового буряка, пшениці, кукурудзи, картоплі, цукрового сорго. За урожайності цукрового буряка 50 т/га вихід біоетанолу становить 4,02 т/га, при урожайності картоплі 18 т/га вихід біоетанолу становить 1,76 т/га, вихід біоетанолу з кукурудзи – 1,38 т/га за врожайності 6,0 т/га, з сорго за врожайності 7,0 т/га можна отримати 2,03 т/га біоетанолу. Але зараз варто дослідити, які сільськогосподарські культури можуть замінити традиційну кукурудзу, цукровий буряк, пшеницю [3].

У якості сировини для виготовлення біопалива, зокрема біоетанолу, можуть використовуватися різноманітні цукроносні та крохмалоносні сільськогосподарські культури. Поряд із традиційними джерелами сировини для виробництва етанолу (зернові, цукрові буряки) доцільно розвивати вирощування нетрадиційних енергетичних культур, зокрема топінамбура та цикорію коренеплідного, які мають низку переваг. Із 1 тони коренеплодів цикорію під час переробки можливо отримати 80 кг спирту-етанолу, який відповідає всім вимогам і стандартам. Нинішня вітчизняна ціна 1 тони цикорію 350 грн. Як показали дослідження, середня врожайність цикорію в межах – 40,0 т/га, це дасть можливість отримати 3,2–3,5 т/га спирту, або з 1 т – 90–110 л. За цим показником цикорій переважає зерно пшениці та наближається до картоплі. Цикорій містить вуглеводи в формі інуліну, який належить до типу складномолекулярних цукрів. Технічна цінність інуліну – нерозчинність у холодній воді, лише під дією кислот і відповідної температури поліцукри гідролізуються і переходять в легкорозчинну форму – фруктозу. Фруктоза без особливих витрат перетворюється на форму густого сиропу в рівному об'ємі і концентрації в 1,5–2 рази більше, ніж концентрація бурякового цукру.

**Постановка завдання.** Основними пріоритетами біоенергетики є пошук дешевої біосировини, створення необхідної інфраструктури для вирощування енергетичних рослин та перероблення біомаси за допомогою хімічних чи біологічних процесів на різні види біопалива: етанол, метанол, бутанол, біодизель.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Технологія отримання спирту з цикорію коренеплідного була розроблена ще в 1934 році А.А. Фуксом. Дослідження показали, що інулін, який міститься в цикорії, під час гідролізу переходить у цукор – фруктозу. Фруктоза легко зброджується в спирт. Процес переробки цикорію значно простіший, ніж крохмаловмісних продуктів – картоплі, кукурудзи, жита та інших, а порядок обробки сировини і проміжних продуктів виробництва залишається таким же, як і в крохмаловмісній сировині. Разом з інуліном в цикорії міститься в вільному стані фруктоза і глюкоза. Гідроліз інуліну відбувається під час нагрівання його водних розчинів у присутності мінеральних кислот (сірчана або соляна) за звичайного атмосферного тиску. Під час нагрівання розчинів інуліну під тиском без додавання мінеральних кислот, але в присутності слабких органічних кислот соку цикорію також відбувається гідроліз інуліну. Обидва ці методи можуть бути застосовані під час виділення спирту на практиці. Для того щоб бродіння пройшло до кінця і без втрат інуліну, в обох випадках необхідно довести оцукрювання до вмісту 90–95% вільно зароджуваного цукру по відношенню до всього, що міститься в загальній масі. Використання технології запарювання сировини в запарнику «Генце» дозволяє з 1 тони сировини отримати практичний вихід спирту з цикорію 10,98 дкл.

У якості сировини для виготовлення біопалива, зокрема біоетанолу, можуть використовуватися різноманітні цукроносні та крохмалоносні сільськогосподарські культури. Тому економічно і теоретично обґрунтованим в Україні є виробни-

цтво біоетанолу шляхом переробки цукрового буряка, пшениці, кукурудзи, картоплі, цукрового сорго.

Цикорієвий спирт-сирець за своїми якостями нічим не відрізняється від картопляного і хлібного. Вихід спирту з цикорію за однакових умов вирощування більший за вищеперераховані культури залежно від таких чинників:

а) гідроліз інуліну може бути доведений до кінця, на відміну від крохмаловмісних продуктів, оскільки частина крохмалю і декстрину залишаються незбродженими;

б) проміжні продукти, що утворюються під час гідролізу інуліну, подібні декстринам та зброджуються як фруктоза в спирт – це збільшує вихід спирту;

в) збільшення виходу спирту залежить від довжини бродіння та його ефективності (30 годин проти 72 годин крохмаловмісних продуктів).

Тому цикорій може замінити не тільки крохмаловмісні культури для отримання спирту, але і має ряд переваг. Повне їх використання на спиртових заводах дозволить значною мірою спростити і здешевити процес і тим самим дати для промислових цілей дешевий спирт.

Переваги сировини з цикорію такі:

- для оцукрювання інуліну не потрібен цукор;
- бродіння триває 24–30 годин;
- легка розчинність інуліну в теплій воді;
- здатність швидко переходити в цукри та інулін;
- дифузійний метод отримання інуліну;
- безперервне оцукрювання дифузного соку;
- відносна дешева собівартість виробництва.

Технологія виробництва етанолу з цикорію коренеплідного містить такі стадії:

1) вирощування цикорію коренеплідного, його збирання, транспортування до заводів;

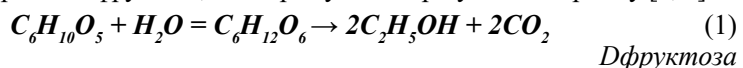
2) приготування стружки;

3) одержання дифузійного соку;

4) бродіння;

5) ректифікація зрілої браги і транспортування готового продукту до споживачів (сховищ).

Показниками, які б охарактеризували вирощування цикорію коренеплідного як біоенергетичної культури, є вихід біоетанолу та вихід енергії. Для розрахунку виходу біоетанолу використовуємо хімічну формулу гідролізу інуліну, який є джерелом біоетанолу в цикорії, та бродіння фруктози, яка отримується в результаті гідролізу [4; 5]:



Згідно з формулою 1 з 1 кг фруктози можна отримати 568 гр. біоетанолу і 432 гр. вуглекислого газу.

Для розрахунку виходу біоетанолу з інуліну беремо за основу формулу, що наведена в методичних рекомендаціях [2], де символ Ц – цукристість, замінимо на Ін – вміст інуліну:

$$M = \frac{Y \cdot \text{Ін} \cdot b \cdot k}{100} ; \quad (2)$$

де, М – вихід біоетанолу з 1 га коренеплодів цикорію, т/га; Y – урожайність коренеплодів, т/га; Ін – вміст інуліну в коренеплодах, %; b – коефіцієнт виходу біоетанолу з фруктози,  $b=0,57$ ; k – коефіцієнт заводського виходу біоетанолу,  $k=0,96$ .

Коефіцієнт  $b$ , який характеризує вихід біоетанолу з цукру, становить  $b=0,57$ , заводський вихід спирту з інуліну за різними літературними даними становить 92–96%, тому коефіцієнт заводського виходу приймаємо  $k = 0,96$  [6].

Для визначення виходу енергії необхідно отриманий біоетанол помножити на його енергоємність:

$$E_M = M \cdot e_M \quad (3)$$

де  $E_M$  – вихід енергії, ГДж/га;  $M$  – вихід біоетанолу з 1 га коренеплодів цикорію, т/га;  $e_M$  – енергоємність біоетанолу, МДж/кг (25 МДж/кг).

Використовуючи вищенаведені формули, проведемо математичний розрахунок для отримання теоретичних даних, виходу енергії.

Для розрахунку виходу енергії нами використано середні показники господарсько-цінних сортів цикорію за останні п'ять років. Середня врожайність коренеплодів цикорію в зоні діяльності Уманської дослідної станції становила 37,5 т/га, вміст інуліну 17,0%. За формулою (2) отримуємо:  $M = 37,5 \times 17,0 \times 0,57 \times 0,96 / 100 = 3,488$  т/га біоетанолу. За формулою (3) розраховуємо кількість енергії, яку можна отримати від спалювання 3,48 т біоетанолу:  $E_M = 3,48 \times 25 = 87,0$  ГДж/га. Отже, з 1 га посівів цикорію коренеплідного з врожайністю 37,5 т/га та вмістом інуліну 17,0% можна отримати 3,49 т біоетанолу, що є еквівалентом 87,0 ГДж енергії.

**Висновки.** Виходячи з проведеного дослідження, можна зробити такі висновки:

- виготовлення біоетанолу з цикорію коренеплідного може скласти конкуренцію біоетанолу, виготовленому з пшениці, картоплі, кукурудзи;
- навіть за умови, що врожайність коренеплодів становитиме 30,0–35,0 т/га, кількість одержаного біоетанолу 3 490 л межує з цукровими буряками (вихід біоетанолу з буряків – 3 600–3 700 л).

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Про альтернативні джерела енергії: Закон України № 2019-VIII від 13.04.2017, ВВР, 2017, № 27-28, ст. 312.
2. Єщенко О.В., Манько О.А. Світові тенденції виробництва біоетанолу та використання для цього в Україні як сировини буряків цукрових та цикорію коренеплідного. *Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва*. 2016. Вип. 88(1). С. 156–164.
3. Bertini СНСМ, Schuster I, Sediyaма T and Barros EG (2006). Characterization and genetic diversity analysis of cotton cultivars using microsatellites. *Genet. Mol. Biol.* 29: S. 321-329.
4. Блюм Я.Б. Біологічні ресурси і технології виробництва біопалива: монографія / Я.Б. Блюм, Г.Г. Гелетуша, І.П. Григорюк та ін. Київ: «Аграр Медія Груп», 2010. 408 с.
5. Biesiada A and Tomczak A (2012). Usability of different types and cultivars of salad chicory [*Cichorium intybus* L. var. *foliosum* (Hegi) Bish.] for spring cultivation. *Acta Sci. Pol. Hortoru.* 11: S.193–204.
6. Борисюк В.О., Маковецький К.М., Ткач О.В. Взаємозв'язок між масою коренеплодів цикорію коренеплідного і вмістом у них інуліну. / Зб. н.п. Вип. 2 / Кн.1. Інститут цукрових буряків. Київ, 2000. С. 151–157.