

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ**

**Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків**

**О.М. Ганженко, Л.А. Правдива, Я.Д. Фучило, О.Б. Хіврич, П.Ю. Зиков,  
М.Я. Гументик, Г.С. Гончарук, В.М. Смірних, Ю.П. Дубовий,  
О.М. Атаманюк, О.Г. Іванова, В.Л. Гамандій, О.В. Яланський**

## **МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

**з вирощування і переробляння цукрового сорго як  
сировини для виробництва різних видів біопалива в  
різних ґрунтово-кліматичних зонах України**

**Київ – 2020**

**УДК 633.62**  
**ББК 42.19**  
**М 54**

**М54** Методичні рекомендації з вирощування і переробляння цукрового сорго як сировини для виробництва різних видів біопалива в різних ґрунтово-кліматичних зонах України / О.М. Ганженко, Л.А. Правдива, Я.Д. Фучило, О.Б. Хіврич, П.Ю. Зиков, М.Я. Гументик, Г.С. Гончарук, В.М. Смірних, Ю.П. Дубовий, О.М. Атаманюк, О.Г. Іванова, В.Л. Гамандій, О.В. Яланський. – К.: Компринт, 2020. – 20 с.

**ISBN 978-617-8007-00-3**

Рекомендовано до друку Вченою Радою Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН, протокол № 17, від «17» листопада 2020 р.

**Рецензент:** Іваніна В.В., доктор с.-г. наук, зав. лабораторії аналітичних досліджень та вегетаційних дослідів Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН.

Адреса редакційної колегії: Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН, вул. Клінічна, 25, Київ – 110, 03110, тел. (044) 275-50-00; факс (044) 275-50-00.

У методичних рекомендаціях викладено вимоги до площ, на яких планується вирощувати цукрове сорго, до строків проведення та показників якості виконання основного, ранньовесняного та передпосівного обробітків ґрунту. Особливу увагу автори приділяють комплексу робіт, пов'язаних із сівбою насіння цукрового сорго. У рекомендаціях розглянуто догляд за посівами та збирання врожаю біомаси цукрового сорго, а також подано пропозиції щодо подальшого переробляння біомаси на різні види біопалива та методику розрахунку виходу біопалива і енергії.

Рекомендації розроблені для сільськогосподарських підприємств, зацікавлених у вирощуванні цукрового сорго для виробництва біопалива. Якісне та своєчасне виконання усіх технологічних процесів, передбачених цими рекомендаціями забезпечить отримання стабільно високих урожаїв зеленої біомаси цукрового сорго.

**УДК 633.62**  
**ББК 42.19**

**ISBN 978-617-8007-00-3**

# **ЗМІСТ**

<b>ВСТУП.....</b>	<b>4</b>
<b>1. Місце в сівозміні .....</b>	<b>5</b>
<b>2 Основний обробіток ґрунту .....</b>	<b>5</b>
<b>3. Весняний обробіток ґрунту.....</b>	<b>6</b>
<b>4. Сівба насіння .....</b>	<b>6</b>
<b>5. Догляд за посівами .....</b>	<b>8</b>
<b>6. Збирання.....</b>	<b>9</b>
<b>7. Переробляння біомаси цукрового сорго .....</b>	<b>11</b>
<b>8. Розрахунок виходу біопалива.....</b>	<b>14</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>17</b>

## ВСТУП

Сорго цукрове (*Sorghum saccharatum*) є найбільш перспективною культурою для виробництва біопалива в світі завдяки його швидким темпам зростання, ранньому дозріванню, більш ефективному використанню води та обмеженій потребі в добривах. Із одного гектара посівів цукрового сорго можна збирати 90...120 т/га цукромісткої біомаси з загальним вмістом цукрів у соці понад 20%. [1, 2, 3, 4].

У зв'язку зі змінами клімату волога може стати головним стримуючим фактором для розвитку сільськогосподарського виробництва, тому цукрове сорго може замінити цукрову тростину (*Saccharum officinarum*) та інші цукроносні та кормові культури, оскільки під час вирощування сорго цукрове споживає у 4 рази менше води порівняно з цукровою тростиною [5, 6, 7]. На формування 1 кг сухої речовини сорго витрачає 300 кг води, тоді як кукурудза – 388 кг, пшениця – 515 кг, соняшник – 895 кг. Біологічні особливості цієї культури дозволяють отримувати стабільну врожайність зеленої маси вирощуючи на бідних ґрунтах та солончаках [8, 9].

Сорго відносять до родини злакових *Poaceae* або *Gramineae*. Рід сорго (*Sorghum Moench.*) об'єднує за різними даними від 34 до 50 видів, які вирощуються в усіх частинах світу, серед яких є дикі й культурні, однорічні та багаторічні. В Україні поширені два види культурного сорго: сорго звичайне (*S. vulgare Pers.*) і сорго трав'янисте, або суданська трава (*S. sudanense Pers.*). [10, 11].

За зовнішнім виглядом, а саме своїм суцвіттям (волоттю), цукрове сорго нагадує просо, але на відміну від нього, сорго має великі, гладкі, прямостоячі, соковиті стебла заввишки до 5 метрів. Стебло складається з окремих міжвузлів, кількість і довжина яких залежать від групи рослин та їх скоростиглості. Серцевина стебла наповнена солодким соком з різним складом цукрів: сахарози, глюкози та фруктози.

Цукрове сорго має добре розвинену кореневу систему, яка проникає у ґрунт на глибину 2,0...2,5 м і розгалужується на 1,2...1,3 м, що обумовлює високу посухостійкість культури. Завдяки потужній кореневій системі цукрове сорго краще ніж інші культури росте на легких піщаних, важких глинистих та інших малопродуктивних ґрунтах, легко витримує близькість ґрунтових вод та засоленість ґрунту.

Зерно цукрового сорго плівчасте або злегка відкрите, волоть розлога. Після вимолочування воно залишається в плівках, тому за кормовими та харчовими якостями поступається зерновому сорго. Найбільш інтенсивно цукор в стеблах накопичується після цвітіння. Максимальна кількість цукрів рослина містить в фазі воскової і повної стиглості зерна [12, 13].

Цукрове сорго є універсальною культурою, сировина якої може використовуватись не тільки у кормовиробництві та харчовій промисловості, але й для виробництва різних видів біопалива (біоетанолу, біогазу, твердого біопалива).

## 1. МІСЦЕ В СІВОЗМІНІ

Технології вирощування сільськогосподарських культур, мають бути спрямовані на підвищення врожаю, його якості та зменшення собівартості кінцевої продукції, а також враховувати біологічні особливості культури, ґрунтово-кліматичні умови, сортове розмаїття, цільове призначення посівів та інші фактори. В отриманні високих і стабільних урожаїв важливе значення мають: вибір поля, застосування раціональної системи обробітку ґрунту та удобрення, оптимальні строки сівби та збирання врожаю.

Сівозміна відіграє важливу роль у поліпшенні водного і поживного режимів ґрунту, забезпечуючи підвищення врожайності та якості сільськогосподарських культур. Цукрове сорго може вирощуватися після будь-яких попередників, однак рекомендованими для нього є ранньостиглі культури, після яких поля не забур'янені. Найкращими попередниками для цукрового сорго є зернобобові та озимі культури. Не рекомендується висівати цукрове сорго після проса, оскільки ці культури мають багато спільних хвороб та шкідників.

Цукрове сорго формує високі врожаї зеленої маси, а отже виносить з ґрунту велику кількість поживних речовин і вологи. Крім того воно відноситься до пізніх культур, після збирання яких залишаються поживні рештки, що ускладнюють проведення наступних обробітків ґрунту. Тому цукрове сорго є не найкращим попередником для інших сільськогосподарських культур [14, 15].

Разом з тим, дотримання рекомендованої технології вирощування (своєчасне проведення комплексу польових робіт, щорічне внесення розрахункових норм органічних і мінеральних добрив та пестицидів) дозволяє вирощувати цукрове сорго впродовж 5 років як беззмінну культуру.

## 2. ОСНОВНИЙ ОБРОБІТОК ҐРУНТУ

У комплексі агротехнічних заходів, що забезпечують одержання високого врожаю цукрового сорго, важливе місце належить правильному основному обробітку ґрунту, завдяки якому створюються сприятливі умови для росту й розвитку рослин. Завдяки основному обробітку ґрунту накопичується волога в осінньо-зимовий період, поліпшується аерація ґрунту, покращуються його агрофізичні і біохімічні властивості, створюються умови для активної життєдіяльності мікроорганізмів [12, 14, 15].

Система основного обробітку ґрунту під цукрове сорго включає лушення дисковими робочими органами на глибину 6...8 см, внесення гербіциду суцільної дії для знищення сходів бур'янів та падалиці, оранку на глибину 25...27 см та вирівнювання поверхні поля (Додаток А).

Після збирання попередника у ґрунті залишається волога, витратам якої через випаровування можна запобігти своєчасним і якісним лушенням стерні. Лушення провокує проростання бур'янів, які знищуються гербіцидами.

Для виконання цього заходу використовують здебільшого дискові знаряддя (лушильники, борони, диска тори та інші). На чистих або забур'янених однорічними бур'янами площах лушення проводять на глибину 6...8 см. На полях, засмічених багаторічними коренепаростковими або кореневищними бур'янами, глибину лушення слід збільшити до 12 см.

Швидкість руху агрегату – 8...12 км/год. Через 2-3 тижні після лущення (в міру відростання бур'янів до 10...15 см) площу необхідно обробити гербіцидом суцільної дії.

Осіньню оранку проводять через 2-3 тижні після внесення гербіциду оборотними плугами на глибину 25...27 см. Швидкість агрегату на оранці – 5...6 км/год. Для вирівнювання поверхні поля, знищення сходів бур'янів та створення сприятливих умов для накопичення ґрунтової вологи у осінньо-зимовий період після оранки бажано провести суцільну культивуацію на глибину 5...7 см комбінованими агрегатами за швидкості руху 10...12 км/год.

Цукрове сорго невибагливе до забезпечення елементами живлення, проте досить активно реагує на внесення органічних і мінеральних добрив. Під цукрове сорго, як біоенергетичну культуру, рекомендується вносити мінеральні добрива у нормі  $N_{60...80}P_{60...80}K_{60}$ .

### **3. ВЕСНЯНИЙ ОБРОБІТОК ҐРУНТУ**

Весняний обробіток ґрунту складається з комплексу заходів, спрямованих на підтримання поверхні поля в розпушеному вирівняному стані, збереження ґрунтової вологи, контролювання чисельності бур'янів та створення сприятливих умов для проростання насіння цукрового сорго і включає ранньовесняне боронування ґрунту та передпосівну культивуацію комбінованими агрегатами. За настання фізичної стиглості ґрунту, проводять ранньовесняне боронування на глибину до 5 см впоперек або під кутом до напрямку оранки в один-два сліди важкими та середніми зубовими чи пружинними боронами. Швидкість руху агрегату при цьому становить 10...12 км/год.

Передпосівна культивуація проводиться безпосередньо перед сівбою насіння і виконується на глибину загортання насіння. Перед передпосівною культивуацією розкидають азотні мінеральні добрива.

### **4. СІВБА НАСІННЯ**

Для вирощування цукрового сорго за інтенсивною технологією слід особливу увагу приділяти якості посівного матеріалу, а саме використовувати насіння зі схожістю не менше 90%, а також використовувати насіння, оброблене захисно-стимулюючими препаратами. Для ефективного хімічного контролювання чисельності бур'янів на ранніх етапах розвитку рослин слід використовувати насіння, оброблене антидотом.

Для забезпечення появи повних дружніх сходів для сівби слід підбирати насіння крупної або середньої фракцій, маса 1000 насінин яких становить 25...30 та 20...24 г відповідно. Особливо негативно на схожість насіння цукрового сорго впливає термін його зберігання. Тому доцільно використовувати насіння, яке зберігалось не більше двох років.

Щоб отримати ранні та дружні сходи, насіння цукрового сорго під час сівби має потрапити на тверде вологе насіннєве ложе та на оптимальну глибину. Для проростання насіння цукрового сорго необхідна менша кількість вологи

порівняно з іншими культурами. Так, для набухання насіння цукрового сорго достатньо лише 35% води від маси самого насіння, тоді як для кукурудзи – 40%, пшениці – 60%. Однак, за мілкої сівби та посушливих весняних умов, насіння цукрового сорго, потрапляючи в суху землю, не дає сходів. Тому оптимальною для більшості регіонів України є глибина загортання насіння 4...6 см (рис. 1).

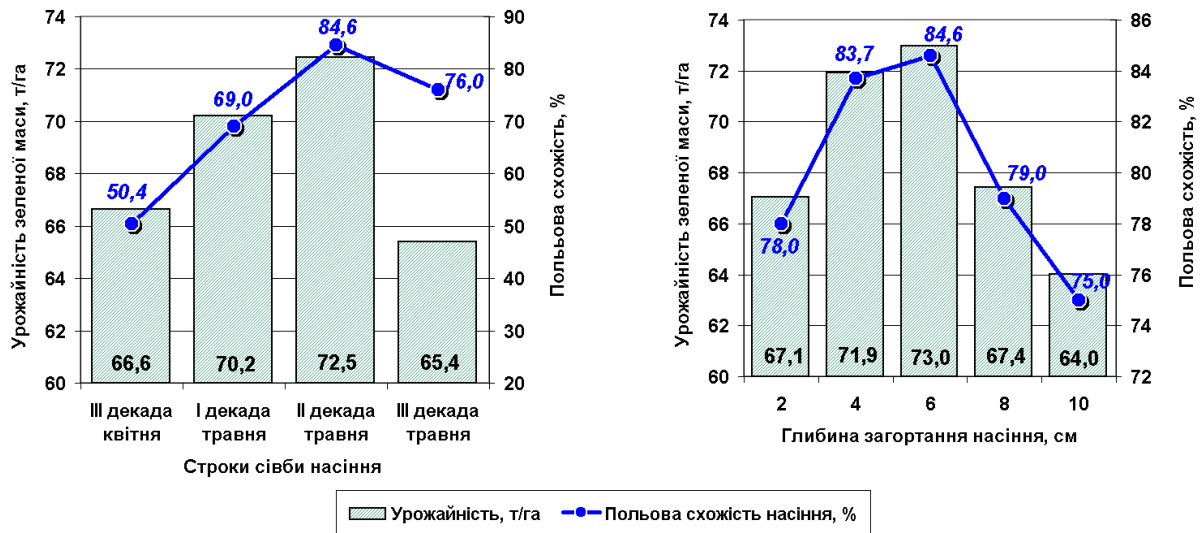


Рис. 1. Вплив строків сівби та глибини загортання насіння на польову схожість та врожайність зеленої маси цукрового сорго

Строки сівби мають важливе значення у водозабезпеченні рослин, а також в оптимізації світлового режиму. Вибір строку сівби залежить від кліматичних умов, стану ґрунту, біологічних особливостей сортів і гібридів. Розпочинати сівбу цукрового сорго слід за середньодобової температури ґрунту на глибині 10 см – 12...14°C. За такої температури сходи цукрового сорго з'являються на 10-12 добу. Для півдня України такі температури спостерігаються в період III декади квітня – II декади травня. За ранніх строків сівби у недостатньо прогрітий ґрунт (7...8°C) сходи з'являються на 30-35 добу, а польова схожість насіння знижується до 30%. Незначні заморозки до -2°C впродовж доби знищують сходи цукрового сорго.

Сівбу насіння рекомендується проводити сівалками точного висіву з шириною міжрядь 45 см або 70 см. Оптимальна густота стояння рослин цукрового сорго для зони достатнього зволоження України становить 220...270 тис.шт./га, нестійкого зволоження – 180...220 тис.шт./га, недостатнього зволоження – 140...180 тис.шт./га. Під час встановлення норми висіву слід враховувати, що польова схожість насіння на 20...25% менша за лабораторну [12].

Після інтенсивних опадів за настання сонячної погоди може утворюватися ґрунтова кірка, яка перешкоджає появі та нормальному розвитку сходів. Якщо ґрунтова кірка утворилась до появи сходів, її руйнують середніми та легкими боронами або кільчато-шпоровими коткаами.

## 5. ДОГЛЯД ЗА ПОСІВАМИ

Головна мета догляду за посівами цукрового сорго полягає в підтриманні посівів у чистому від бур'янів стані, а також у створенні сприятливих ґрунтових умов для розвитку рослин. Цукрове сорго повільно росте на початку вегетаційного періоду, тому сходи бур'янів, які в цей період ростуть швидше, пригнічують сходи рослин сорго. Рихлення ґрунту в міжряддях у посівах цукрового сорго має не менше значення, ніж знищення бур'янів, оскільки рослини сорго погано переносять переушільнення ґрунту.

Агротехнічними заходами догляду за посівами цукрового сорго є: післяпосівне прикочування, міжрядні культивації, підживлення добривами, захист посівів від бур'янів, хвороб і шкідників.

Післяпосівне прикочування збільшує контакт насіння з ґрунтом, підтягує капілярну вологу із нижніх більш вологих шарів ґрунту і вирівнює його поверхню. Прикочування виконують кільчасто-шпоровими котками, які утворюють ребристу поверхню ґрунту, що перешкоджає утворенню ґрунтової кірки.

Цукрове сорго – світлолюбна рослина, яка у перший період свого розвитку росте досить повільно, тому поступається бур'янам у конкурентній боротьбі за сонячне світло. У зв'язку з цим, контролювання забур'яненості повинно здійснюватися на ранніх етапах розвитку рослин з використанням ґрунтових гербіцидів. Щоб уникнути пригнічення рослин цукрового сорго гербіцидами, його насіння обов'язково має бути оброблене антидотом типу Концеп III 960 ЕС, що забезпечує стійкість рослин сорго до дії S-метолахлору, який входить до складу таких гербіцидів, як Дуал Голд 960 ЕС та Примекстра Голд 720 SC.

Ґрунтовий гербіцид Дуал Голд 960 ЕС у нормі 1,6 л/га забезпечує захист рослин сорго впродовж 8-10 тижнів від однорічних злакових бур'янів (мишій, просоподібні) та деяких однорічних дводольних (щириця, грицики та ін.). Його можна вносити під передпосівну культивацію або під час сівби.

Значно ширший спектр дводольних бур'янів контролюють гербіциди комбінованої дії Примекстра Голд 720 SC в нормі 3,0...3,5 л/га, та Примекстра TZ Голд 500 SC в нормі 4,0...4,5 л/га. Ці препарати можна вносити як до сівби, так і після появи сходів.

Для контролювання чисельності злакових і однорічних дводольних бур'янів на початку вегетації рослин цукрового сорго ефективно використовувати гербіцид Гвардіан Тетра, застосування якого можливе як до появи сходів, так і у фазі 2-3 листків культури. Норма витрати – 3,5 л/га. Застосування гербіциду Гвардіан Тетра не потребує попередньої обробки насіння цукрового сорго антидотом.

За застосування хімічних способів контролювання забур'яненості механічні рихлення ґрунту в міжряддях проводяться тільки за потреби для забезпечення оптимальної структури ґрунту (руйнування ґрунтової кірки).

Цукрове сорго краще ніж інші сільськогосподарські культури протистоїть впливу шкідників та хвороб, проте і воно уражується патогенами, чисельність яких слід контролювати старанним виконанням основних агротехнічних заходів та хімічними засобами.



Щоб запобігти ураженню сорго сажкою, а також червоним бактеріозом та гельмінтоспоріозом, його насіння протруюють гранозаном (1,0...1,5 кг/т) або меркураном (1,5...2,0 кг/т) в розрахунку на тонну посівного матеріалу. Протруювання здійснюють у день сівби, оскільки оброблене насіння під впливом діючої речовини втрачає схожість. Проти плямистостей у період вегетації застосовують Бірекс КС (за умови прояву) – 0,5 л/га та Тітул Дуо – 0,25 л/га.

Найпоширеніший шкідник цукрового сорго – попелиця, яка уражує в основному молоді рослини, висмоктуючи з їх листя й стебел сік, у результаті чого ріст рослин уповільнюється, а іноді молоді рослини сорго у фазі до 4-5 листочків навіть гинуть. Для захисту посівів цукрового сорго в період вегетації від попелиці застосовують Енжіо 247 SC (0,18 л/га).

У період викидання волотей, рослини цукрового сорго іноді пошкоджує кукурудзяний метелик. Для контролювання чисельності цього шкідника застосовують Децис, 2,5% к.е. (0,5...0,7 л/га), Децис Форте, 12,5% к.е. (0,05...0,08 л/га), Карате 050 ЕС, к.е. (0,2 л/га), Карате Зеон 050 CS, м.к.с. (0,2 л/га), Штефесін, 2,5% к.е. (0,5–0,7 л/га). Але ефект від використання інсектицидів залежить від точності визначення строків обробок. Найвища ефективність досягається за внесення препаратів під час проникнення перших гусениць шкідника у стебла, тобто через 2-3 тижні після початку льоту метелика або під час масового льоту [5].

## 6. ЗБИРАННЯ

Строки та спосіб збирання біомаси цукрового сорго залежать від сортових особливостей, погодних умов, а також від подальшого використання зібраної біомаси: для виробництва біогазу, біоетанолу та твердого біопалива.

Якщо біомаса використовується як сировина для виробництва біогазу, то цукрове сорго слід збирати у період максимальної врожайності зеленої маси, яка досягається у фазі формування і наливу зернівки (рис. 2). У цей період суха речовина біомаси становить 20...25%, що є оптимальним для виробництва біогазу.

У зоні достатнього зволоження, з метою отримання більшої кількості біомаси для біогазу з одиниці площі цукрове сорго можна збирати двічі: наприкінці липня (у період інтенсивного росту) та на початку жовтня. У цьому випадку загальна кількість отриманої зеленої біомаси цукрового сорго сягатиме 150 т/га.

Для виробництва біогазу можна використовувати всю біомасу цукрового сорго (стебла, листя та волоті), тому збирання цукрового сорго здійснюється звичайними силосозбиральними комбайнами КСК-600, Дон-750, Jaguar 900, Mammut 8790, John Deere 8000 і інші.

У випадку використання біомаси цукрового сорго в якості сировини для виробництва біоетанолу та твердого біопалива збирання врожаю слід розпочинати у період максимального накопичення цукрів у соці стебел. Як правило це відбувається наприкінці вересня у фазі повної стиглості зерна (див. рис. 2).

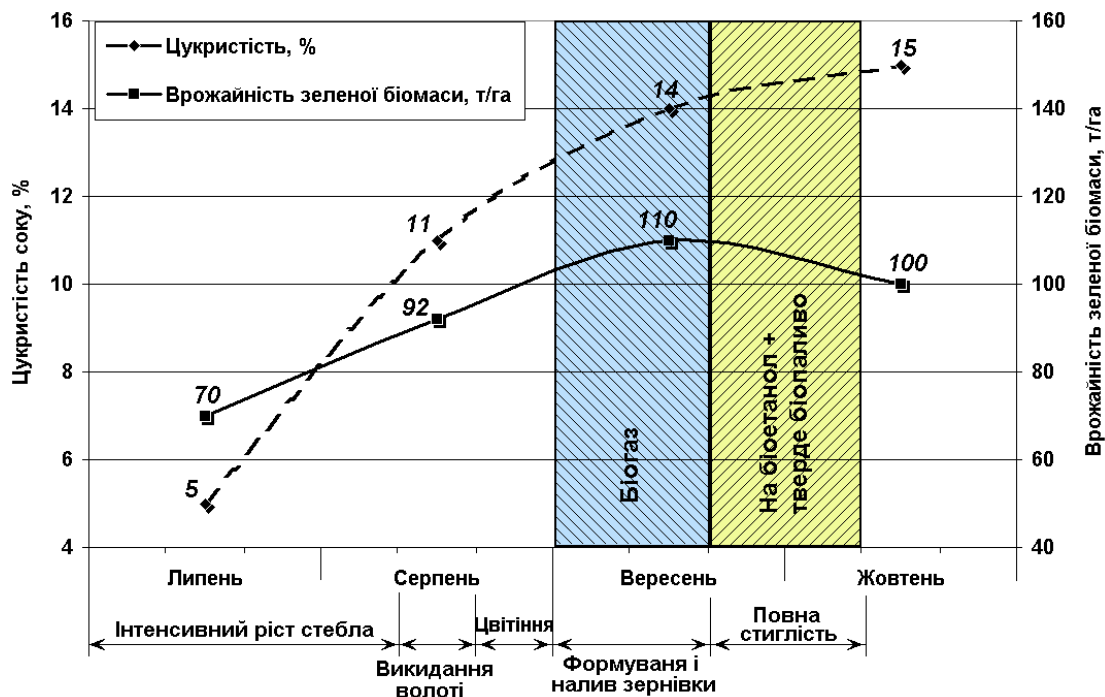


Рис. 2. Динаміка цукристості та врожайності зеленої маси цукрового сорго

Під час збирання біомаси на біоетанол слід відокремлювати стебла від листя та волотей, оскільки їх наявність негативно впливатиме на вихід та якість соку. При цьому, стебла цукрового сорго не слід інтенсивно подрібнювати, так як це призводитиме до втрат цукромісткого соку під час транспортування та зберігання біомаси. Розмір подрібнених частин стебла не повинен бути меншим 15...25 см. Збирання стебел цукрового сорго на біоетанол здійснюють комбайнами для збирання цукрової тростини, такими як Case Austoft 8000, Claas Venter, John Deere 3522 та іншими (рис. 3).

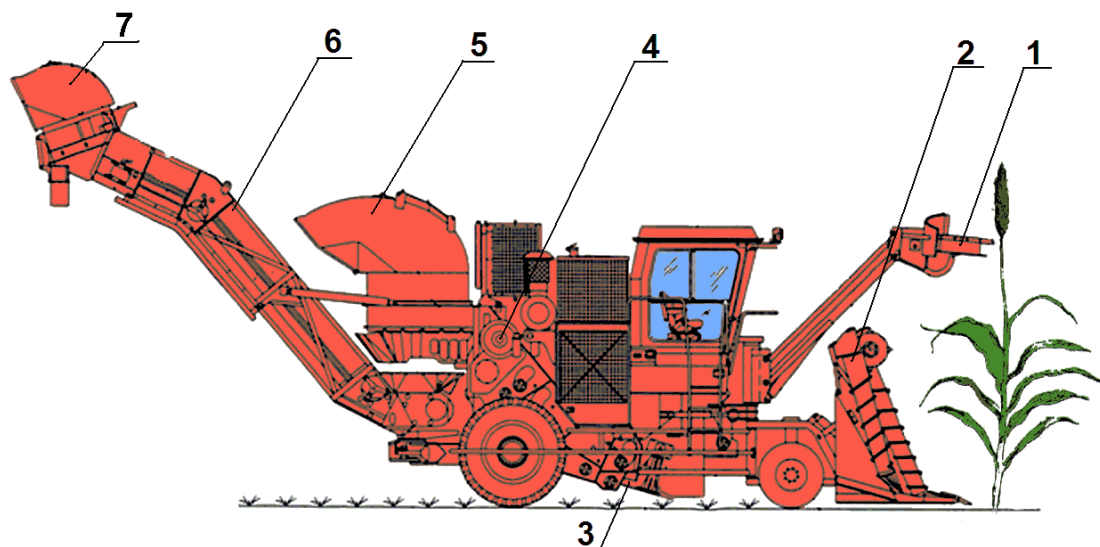


Рис. 3. Комбайн для збирання стебел цукрового сорго на біоетанол:  
 1 – ріжучий апарат для волоті; 2 – стебlopідіймачі; 3 – ріжучий апарат для стебел;  
 4 – подрібнювач; 5 – перший пневмосепаратор листя; 6 – елеватор для навантаження біомаси; 7 – другий пневмосепаратор листя

Комбайн для збирання цукрового сорго на біоетанол працює наступним чином: волоті рослин відокремлюються різальним апаратом 1 та залишаються на полі, стебла за допомогою стеблорізачів 2 подаються на ріжучий апарат 3. Зрізані стебла транспортуються до двоножового барабанного подрібнювача 4, після чого подрібнені стебла разом з листям потрапляють у перший пневмосепаратор 5, на якому відбувається попередній етап очистки маси від листя. У кінцевій частині елеватора для навантаження біомаси 6 встановлено другий пневмосепаратор 7, за допомогою якого відбувається остаточний етап відокремлення листя від стеблової біомаси. Відокремлене на першому та другому етапах листя залишається на поверхні поля, а очищена стеблова біомаса цукрового сорго подається до транспортного засобу, яким вона доставляється до місця переробляння. Зібрану в такий спосіб біомасу цукрового сорго можна зберігати не більше 2-3 діб.

## 7. ПЕРЕРОБЛЯННЯ БІОМАСИ ЦУКРОВОГО СОРГО

Цукрове сорго – універсальна культура, сировина якої може використовуватись як у кормовиробництві та харчовій промисловості, так і для виробництва біопалива (рис. 4). Сік зі стебел цукрового сорго, за загальним вмістом цукрів не поступається цукровій тростині, але на відміну від останньої, окрім сахарози, містить значну частку глюкози, фруктози та розчинного крохмалю, який перешкоджає кристалізації. Тому із соку цукрового сорго виготовляють не кристалізований, а рідкий цукор – сироп.

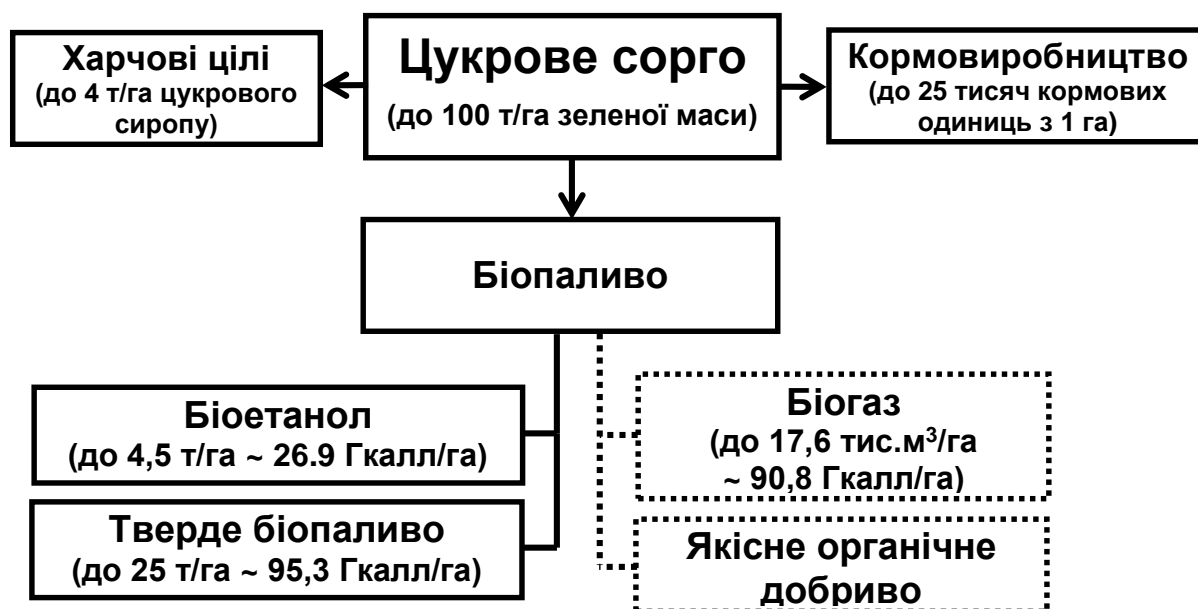


Рис. 4. Комплексне використання сировини цукрового сорго

Завдяки високому вмісту цукрів сік цукрового сорго використовується для виробництва біоетанолу. Сучасні вітчизняні високопродуктивні гібриди цукрового сорго дозволяють отримати до 4,5 т/га біоетанолу, що еквівалентно 112,5 ГДж/га (26,9 Гкал/га) енергії (рис. 5а). Після видалення соку вологість стебел цукрового сорго не перевищує 40%, тому вони можуть бути сировиною

для виробництва твердого біопалива (паливних гранул або брикетів). Сухої біомаси цукрового сорго, зібраної з 1 га достатньо для виробництва 25 т твердого біопалива, під час згоряння якого виділяється 400 ГДж (95,3 Гкал) теплової енергії. Таким чином, загальний вихід енергії, яку можна отримати з 1 га посівів цукрового сорго перевищує 500 ГДж, що свідчить про перспективність використання цієї культури для біоенергетики.

Зелена біомаса цукрового сорго може використовуватись для виробництва біогазу. Завдяки високій продуктивності цукрове сорго забезпечує найбільший серед інших сільськогосподарських рослин вихід біогазу з одиниці площі – до 17,6 тис.м<sup>3</sup>/га з вмістом метану 60% (рис. 5б). Залишки біогазової ферментації містять значну кількість легкодоступного для рослин азоту, фосфору, калію та мікроелементів і можуть використовуватись в якості добрив, які за своєю дією схожі на мінеральні добрива.

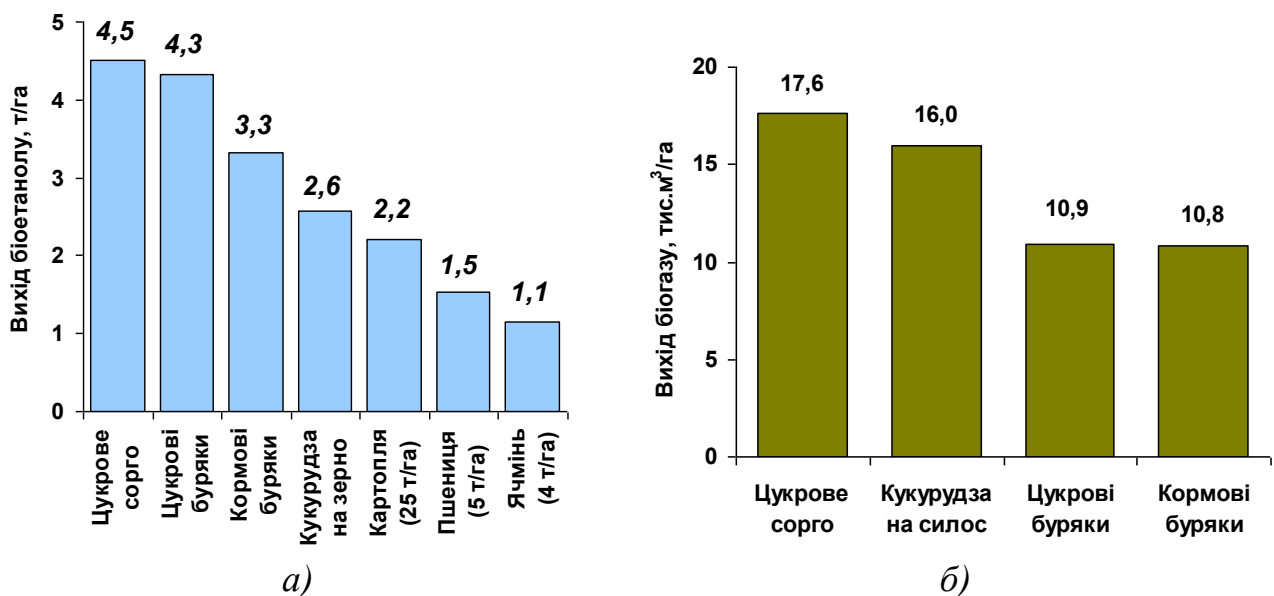


Рис. 5. Потенційний вихід біопалива з 1 га різних сільськогосподарських рослин: а) – біоетанолу; б) – біогазу

Як компонент біомаси для виробництва біогазу подрібнена зелена маса цукрового сорго подається або безпосередньо від кормозбирального комбайна, або у вигляді попередньо заготовленого силосу.

Для більш ефективного використання біогазових установок зібрану біомасу цукрового сорго слід засилосувати. Збирання цукрового сорго на біогаз відбувається у фазу формування і наливу зернівки, для якої характерно низький вміст сухої речовини. Внаслідок цього під час силосування, відбувається витікання частини соку та активне бродіння з утворенням великої кількості кислот і спиртів, що негативно впливає на якість силосу та зменшення кількості отриманого з нього біогазу. Щоб цього уникнути, під час силосування до цукрового сорго слід додавати інші, більш сухі компоненти, наприклад соломку.

Перед подачею зеленої маси чи силосу цукрового сорго до біогазового реактора (метантенка) її слід подрібнити, щоб інтенсифікувати процес метаного зброджування та уникнути забивання рухомих елементів метантека рослинними залишками.

Для виробництва біоетанолу використовують стебла цукрового сорго порізані на частини завдовжки 15...25 см і очищені від листків. Це досягається за рахунок використання комбайнів для збирання цукрової тростини. Зібрана в такий спосіб біомаса доставляється до місця перероблення або безпосередньо від збирального комбайна, або з місця тимчасового зберігання.

З транспортного засобу стеблова біомаса цукрового сорго потрапляє у приймальний бункер 1, з якого за допомогою елеватора 2 подається до подрібнювача 3 (рис. 6), де відбувається інтенсивне подрібнення частин стебел цукрового сорго для того, щоб збільшити відсоток виходу соку. Подрібнена біомаса за допомогою елеватора 4 подається на прес 5, який складається із трьох вальців. Для підвищення інтенсивності видавлювання соку вальці преса мають ребристу поверхню.

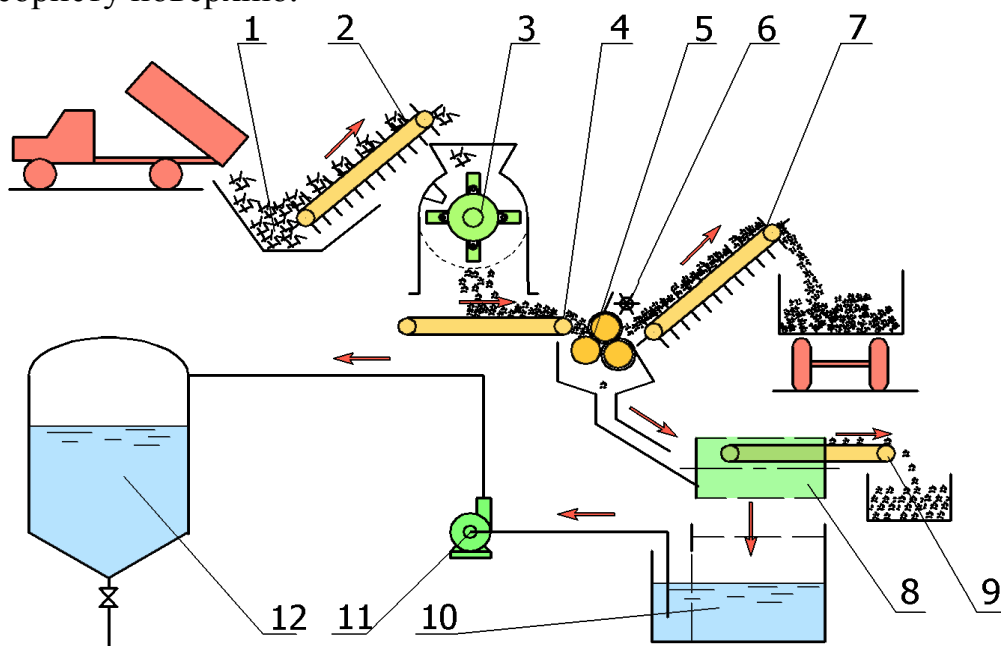


Рис. 6. Схема перероблення біомаси цукрового сорго на біоетанол:

- 1 – приймальний бункер; 2 – елеватор подрібнювача; 3 – подрібнювач біомаси сорго;
- 4 – елеватор подрібненої біомаси; 5 – трьохвальцевий прес;
- 6 – бітер; 7 – елеватор багаси; 8 – фільтр соку; 9 – транспортер залишків фільтрації; 10 – проміжна ємкість; 11 – насос; 12 – резервуар для соку

Видавлений сік самопливом потрапляє на фільтр 8, а багаса знімається бітером 6 з вальця преса на елеватор 7, яким вона навантажується в транспортний засіб. Відфільтрований сік через додатковий фільтр потрапляє в проміжну ємкість 10, а залишки стебел подаються транспортером 9 або на повторне віджимання, або навантажуються в транспортний засіб. З проміжної ємкості 10 за допомогою насоса 11 сік цукрового сорго подається в резервуар 12 і може транспортуватись для подальшої переробки на біоетанол.

Свіжий, не пастеризований сік цукрового сорго може зберігатись не більше 2...3 годин, тому розрив у часі між видавлюванням соку і його подальшою переробкою на біоетанол повинен бути мінімальним. Застосування хімічних консерваторів погіршує процес отримання етанолу, а термічна обробка соку негативно впливає на собівартість та енергоемність готової продукції.

## 8. РОЗРАХУНОК ВИХОДУ БІОПАЛИВА

Інтегральним показником, який характеризує ефективність вирощування цукрового сорго на енергетичні цілі, є вихід різних видів біопалива (біоетанолу, біогазу, твердого біопалива) та вихід енергії.

За результатами досліджень, проведеними в ІБКіЦБ НААН [16, 17] встановлено, що сік зі стебел цукрового сорго містить в середньому близько 15% сухої речовини, з якої 13% – сахароза, 1% – моноцукрів та 1% інших сухих речовин (крохмаль, мінеральні речовини). Таким чином, біоетанол із соку цукрового сорго виробляється переважно із сахарози, а його вихід можна розрахувати за формулою (1):

$$M = \frac{U \cdot n \cdot S \cdot b \cdot k}{100}, \quad (1)$$

де,  $M$  – вихід біоетанолу з 1 га цукрового сорго, т/га;

$U$  – урожайність стебел, т/га;

$n$  – коефіцієнт виходу соку,  $n=0,5$ ;  $S$  – загальний вміст цукрів у соці, %;

$b$  – коефіцієнт виходу біоетанолу з сахарози,  $b=0,53$ ;

$k$  – коефіцієнт заводського виходу біоетанолу,  $k=0,9$ .

Для розрахунку виходу біоетанолу використовуємо формулу спиртового бродіння:  $C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O = 4C_2H_5OH + 4CO_2$ , згідно якої з 1 кг сахарози отримуємо 0,53 кг біоетанолу, а решта 47% – вуглекислий газ. Отже коефіцієнт  $b$ , який характеризує вихід біоетанолу з сахарози становить 0,53. Сучасні заводи допускають втрати біоетанолу на рівні 9...15%, тому коефіцієнт заводського виходу  $k$  приймаємо 0,9.

Сік зі стебел цукрового сорго отримують переважно за допомогою вальцевих пресів. Нашими дослідженнями встановлено, що вихід соку залежить від сортових особливостей цукрового сорго та від способу попередньої підготовки біомаси і коливається в значних межах – від 37,1 до 69,9% від маси стебел [18]. Тому для розрахунку виходу біоетанолу приймаємо вихід соку 50%, тобто  $n=0,5$ .

Щоб визначити вихід енергії з біоетанолу, отриманого з одного гектара посівів цукрового сорго, необхідно масу отриманого біоетанолу помножити на його енергоємність:  $E_M = M \cdot e_m$ , де  $E_M$  – вихід енергії, ГДж/га;  $M$  – вихід біоетанолу з 1 га цукрового сорго, т/га;  $e_m$  – питома теплота згорання, ГДж/т (25 ГДж/т).

### Приклад розрахунку:

Урожайність зеленої біомаси стебел цукрового сорго становить 80 т/га, цукристість соку – 16%. За формулою (1) вихід біоетанолу становить:  $M = 80 \cdot 0,5 \cdot 16 \cdot 0,53 \cdot 0,9 / 100 = 3,05$  т/га. Розраховуємо кількість енергії, яку можна отримати від спалювання 3,05 т біоетанолу:  $E_M = 3,05 \cdot 25 = 76,25$  ГДж/га.

Отже, з 1 га посівів цукрового сорго за врожайності стебел 80 т/га та цукристості соку 16% можна отримати 3,05 т біоетанолу, що еквівалентно 76,25 ГДж енергії.

Після видалення соку, зі стебел цукрового сорго можна виготовляти тверде біопаливо (паливні гранули, брикети). Вихід твердого біопалива розраховується за формулою:

$$T = \frac{U \cdot c \cdot (100 + w)}{10000}, \quad (2)$$

де  $T$  – вихід твердого біопалива, т/га;  $U$  – врожайність зеленої біомаси стебел цукрового сорго, т/га;  $c$  – суха речовина біомаси стебел, %;  $w$  – вологість твердого біопалива, %

Згідно з європейськими вимогами тверде біопаливо може мати вологість до 10 % [19], тому приймаємо  $w=10$  %.

Вихід енергії визначають як добуток маси твердого біопалива, отриманого з 1 га посівів цукрового сорго, на його питому теплоту згорання:  $E_T = T \cdot e_T$ , де  $E_T$  – вихід енергії з твердого біопалива, ГДж/га;  $M$  – вихід твердого біопалива з 1 га цукрового сорго, т/га;  $e_T$  – питома теплота згорання твердого біопалива, МДж/кг. При цьому, питома теплота згорання твердого біопалива буде залежати від його вологості та зольності і визначатиметься за формулою:

$$e_T = \left( \frac{100 - W - Z}{100} \right) \cdot e_{T0}, \quad (3)$$

де  $e_T$  – питома теплота згорання твердого біопалива, МДж/кг;

$W$  – вологість твердого біопалива, %;

$Z$  – зольність твердого біопалива, %;

$e_{T0}$  – питома теплота згорання абсолютно сухого беззольного твердого біопалива, МДж/кг;

Приймаємо, що теплотворна здатність абсолютно сухої беззольної біомаси стебел цукрового сорго становить  $e_{T0}=18,5$  МДж/кг. Підставивши значення  $e_{T0}$  у формулу (3) та врахувавши, що згідно з стандартом вологість твердого біопалива 10% отримаємо:  $e_T = 16,65 - 0,185 \cdot Z$ . На рисунку 7 наведено графічну інтерпретацію цієї залежності.

У разі відсутності інформації про вміст золи у стеблах цукрового сорго приймаємо питому теплоту згорання  $e_T=16$  МДж/кг.

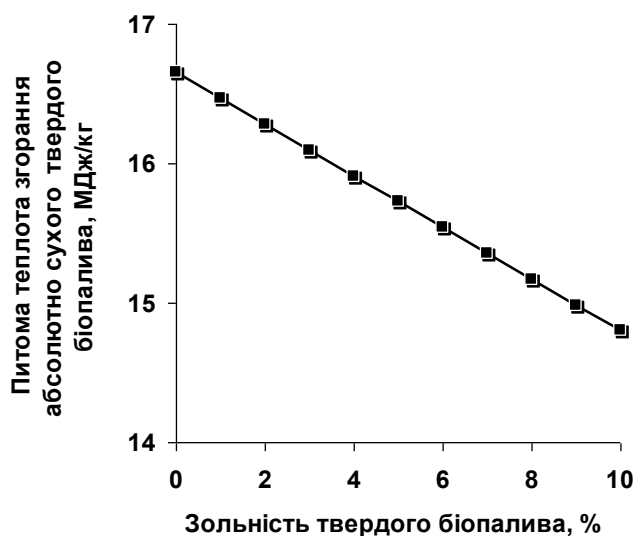


Рис. 7. Залежність питомої теплоти згорання твердого біопалива від зольності

#### Приклад розрахунку:

Урожайність стебел цукрового сорго становить 80 т/га, суха речовина – 21 %, зольність – 2%. За формулою (2) розраховуємо вихід твердого біопалива:  $T = (80 \cdot 21 \cdot (100 + 10)) / 10000 = 18,5$  т/га. За формулою (3) розраховуємо кількість енергії, яку можна отримати від спалювання 18,5 т твердого біопалива.

Попередньо визначаємо питому теплотворну здатність отриманого біопалива:

$$e_T = 16,65 - 0,185 \cdot 2 = 16,3 \text{ МДж/кг.}$$

$$\text{Отже, } E_T = 18,5 \cdot 16,3 = 301,6 \text{ ГДж/га.}$$

Таким чином, з 1 га посівів цукрового сорго за врожайності зеленої біомаси 80 т/га, вмісту сухої речовини 21% та зольності 2% вихід твердого біопалива становитиме 18,5 т/га, а енергії – 301,6 ГДж/га.

Для розрахунку виходу біогазу приймаємо, що з 1 кг сухої речовини цукрового сорго можна отримати 0,7 м<sup>3</sup> біогазу з вмістом метану 60%. Отже, формула для розрахунку виходу біогазу з 1 га посівів цукрового сорго матиме вигляд:

$$F = \frac{U \cdot c \cdot q}{100}, \quad (4)$$

де,  $F$  – загальний вихід біогазу, тис.м<sup>3</sup>/га;

$U$  – урожайність зеленої біомаси цукрового сорго, т/га;

$c$  – вміст сухої речовини, %;

$q$  – питомий вихід біогазу з 1 кг сухої речовини ( $q = 0,7$  м<sup>3</sup>/кг).

Щоб визначити вихід енергії з біогазу, отриманого з одного гектара посівів цукрового сорго, необхідно об'єм біогазу помножити на його питому теплоту згорання:  $E_G = F \cdot e_F$ , де  $E_G$  – вихід енергії, ГДж/га;  $F$  – вихід біогазу з 1 га цукрового сорго, тис.м<sup>3</sup>/га;  $e_F$  – питома теплота згорання біогазу, МДж/м<sup>3</sup> (за вмісту метану 60%  $e_F = 21,8$  МДж/кг).

#### **Приклад розрахунку:**

Урожайність зеленої біомаси цукрового сорго становить 80 т/га (суха речовина 21%). Розрахунковий вихід біогазу з 1 га цукрового сорго в цьому випадку становитиме:

$$F = 80 \cdot 21 \cdot 0,7 / 100 = 11,76 \text{ тис.м}^3/\text{га}$$

Вихід енергії з отриманого біогазу:  $E_G = 11,76 \cdot 21,8 = 256,37$  ГДж/га.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Almodares A., Hadi M.R. Production of bioethanol from sweet sorghum: A review. *African Journal of Agricultural Research*. 2009. Vol. 4, Issue 9. P. 772–780.
2. Prasad S., Singh A., Jain N., Joshi H.C. Ethanol Production from Sweet Sorghum Syrup for Utilization as Automotive Fuel in India. *Energy Fuels*. 2007. Vol. 21, Issue 4. P. 2415–2420. doi: 10.1021/ef060328z
3. Hassan M.U., Chattha M.U., Barbanti L., Chattha M.B., Mahmood A., Khan I., Nawaz M. Combined cultivar and harvest time to enhance biomass and methane yield in sorghum under warm dry conditions in Pakistan. *Industrial Crops and Products*. 2019. Vol. 132. P. 84–91. doi: 10.1016/j.indcrop.2019.02.019
4. Hassan M.U., Chattha M.U., Barbanti L., Mahmood A., Chattha M.B., Khan I., Mirza S., Aziz S.A., Nawaz M., Aamer M. Cultivar and seeding time role in sorghum to optimize biomass and methane yield under warm dry climate. *Industrial Crops and Products*. 2020. Vol. 145, Article ID 111983. doi: 10.1016/j.indcrop.2019.111983
5. Reddy B.V., Ramesh S., Reddy P.S., Ramaiah B., Salimath M., Kachapur R. Sweet sorghum – a potential alternate raw material for bioethanol and bioenergy. *International Sorghum and Millets Newsletter*. 2005. Vol. 46. P. 79–86.
6. Soltani A., Almodares A. Evaluation of the investments in sugar beet and sweet sorghum production. *National Convention of Sugar Production from Agriculture Products*. 13–16 March 1994. Shahid Chamran University. Ahwaz, Iran.
7. Ratnavathi C., Kumar S., Kumar B., Krishna D., Patil J. Effect of Time of Planting on Cane Yield and Quality Characters in Sweet Sorghum. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*. 2012. Vol. 2, Issue 1. P. 1–9. doi: 10.4236/jsbs.2012.21001
8. Драненко І., Шепель М. і ін. «Верблюди степу» – сорго. «Маяк» Одеса, 1966. – 70 с.
9. Исаков Я. И. Сорго / Я. И. Исаков. – М.: Россельхозиздат, 1982. – 134 с.
10. Кадыров С. В. Сорго / С. В. Кадыров, В. А. Федотов, А. З. Большаков и др. – Ростов н/Д: ЗАО «Ростиздат», 2008. – 80 с.
11. Макаров Л. Х. Соргові культури: монографія / Л. Х. Макаров. – Херсон: Айлант, 2006. – 263 с.
12. Шепель Н. А. Сорго – интенсивная культура: Справ.изд. – Симферополь: Таврия, 1989. – 192 с.
13. Шорин П. М. Сахарное сорго / П. М. Шорин. – М.: Колос, 1976. – 80 с.
14. Олексенко Ю. Ф. Прогрессивная технология возделывания сорго. – К.: Урожай, 1986. – 80 с.
15. Шорин П. М. Технология возделывания и использования сахарного сорго / П. М. Шорин. – М.: Россельхозиздат, 1986. – 87 с.
16. Ганженко О. М. Залежність продуктивності і вуглеводного складу від сортових особливостей та мінерального живлення цукрового сорго / О. М. Ганженко, Н. О. Григоренко // Цукор України. – 2011. – №4. – С. 27–32.
17. Ганженко О. М. Вплив сортових особливостей та мінерального живлення на урожайність і вуглеводний склад цукрового сорго / О. М. Ганженко, Н. О. Григоренко, О. Б. Хіврич, Л. А. Герасименко, О. О. Марчук // Цукрові буряки. – 2011. – №5. – С.14–15.
18. Ганженко А.Н. Влияние сортовых особенностей на количество и качество сока из сахарного сорго / А.Н. Ганженко // Сахарная свекла. – 2019. – №1. – С. 41-44.
19. EN ISO 17225-1:2014 Solid biofuels -- Fuel specifications and classes -- Part 1: General requirements

# Додаток А

## Типова технологічна карта на вирощування і збирання зеленої біомаси цукрового сорго на біогаз

№ з/п	Технологічні операції	Од. виміру	Обсяг робіт	Склад агрегату		Витрати ПММ, кг	Витрати всього, грн.
				трактор	с.-г. машини		
Основний обробіток ґрунту							
1	Лущення стерні на гл. 6-8 см	га	1	ХТЗ-170	БДВ-6,5	2,5	102,82
2	Приготування і внесення гербіцидів (Раундап 2л/га)	га	1	МТЗ-82	ОПК-3000	1,7	590,3
3	Навантаження мінеральних добрив	т	0,5	МТЗ-82	ПФ-0,75	0,65	19,63
4	Транспортування і внесення мінеральних добрив (Р <sub>60</sub> К <sub>60</sub> )	га	1	ХТЗ-121	РУП-8	2,1	7917,39
5	Оранка на глибину 25...27 см	га	1	ХТЗ-150	ПЛН-5-35	15,2	533,74
ВСЬОГО на основний обробіток ґрунту						22,15	9163,87
Передпосівний обробіток ґрунту							
6	Ранньовесняне закриття вологи	га	1	МТЗ-82	БЗСС-1	1,2	47,35
7	Навантаження мінеральних добрив	т	0,18	МТЗ-82	ПФ-0,75	0,65	19,63
8	Транспортування і внесення міндобрив (N <sub>60</sub> )	га	1	ХТЗ-121	РУП-8	2,1	2148,5
9	Передпосівна культивуація з коткуванням	га	1	ХТЗ-121	АП-6	3,8	227,72
ВСЬОГО на передпосівний обробіток ґрунту						7,75	2443,2
Сівба насіння							
10	Навантаження насіння	т	0,01	МТЗ-82	ПФ-0,75	0,65	19,63
11	Транспортування насіння	т	0,01	МТЗ-82	2ПТС-4	0,81	22,46
12	Сівба сорго	га	1	Т-25	Клєн	2,5	1945,19
13	Коткування	га	1	МТЗ-82	ЗККШ-6А	1,3	65,27
ВСЬОГО з сівби насіння						5,26	2052,54
Догляд за посівами							
14	Приготування і внесення гербіцидів (Гвардіан Тетра 3,5 л/га)	га	1	МТЗ-82	ОПК-3000	1,7	1138,82
15	Міжрядний обробіток	га	1	МТЗ-82	УСМК-5,4	3,75	232,06
ВСЬОГО на догляд за посівами						5,45	1370,88
Збирання та транспортування зеленої біомаси							
16	Збирання сорго цукрового	га	1	КСК-600		8,3	1021,5
17	Транспортування біомаси	т	90	МТЗ-82	2ПТС-4	99	5344,33
ВСЬОГО на збиранні зеленої біомаси						107,3	6365,83
РАЗОМ на вирощування і збирання цукрового сорго						147,91	21396,32

## Додаток Б

### Структура витрат на вирощування і збирання зеленої біомаси цукрового сорго



Наукове видання

**ГАНЖЕНКО** Олександр Миколайович  
**ПРАВДИВА** Людмила Анатоліївна  
**ФУЧИЛО** Ярослав Дмитрович  
**ХІВРИЧ** Олександр Борисович  
**ЗИКОВ** Павло Юрійович  
**ГУМЕНТИК** Михайло Ярославович  
**ГОНЧАРУК** Григорій Семенович  
**СМІРНИХ** Віктор Михайлович  
**ДУБОВИЙ** Юрій Петрович  
**АТАМАНЮК** Олег Михайлович  
**ІВАНОВА** Олена Григорівна  
**ГАМАНДІЙ** Василь Леонідович  
**ЯЛАНСЬКИЙ** Олександр Володимирович

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ  
З ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ ТА ПЕРЕРОБЛАННЯ  
ЦУКРОВОГО СОРГО ЯК СИРОВИНИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА  
БІОПАЛИВА**

Формат 60×84 1/16. Тираж 300 пр. Ум. друк. арк. 1,7. Зам. № 1258.

Видавець і виготовлювач ТОВ «ЦП «КОМПРИНТ»

03150, Київ, вул. Предславинська, 28

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру  
суб'єкта видавничої справи ДК № 4131 від 04.08.2011 р.