

НАЦІОНАЛЬНИЙ БОТАНІЧНИЙ САД ІМЕНІ М.М.ГРИШКА  
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

DOI: <https://doi.org/10.59647/978-617-520-935-6/1>

**СОРГО ЦУКРОВЕ**  
**(*SORGHUM SACCHARATUM***  
**(*L.*) *MOENCH*) В УКРАЇНІ:**  
**БІОЛОГІЯ, ПРОДУКТИВНІСТЬ**  
**ТА ВИКОРИСТАННЯ НА БІОПАЛИВО**

**Монографія**

Київ  
Видавництво Ліра-К  
2024

УДК 633.17:631.527:604:[661.722+661.725.4]

DOI: <https://doi.org/10.59647/978-617-520-935-6/1>

*Усі права застережено. Копіювання, сканування, запис на електронні носії і тому подібне будь-якої частини видання заборонено*

*Затверджено до друку Вченою радою  
Національного ботанічного саду імені М.М.Гришка НАН України  
(протокол №3 від 25 січня 2024 року)*

**Рецензенти:**

*Л.А.Котюк – д.б.н., професор, Поліський національний університет  
М.І.Кулик – д.с.-г.н., професор, Полтавський державний аграрний  
університет*

Відповідальний редактор – д.с.-г.н., професор *Д.Б.Рахметов*

**Сорго цукрове** (*Sorghum saccharatum* (L.) Moench) в Україні: біологія, продуктивність та використання на біопаливо : монографія / Кол. авт.: Д.Б. Рахметов, С.М. Шульга, Н.В. Заїменко та ін. – Київ : Видавництво Ліра-К, 2024. – 112 с.

ISBN 978-617-520-935-6

Подано інформацію про сорго цукрове (*Sorghum saccharatum*) як перспективну культура для виробництва енергетичної сировини другого покоління. Наведено генетичні ресурси рослин *Sorghum saccharatum*, які створено у НБС імені М.М.Гришка НАН України. Представлено біолого-технологічну характеристику рослин та фітосировини *Sorghum saccharatum* як основа для компонентів рідких палив та енергоносіїв. Наведено біохімічні особливості рослин та енергетична оцінка фітосировини *Sorghum saccharatum*. Показано формування та якісні характеристики насіння різних генотипів *Sorghum saccharatum*. Представлено процес удосконалення технології отримання біобутанолу на основі виявлення фізіологічних та біохімічних властивостей. Досліджено продуктивність штамів-продуцентів бутанолу у процесі зберігання. Наведено особливості технології вирощування сорго цукрового.

Для біологів, рослинників, технологів, спеціалістів, викладачів, аспірантів та студентів.

УДК 633.17:631.527:604:[661.722+661.725.4]

ISBN 978-617-520-935-6

© Колектив авторів, 2024  
© НБС імені М.М.Гришка  
НАН України, 2024  
© Видавництво Ліра-К, 2024

# ЗМІСТ

---

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. СОРГО ЦУКРОВЕ ( <i>SORGHUM SACCHARATUM</i> ) – ПЕРСПЕКТИВНА КУЛЬТУРА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИРОВИНИ ДРУГОГО ПОКОЛІННЯ .....	6
РОЗДІЛ 2. УМОВИ, ОБ’ЄКТИ ТА МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	20
РОЗДІЛ 3. ГЕНЕТИЧНІ РЕСУРСИ РОСЛИН <i>SORGHUM SACCHARATUM</i> СТВОРЕНІ У НБС ІМЕНІ М.М.ГРИШКА НАН УКРАЇНИ ТА БІОЛОГО- ТЕХНОЛОГІЧНА І ЕНЕРГЕТИЧНА ОЦІНКА ФІТОСИРОВИНИ ЯК ОСНОВА ДЛЯ КОМПОНЕНТІВ РІДКИХ ПАЛИВ ТА ЕНЕРГОНОСІЇВ .....	22
3.1. Генетичні ресурси рослин <i>Sorghum saccharatum</i> створені в НБС імені М.М.Гришка НАН України .....	22
3.2. Біолого-технологічна оцінка рослин та фітосировини <i>Sorghum saccharatum</i> як основи для компонентів рідких палив та енергоносіїв .....	28
3.3. Біохімічні особливості рослин та енергетична оцінка фітосировини <i>Sorghum saccharatum</i> як основа для біопалива .....	38
3.4. Формування насіння різних генотипів <i>Sorghum saccharatum</i> та його характеристика за якісними показниками.....	48
РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ БІОБУТАНОЛУ НА ОСНОВІ ДОСЛІДЖЕНЬ ФІЗІОЛОГІЧНИХ ТА БІОХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВІТЧИЗНЯНИХ ШТАМІВ- ПРОДУЦЕНТІВ .....	59
РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ШТАМІВ- ПРОДУЦЕНТІВ БУТАНОЛУ У ПРОЦЕСІ ЗБЕРІГАННЯ.....	67
5.1. Матеріали та методи.....	72
5.2. Результати і обговорення.....	76
РОЗДІЛ 6. МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ З ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ СОРГО ЦУКРОВОГО .....	92
ЗАКЛЮЧЕННЯ.....	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	97

## ВСТУП

---

Робота складається з вступу, шести розділів, заключення, списку літератури. У розділі 1 показано значення сорго цукрового (як перспективної культури для виробництва енергетичної сировини другого покоління. У розділі 2 представлено умови, об'єкти та методи проведення досліджень. У розділі 3 наведено генетичні ресурси рослин *Sorghum saccharatum* створені у НБС імені М.М.Гришка НАН України та біолого-технологічна і енергетична оцінка фітосировини як основа для компонентів рідких палив та енергоносіїв. У розділі 4 показано удосконалення технології отримання біобутанолу на основі виявлення фізіологічних та біохімічних властивостей. У розділі 5 наведено дослідження продуктивності штамів-продуцентів бутанолу у процесі зберігання. У розділі 6 представлено технологію вирощування сорго цукрового.

Мета роботи – використання потенціалу високоадаптивних генотипів сорго цукрового як основа виробництва рідких біопалив та удосконалення технології отримання біобутанолу за допомогою нового штаму-продуценту для ферментації фітосировини другого покоління.

Об'єкт досліджень – процес створення та використання нових високопродуктивних генотипів сорго цукрового як основа отримання рідких біопалив із сировини другого покоління і удосконалення штамів-продуцентів та технології отримання біобутанолу.

Предмет дослідження – високоадаптивні форми та сорти сорго цукрового (*Sorghum saccharatum* (L.) Moench) власної селекції у порівнянні з світовими аналогами і нові штами-продуценти та технологія отримання біобутанолу.

Методи дослідження: загальнонаукові і спеціальні методи. З використанням сучасних інтродукційних, селекційних та біотехнологічних методів було створено високоадаптивні генотипи сорго цукрового з кращими якісними і кількісними характеристиками фітосировини другого покоління як основа виробництва рідких біопалив. Шляхом направленої селекції відібрано новий штам-продуцент бутанолу з підвищеною конверсією для ферментації сорго. Проведено двохстадійне культивування з оптимізацією параметрів ферментації та з використанням целюлозолітичних бактеріальних та грибних ферментів.

Робота має важливе наукове та практичне значення. У наслідок проведених багаторічних досліджень створено колекцію генотипів сорго цукрового на основі оригінального та мобілізованого світового сортового потенціалу (близько 100 зразків) для визначення високопродуктивних форм рослин як джерело біопалива. Встановлено біолого-технологічні властивості біомаси як енергетичної сировини другого покоління для конвеєрного забезпечення виробництва альтернативних рідких палив. З використанням сучасних інтродукційних, селекційних та біотехнологічних методів створено і відібрано найцінніші генотипи як вихідні форми (14 зразків). Виведено високоадаптивні сорти з підвищеним вмістом цукрів ('Енергодар', 'Ботанічний' та Соргодар'). Визначено склад цукрів соку і аналізовано їх придатність для ферментації в компоненти рідких палив (біобутанол). Шляхом направленої селекції відібрано новий штам-продуцент біобутанолу з підвищеною конверсією для ферментації соргового субстрату, що дозволило удосконалити технології отримання біобутанолу. Проведена кількісна та якісна оцінка продуктивних показників відібраних генотипів рослин за виходом основної та побічної продукції. Найвищий потенційний вихід біобутанолу (до 4925 кг/га), біоетанолу (до 4390 кг/га) та твердого біопалива (26,81-32,47 т/га) отримано з фітосировини сортів Енергодар, Ботанічний та Медовий. Визначено теплоємність фітосировини, енергетичну та економічну цінність різних видів біопалива.

Проходять кваліфікаційну експертизу 2 сорти сорго цукрового Ботанічний (№ заявки 22241001) та Енергодар (№ заявки 13241005).

Ключові слова: нові біопаливні ресурси, фітосировина другого покоління, цінні генотипи сорго цукрового, біобутанол, штамми-продуценти, біоконверсія.

## РОЗДІЛ 1.

# СОРГО ЦУКРОВЕ (*SORGHUM SACCHARATUM* (L.) *MOENCH*) – ПЕРСПЕКТИВНА КУЛЬТУРА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИРОВИНИ ДРУГОГО ПОКОЛІННЯ

---

В умовах стрімких глобальних і регіональних змін, що відбуваються стає зрозуміло, що збереження різноманіття живих організмів та їх генофонду – найважливіша запорука існування біосфери. Від успішного вирішення даної проблеми (збереження біорізноманіття), залежить сталий розвиток усієї людської цивілізації, її майбутнє. Особливої уваги заслуговує збереження, збагачення та ефективного використання агробіорізноманіття, насамперед, фіторізноманіття. Оскільки рослини є важливим фактором існування людини, тому рослинні ресурси розглядаються як національне багатство, що потребує збереження, охорони і раціонального використання. Саме від цього, значною мірою, залежить стабільність продовольчої, енергетичної, екологічної, біологічної безпеки держави (Фундаментальні..., 2022).

Генетичні ресурси рослин повинні відігравати ключову роль у сталому сільському господарстві та забезпеченні продовольством, особливо після дефіциту, спричиненого збільшенням кількості населення та глобальною зміною клімату. Використання генетичних ресурсів рослин (PGR) вважається одним із вагомих інструментів у стійких методах поліпшення сільськогосподарських культур. Збереження та використання генетичних ресурсів рослин є провідними для задоволення майбутніх потреб людства (Shehzad and Okuno, 2014, Фундаментальні..., 2022).

Викопні джерела енергії, які використовуються у світі, поступово зменшуються. Викопне паливо спричиняє забруднення навколишнього середовища і ціна за одиницю продукції постійно зростає. Таким чином, з кожним днем збільшується попит на дешевші та відновлювані джерела енергії, які не забруднюють навколишнє середовище.

Сучасна теорія економічного розвитку суспільства ґрунтується на припущенні, що природні ресурси повинні використовуватися

ефективно, де, в даному випадку, має переважати частка відновлюваних ресурсів у процесі задоволення споживчого попиту (Midilli et al., 2006; Borawski et al., 2019). У Європі тверда біомаса є основним відновлюваним біологічним ресурсом (Stolarski et al., 2018; Marks-Bielska et al., 2019), який має провідну роль у виробництві первинного та вторинного біопалива (Borawski et al., 2019).

У даний час потреба в енергії біомаси задовольняється переважно за рахунок деревних рослин (Iglinski et al., 2015). Наразі актуальним є збільшення частки біомаси у виробництві енергії за рахунок створення цільових плантацій енергетичних культур на сільськогосподарських угіддях (Jankowski et al., 2016).

Більше уваги у світі приділяється пошуку найперспективніших рослинних джерел для виробництва біопалива. Серед таких рослин виокремляють сорго цукрове. Ця культура останнім часом привернула увагу: високим виходом біомаси, вмістом цукру та біоетанолу (Bio-Fuel..., 2020, Rakhmetova et al., 2020). Наводяться деякі аргументи щодо вирощування цукрового сорго на великих площах, з метою отримання біоетанолу для потреб біопаливної промисловості.

На сьогодні кліматичні зміни, які відбуваються на Землі, призводять до тривалої посухи в Україні, через що інтерес до посухостійких високопродуктивних культур зростає. Пошук та впровадження у виробництво нових культур з високим адаптаційним та врожайним потенціалом, стійкістю до впливу несприятливих біотичних та абіотичних факторів є актуальним завданням сьогодення (Стійкість..., 2022).

Цукрове сорго (*Sorghum saccharatum* (L.) Moench) є високоефективною сільськогосподарською культурою із C<sub>4</sub> типом фотосинтезу. Завдяки соле- та посухостійкості сорго цукрове вирощується в жарких та сухих кліматичних умовах і може конкурувати з цукровою тростиною та цукровим буряком, які використовуються для виробництва біопалива в світі. Вирощування цукрового сорго для виробництва біопалива в країнах з підвищеним рівнем спеки відіграє важливу екологічну роль, підвищуючи рівень октанового числа бензину та зниження парникових газів у навколишньому середовищі (Almodares, Hadi, 2009). Генотипи цього виду характеризуються інтенсивним ростом і розвитком, здатні формувати стабільно високі врожаї навіть за несприятливих ґрунтово-кліматичних умов. Фітосировина цих представників є хорошим джерелом їжі, кормів, клітковини та біопалива (Rivera-Corona, 2014; Viquez, 2015; Popescu et al., 2018, Wiloso et al., 2020).

Результати літературного аналізу, багаторічних інтродукційних та селекційних досліджень і теоретичних узагальнень дозволяють відзначити, що до потенційно перспективних культур в Україні належить *Sorghum saccharatum* (L.) Moench (Інтродукція..., 2020; Енергетичні..., 2022). Представники роду *Sorghum* використовуються на технічні, кормові, продовольчі та енергетичні цілі. Дослідження сировини різних органів цієї рослини показало, що вищий потенціал харчової цінності мали листки рослин (Elseed Fadel et al., 2007). Зважаючи на цінні властивості *Sorghum*, його високий генетичний потенціал та спроможність раціонально використовувати агрокліматичні ресурси, а також як високожаростійка та посухостійка культура, він відіграватиме важливу роль у світовому землеробстві. Найбільші посіви *Sorghum* займає в країнах Північної і Південної Америки і Африки. Взагалі у світі посіви його з кожним роком зростають і сьогодні займають понад 40 мл. га (Дремлюк, 2008; Ковальчук та ін., 2009; Топливная..., 2018; Stevens et al., 2009).

Батьківщина *Sorghum* – Північно-Східна Африка, зокрема, Ефіопія і Судан, де в даний час знаходиться найбільша кількість його диких видів і культурних форм. Як культурна рослина вирощується з IV-III століть до н. е. (Биологический, 1989).

*Sorghum saccharatum* було вперше інтродуковано в Сполучених Штатах у 1852 році. Ісаак Хеджес назвав її “Північний цукровий завод” із-за високого вмісту цукру в стеблах. Сировину цієї культури використовують для виробництва біогазу. У Техасі *Sorghum* культивують для отримання високої врожайності біомаси. Цукор у стеблі не найважливіша складова. Біомаса рослин використовується для піролізу, з метою отримання синтез-газу, біонафти і вугілля. Значна частина з вирощеного *Sorghum* у світі використовується для виробництва цукру та етанолу. Вміст соку в рослинах повинна складати не менше 50% маси стебел.

До *Sorghum saccharatum* відноситься велика кількість різновидів, що характеризуються тим, що в них (на відміну від зернового і віничного *Sorghum*) у соку стебла міститься від 10 до 20% і більше цукрів. У природі не існує іншої рослини, яка могла б так швидко синтезувати цукрозу. Перші сорти цієї культури з високим вмістом цукру були виведені в США на початку 1940-х років. Це було пов'язано з тим, що під час другої світової війни знизилася виробництво цукру з цукрового очерету і цукрових буряків. *Sorghum saccharatum* має великі перспективи як резервна культура для виробництва цукру.



У Європі реалізується спеціальна програма по збільшенню виробництва *Sorghum* - Sorghum ID (Міжнародний розвиток *Sorghum*). Одним з ініціаторів цієї програми стала французька федерація виробників насіння кукурудзи та *Sorghum* (F.N.P.S.M.S.). Щоб популяризувати цю культуру у 2016 році в Бухаресті провели конгрес “Європейське *Sorghum* – справжній потенціал”, який зібрав понад 250 ключових партнерів цього ринку.

Із 2017 року реалізується трирічний план просування *Sorghum* як культури з високим потенціалом. Великі перспективи з використання *Sorghum* мають 7 європейських країн – Франція, Італія, Іспанія, Румунія, Болгарія, Україна та Росія. На сьогодні у світі проводяться дослідження з удосконалення методів отримання біоетанолу з соку стебел сорго (Erdurmus et al., 2018; Mossi et al., 2017; Tang et al., 2018; Mossi et al., 2018).

Біопаливо – це стійке джерело енергії, що здатне до відновлення та отримане з органічної речовини у вигляді зеленої біомаси (Schmer et al., 2014). *Sorghum saccharatum* (L.) Moench – одна з перспективних культур для виробництва біопалива. Це C<sub>4</sub> рослина з низькими потребами в ресурсах та високим рівнем цукру в стеблах (Mahtur et al., 2017). Селекційна програма з відбору більш продуктивних форм сорго – основна задача сьогодення в рамках вивчення даної культури, крім того в Туреччині вона пропонується в якості кормової культури (Yücel et al., 2020). Окрім кормового призначення, його можна спалювати, конвертувати в біоетанол чи біогаз. Сорго можна вирощувати на піщаних та важких глинистих, кислих та лужних ґрунтах, у теплих та сухих регіонах, а також на засолених ґрунтах. Порівняно з кукурудзою, ця культура невибаглива до умов зростання (Jankowski et al., 2020).

Особливо прийнятним, з екологічної точки зору, є вирощування *Sorghum saccharatum* для виробництва біомаси та цукрів для промислового призначення на забруднених важкими металами землях (Vintilă, 2017).

Відомо, що кліматичні умови разом з внесенням добрив суттєво впливають на урожайність рослин сорго. Зокрема, кращі врожаї можна отримати за внесення азотних добрив на фоні калійних та фосфорних (Coclea et al., 2014).

*Sorghum saccharatum*, завдяки своїй високій стресостійкості та фотосинтетичній ефективності, широко вирощується в посушливих і напівпосушливих районах. Його можна вирощувати на не придатних землях для виробництва продуктів харчування чи кормів (Anani et al.,

2015; Wu et al., 2019). *Sorghum saccharatum* вважається ідеальною енергетичною культурою для виробництва біоетанолу першого та другого покоління. Вміст цукру у стеблах *Sorghum*, їх соковитість та кількість соку – ці показники є основними при отриманні біоетанолу. Тому на генетичному рівні проводиться робота по контролю соковитості та текстури стебла *Sorghum saccharatum* (Zhang et al., 2018).

Сьогодні особливо актуальним для соргових культур є дослідження генетичних механізмів, пов'язані з підвищенням продуктивності рослин. На прикладі гібриду *Sorghum bicolor* × *S. sudanense* показано дев'ять локусів кількісних ознак (QTL), які було виявлено для врожайності та 4-х компонентних ознак урожайності за допомогою комплексного інтервального картування (Liu et al., 2015; Rai et al., 2016).

Застосування провідних молекулярних методів привертає значну увагу для оцінки генетичних ресурсів рослин та їх збереження. Картування та QTL-аналіз важливих морфологічних та агрономічних ознак є першочерговими та значущими підходами для покращення зародкової плазми сільськогосподарських культур. Окремо, використання покращених сортів сільськогосподарських культур сприяє адаптації та їх виробництву, що, у свою чергу, є відповіддю на зростаючий попит на продовольство внаслідок глобальної зміни клімату. Ідентифікація QTL за допомогою ДНК-маркерів є першою стратегією в селекції за допомогою маркерів (MAS) за фенотипічними ознаками, включаючи стресостійкість у селекції рослин. Авторами показано вагомість генетичного різноманіття в зародковій плазмі сорго та його використання в селекції за допомогою генетичного аналізу важливих ознак. Застосування двох різних підходів QTL- картування, а саме: картування зчеплення на основі родинних зв'язків та картування асоціацій на основі нерівноваги зчеплення. Доведено, як методи на основі QTL сприяють кращому розумінню генетичних механізмів, що беруть участь у контролі фенотипічних ознак, що становлять зацікавленість (Shehzad and Okuno, 2014).

В іншій роботі, цих же авторів, використовувався набір для дослідження різноманітності сорго на основі SSR (SDRS), що включав 107 зразків сорго. Репрезентативний набір мав географічно різноманітну колекцію зразків із 27 країн Азії та Африки. Для аналізу асоціацій було відібрано 98 маркерів SSR сорго з трьох раніше опублікованих карт зчеплення. Фенотипічні дані були зареєстровані для 26 морфологічних ознак. Для ідентифікації QTL, що контролюють основні агрономічні

ознаки, були використані різні моделі асоціацій, включаючи як підхід з використанням одного QTL, так і підхід з використанням декількох QTL. Усі моделі виявили локуси з різною силою зв'язку з морфологічними ознаками. Загалом було ідентифіковано 14 спільних значущих SSR-локусів за допомогою трьох різних моделей аналізу асоціацій. Ці локуси були асоційовані з 12 різними морфологічними ознаками, включаючи кількість днів до колосіння, кількість днів до квітання, кількість волотей, довжину волоті та ін. Порівняння результатів, отриманих за допомогою різних моделей, може бути ефективним способом виявлення надійних асоціацій в дослідженнях асоціацій на рівні всього геному (Shehzad et al., 2009).

Коренева система сорго, як і в інших культур, є життєво важливою частиною рослин для поглинання ґрунтової вологи та поживних речовин і повною мірою впливає на посухостійкість. Ідентифікація геномних ділянок, що містять локуси кількісних ознак (QTL) кореневої системи та врожайності, а також пов'язаних з ними маркерів може сприяти покращенню рослин сорго за допомогою маркерної селекції (MAS), а також поглиблювати розуміння реакції рослин на стрес за посухи. Популяція з 184 рекомбінантних інбредних ліній (PIL), отриманих від E36-1 × SPV570, разом з батьківськими формами була фенотипізована за складовими ознаками врожайності в польових умовах та ознаками коренів у надземному ризотроні. Високі оцінки спадковості та генетичного прогресу для всіх корневих ознак та для більшості ознак урожайності відкривають широкі можливості для покращення зазначених ознак за допомогою простого добору. Карта зчеплення була побудована на основі 104 маркерних локусів, що включають 50 EST-SSRs, 34 негенних ядерних SSRs і 20 SNPs, а аналіз QTL був проведений з використанням методу композитного інтервального картування (CIM). Загалом було визначено вісім та 20 QTL для ознак, пов'язаних з кореневою системою та врожайністю, відповідно. Було виявлено, що QTL для об'єму кореневої системи, свіжої та сухої маси коренів локалізовані на SBI-04, що підтверджується позитивною кореляцією між цими ознаками. Отже, ці ознаки можуть бути покращені за допомогою одних і тих же зчеплених маркерів. Відсутність перекриття між QTL складових ознак кореневої маси та врожайності свідчить про те, що ці два набори параметрів є незалежними за своїм впливом, а можливість комбінування цих двох ознак може підвищити продуктивність сорго в умовах дефіциту вологи (Fakrudin et al., 2013).

У роботі R.M. Gleadow et al. (2021) наведено результати дослідження методом РНК-секвенування з вивчення експресії генів, що беруть участь у біосинтезі, біоактивації та утилізації дуррину в *Sorghum bicolor*. Показано, що гени, які беруть участь у біосинтезі дуррину були високо експресовані у всіх молодих вегетативних тканинах, що розвиваються (листки, листкова піхва, коріння, стебла), бруньках та насінні, що проростає і демонстрували генно-специфічні піки експресії в листках під час циклів діелектричної активності. Гени, що беруть участь у біоактивації дуррину, експресуються на ранніх стадіях розвитку органів зі специфічними для них патентами експресії. Гени, що беруть участь у рециркуляції, експресувалися на однакових рівнях у різних органах під час розвитку, хоча після квітування, коли поживні речовини ремобілізуються для формування зернівки експресія GSTL 1 знижувалась у десять разів у листі, а NITV 1 зростала в листках. Експресія NITV 2 в стеблах зростала в понад 10 разів. Результати дослідження узгоджуються зі створенням превентивного захисту в молодих тканинах і регульованою утилізацією, пов'язаною зі старінням органів і підвищеною потребою в азоті під час наливання зерна. Поглиблені знання про метаболізм дуррину можуть покращити врожайність, ефективність використання азоту та стійкість до стресів у сорго (Gleadow et al., 2021).

Основним компонентом вуглеводів представників роду *Sorghum* є крохмаль (у насінні) та цукри (у стеблах *Sorghum saccharatum*) (Bihmidine et al., 2015). Сироп із рослин можна використовувати як натуральний підсолоджувач (Csefalvay and Bakasci, 2019). Фітосировина з представників даного роду останнім часом використовуються як перспективні біоенергетичні культури для видобутку біогазу, особливо, за рахунок соковитих стебел (Draghici et al., 2019; Mago, 2010; Mossi et al., 2017). Вихід цукру з різних генотипів *Sorghum saccharatum*, що вирощуються, наприклад, у Туреччині може досягати 6387 кг/га (Erdurmus et al., 2018).

У дослідженнях проведених в умовах рівнини Харран (36о 42' N і 38о 58' E), Шанліурфа (Туреччина) у повторних посівах було визначено вихід стебла, соку, сиропу, цукру та теоретичний вихід етанолу з 49 генотипів сорго цукрового. У результаті вивчення найкращими виявилися генотипи Nebraska sugar, Topper 76, Smith, M81E та Corina (Oktem, 2020). В інших дослідженнях автором було визначено, що сорти сорго цукрового UNLY-hybrid-4, Blue Ribben, Rex і Colman забезпечили вищі показники за

врожайністю стебла, виходом соку з рослини, співвідношенням водорозчинних сухих речовин та виходом етанолу (Oktem, 2018).

Порівняльні визначення змін структури целюлози міскантусу та сорго (за методами SEC, FT-IR та XRD) дозволили встановити, що середній відсоток клітковини після вегетаційного періоду для сортів міскантусу був вищим, а для сортів сорго – нижчим (Waliszewska, 2018). Показано, що у результаті ферментації відсоток целюлози для обох досліджуваних видів, зібраних за два сезони росту, був нижчим. Ступінь полімеризації для рослин, зібраних після вегетаційного періоду, був нижчим для більшості сировини. У результаті процесу ферментації ступінь полімеризації збільшувався для кожної досліджуваної сировини. Проте кристалічність целюлози залишилася на тому ж рівні для міскантусу і знизилася для сорго. Отже, зміни в структурі целюлози в зазначених видів були різними (Waliszewska, 2018). В цілому, дані рослини характеризуються цінним біохімічним складом та конкурують з кукурудзою, що уможливорює їх використання як кормових трав (Kozłowski et al., 2009).

Вважається, що сорго цукрове є цінним відновлюваним джерелом енергії та відіграє життєво важливу роль для піднесення соціально-економічного статусу фермерів Туреччини, завдячуючи виведенню високоврожайних сортів, разом з досконалим балансом між виробництвом кормів і біопалива. Установлено, що за значущими відмінностями досліджуваних ознак, генотипи Сміт і Батем-3, які мають високий вміст соку, цукру та етанолу, можуть бути використані для виробництва біопалива в Середземноморському регіоні Туреччини (Genetic Variability..., 2020).

У дослідженнях трьох сортів сорго (Rona 1, Santos, Sucrosorgo 506), проведених у помірному кліматі, характерному для Центральної та Східної Європи було визначено кількість біоетанолу, отриманого з біомаси. Оцінювали врожайність сортів сорго, вирощених як в основних так і в повторних посівах, хімічні компоненти біомаси (целюлоза, геміцелюлоза, лігнін) та кількість етанолу на тонну сухої речовини соломи і вихід етанолу з гектара. Результати вивчення свідчать про те, що сорт Sucrosorgo 506 можна рекомендувати для вирощування на біомасу і його використання для виробництва лігноцелюлозного етанолу, є ефективним як в основних так і в повторних посівах (Bioethanol Production, 2020).

В якості потенційної біоенергетичної культури, *Sorghum saccharatum* має велику зацікавленість у країнах Середньої Азії. *Sorghum* добре росте

на засолених солончакових землях. Звичайний завод із виробництва спирту можна переобладнати для отримання біоетанолу з *Sorghum* (Сорго....., 2017).

*Sorghum saccharatum* вельми важливе і в Китаї як енергетична рослина. В економічному районі “Харбін-Дацин-Ціцікар” у китайській прикордонній провінції Хейлунцзян у 2009 р. побудована енерговиробнича база потужністю 500 тис. т біоетанолу на рік з *Sorghum saccharatum*. Ця культура була внесена до переліку найкращих джерел рідкого біологічного палива в плані розвитку поновлюваних джерел енергії КНР. Вона невибаглива, її можна вирощувати на неродючих і солончакових ґрунтах, не займаючи ріллі (КНР..., 2017).

Відзначається, що сорго цукрове в умовах степової зони, за належної агротехніки, може стабільно забезпечувати врожайність на рівні 20-55 т/га зеленої маси. Тому в таких регіонах, як в Астраханській, Волгоградській областях, Калмикії ця культура може значно підвищити рентабельність рослинництва, збільшити кількість робочих місць для населення та забезпечити попит на цукор (Алабушев и др., 1993, 1996; Григоров, Кенжегалиев, 1990; Шепель, 1985).

Цукрове сорго не тільки добре зростає на засолених ґрунтах, але й здатне при цьому підвищувати синтез та акумуляцію цукрів у сировині. Доведено, що сік зі стебел даної рослини не поступається цукрової тростині за вмістом цукру, однак окрім сахарози, містить фруктозу, глюкозу та розчинний крохмаль (Курило та ін., 2013; Харгелія, 2016; Munteanu and Tabăra, 2011; Waliszewska et al., 2018). Так, у соку цукрової тростини міститься 12 % сахарози та 0,5% глюкози, у коренеплодах цукрових буряків – 17 % сахарози та 0,1 % глюкози, у соку сорго цукрового – 15–17 % сахарози та 1,5–2 % глюкози (Ковтунова та Ковтунов, 2019). Тому з сорго отримують не кристалічний сухий цукор, а сорговий мед (“рідкий” цукор) і патоку, які мають поживну цінність у зв’язку з підвищеним вмістом глюкози. Сорговий мед містить у собі 19 незамінних амінокислот, 8 мікроелементів, зокрема залізо, нікель, кобальт, марганець, хром. Наявність у ньому амінокислотного складу й мінеральних речовин свідчить про значну його харчову та біологічну цінність у якості сировини для хлібопекарської, кондитерської, молочної тощо промисловості (Григоренко, 2016).

У зв’язку з цим увага до генотипів цієї культури без сумніву виправдана, оскільки їх можна використати як потенційне джерело дієтичного й енергетично цінного харчового продукту, а також для

ідентифікації генів, пов'язаних із солестійкістю (Yang, 2020; Тлеу, Умарова & Киршибаев, 2021). Цукрове сорго виявляє підвищену стійкість до ґрунтів із високим вмістом Арсену або миш'яку (As) (Lyubun et al., 2002), а також поліциклічних ароматичних вуглеводнів (продуктів викиду від енергетичної промисловості, автотранспорту, хімічної та нафтопереробної промисловості). Рослини *Sorghum saccharatum* проявляють кращу пластичність до середовища забрудненого цими речовинами порівняно із видами *Lepidium sativum*, *Sinapis alba* (Lipińska, Wyszowska & Kucharski, 2015). Прояв таких властивостей вочевидь може цікавити наукову спільноту з точки зору створення рекомендацій цукрового сорго для використання також й у фіторемидації (Varjani et al., 2020; Nawrot-Paw et al., 2020).

У сучасних дослідженнях *Sorghum saccharatum* доведено високі теплотворні властивості сировини: теплопровідність, об'ємна питома теплота та інші фізичні характеристики (Рахметов, 2007; Mahapatra et al., 2017). Доведено, що рослини вирізняються високими показниками продуктивності, енергетичної цінності, а також можуть використовуватися як фіторемидианти (Рахметов, 2011; Рахметов, 2018; Система..., 2014; Сторожик, Мазура, 2017; Vintilă, 2017).

Важливу роль у формуванні продуктивності біомаси *Sorghum saccharatum*, як теплолюбної, посухостійкої культури, відіграють погодні умови, які забезпечують рослину необхідною кількістю вологи і тепла протягом вегетаційного періоду (Ганженко та ін., 2016; Voytovska et al., 2013). Проводяться дослідження з насінництва даної культури і відображено, що більш стійку життєздатність мають рослини, вирощені з великих та середніх фракцій насіння (Voytovska et al., 2013). При середній врожайності 60,0-80,0 т/га зеленої маси можна отримати близько 70% із загальної маси *Sorghum saccharatum*, що вдвічі більше маси традиційної культури цукрового буряка (Топливная..., 2018).

Для України *Sorghum saccharatum* є високоцінною енергетичною, технічною, кормовою та фітомеліоративною культурою.

Сорго цукрове сьогодні використовується як в одновидових, так і в суміжних посівах із бобами, соєю, вігною, чиною тощо, що в свою чергу дає змогу забезпечити досить високі врожаї біомаси близько 30 т/га. Це вагомо для отримання значного врожаю сировини й подальшої ефективної її переробки.

Зелена маса і зерно *Sorghum saccharatum* за хімічним складом подібні до кукурудзи, але врожайність зеленої маси значно вища і становить

40-80 т/га з вмістом соку у стеблах понад 85% (без листків та волоті). Зерно *Sorghum saccharatum* містить білок (11-15%), крохмаль (68-73%), ліпиди (3,5-4,5%), провітамін А, каротин, вітаміни групи В, рибофлавін і дубильні речовини. У 100 кг зерна сорго 117-130 корм. од. (Рахметов, 2011; Рахметов, 2018; Система..., 2014; Rakhmetov et al., 2018).

Стебло і насіння сорго цукрового застосовуються безпосередньо для виробництва енергії з біомаси та лігноцелюлозного біопалива. Солодкий сік сорго містить 15-20% цукру. Висока цукристість соку дозволяє при ферментації виробляти етанол. Після отримання соку, побічний продукт (багаса) може бути використана для виробництва електроенергії, паперу та кормів для худоби (Oktem, 2018).

Нами у попередніх дослідженнях, проведених у Національному ботанічному саду імені М.М. Гришка НАН України встановлено, що сорти та форми *Sorghum saccharatum* є цінним джерелом поживних речовин і біопалива в період плодоношення та досягання насіння. Серед досліджених генотипів SSB характеризувався найбільшим вмістом сухої речовини та золи, SSA1 – загальним вмістом цукрів, SSA2 – вітамінів, SSA5 – енергетичною цінністю (Rakhmetov et al., 2018, Rakhmetov et al., 2020).

Завдячуючи багаторічним дослідженням гібридів сорго цукрового в умовах Покровської навчально-наукової станції меліоративної ДДАЕУ оцінено особливості росту та врожайність гібридів вітчизняної та американської селекції. Установлено рівень виробництва зеленої біомаси та теоретичний вихід біоетанолу. Також визначено, що використання українських гібридів Медове та Зубр дозволяє виробляти від 3600 до 4250 л/га етанолу. Дещо нижчим виявився потенціал американських гібридів SS506 та Mohawk – 3150–3400 л/га. Підживлення азотними добривами дозволило підвищити вихід теоретичного етанолу з 27% до 68%, зрошення та додавання біогумату – з 15% до 36% (Kharytonov та інш., 2021).

У роботі О. Ганженко (2021) визначено агробіологічні основи формування продуктивності сорго цукрового і буряків цукрових залежно від сортового асортименту, доз мінеральних добрив, строків сівби насіння та збирання цукромісткої біомаси для різних підзон Лісостепу України. Установлено морфологічні й фізіологічні особливості формування і реалізації біологічного потенціалу продуктивності цукроносних культур залежно від елементів технології вирощування та факторів зовнішнього середовища. На основі аналізу динаміки накопичення енергетично



корисних речовин у вегетативних органах рослин, автором обґрунтовано оптимальні строки збирання врожаю залежно від сортових особливостей, ґрунтово-кліматичних умов вирощування та особливостей подальшого використання цукромісткої біомаси (Ганженко, 2021).

В. І. Середою (2021) уперше здійснено добір батьківських компонентів для селекції гібридів сорго цукрового в умовах Степу України та проведена оцінка селекційного матеріалу залежно від напрямів використання. Доведено, що для отримання високої врожайності зерна та зеленої маси в рослин сорго цукрового необхідно проводити ранню оцінку за морфологічними показниками (кількість міжвузлів і листків на рослині, а також діаметр стебла). Показано, що високим вмістом цукрів у соку стебел вирізняються комбінації А 326 × Карликове 45 (14,7 %), Кафрське кормове 186с × Карликове 45 (15,3 %), Кафрське кормове 186с × Силосне 42 (15,7 %), які можна використовувати як джерела цукроносною сировини для виробництва біоетанолу (Середя, 2021).

Таким чином, слід відзначити, що як у світі, так і в Україні *Sorghum saccharatum* (L.) Moench є унікальною культурою з високим потенціалом використання як у харчовій, так і в енергетичній промисловості. Це пов'язано з можливістю виробництва (біо)етанолу як із соку, так і з біомаси цієї культури. Сік стебел сорго містить цукор на рівні цукрової тростини. Крім того, невибагливі до вирощування сорго роблять цю культуру ще більш привабливою для виробництва цукру та етанолу.

У зв'язку із такими унікальними властивостями рослин *S. saccharatum* світовою науковою спільнотою окреслюється перспектива подальших селекційних досліджень його задля створення стійких, з підвищеними продуктивними показниками гібридів, форм та сортів. Це дозволить запропонувати різним галузям промисловості цінне джерело фітосировини. Підтвердженням цього є сучасні дослідження щодо порівняння різних генотипів *S. saccharatum* за інтродукції в тому, чи іншому регіоні (Baiseitova et al., 2021; Enchev, 2021; Yucel, Yucel, & Hatipoglu, 2021; Khidr, 2021; Bobokulov, Popova, & Kh, 2021; Hutsol et al., 2021).

Практичне використання різних генотипів *S. saccharatum* нині переважно спрямоване на отримання цукрів для подальшої їх переробки на біопаливо (Oktem et al., 2021), а також кормів для великої рогатої худоби (Jankowski et al., 2016). Щодо біоенергетичної цінності, то разом з іншими цукровмісними рослинами проілюстровано не тільки високий вихід потенційної енергії з одиниці площі, а також позитивний оздоровчий

ефект на агроекосистеми (Nenciu & Vladut, 2021), що свідчить про екологічну безпечність створення і впровадження нових гібридів, форм та сортів цих культур.

З погляду технології, сорго розглядається як перехідна сировина для виробництва біоетанолу від першого до другого покоління. Проте ефективного технологічного розвитку вирощування та переробки рослин у Північній та Центральній Україні стримує відсутність колекції генотипів сорго та адаптованих сортів для його масштабного впровадження. Крім того, для цього регіону не проводилася оцінка потенційної продуктивності (біо)етанолу, що важливо для ефективного застосування нових технологій виробництва біопалива та успішного розвитку зеленої економіки.

У наших попередніх дослідженнях (2010-2018 рр.) вивчено біоморфологічні особливості та потенціал урожайності рослин і визначено біохімічний склад фітосировини в різні періоди вегетації, зокрема в період технічної стиглості надземної маси рослин. Виділено більш продуктивні форми та сорти цукрового сорго за врожайністю, вмістом сухої речовини, цукристістю та енергетичною цінністю біомаси в період квітування та воскової стиглості.

Проаналізовано технологічні властивості рослинної біомаси для виробництва альтернативного рідкого палива (зокрема, біоетанолу). Важливо, що для новостворених генотипів сорго розроблено оптимальні умови вирощування, а також оцінено їх продуктивність. Сорго має значний потенціал в Україні як нова енергетична культура для виробництва цукру. Створено колекцію зародкової плазми цієї культури (понад 40 зразків), що включає інтродуковані та акліматизовані генотипи і нововиведені лінії та сорти. Вивчено біологічні показники сорго в Україні та морфологію рослин. Найбільш перспективні генотипи використано для виведення нових високопродуктивних сортів сорго цукрового. Потенційна продуктивність (біо)етанолу для різних видів цукрової сировини може досягати загалом понад 11000 л/га (Rakhmetova et al., 2020).

Таким чином, *Sorghum saccharatum* – це культура багатофункціонального використання. Проте, в Україні не ведеться на промислових засадах насінництво, а також вирощування її на енергетичні, продовольчі та кормові цілі як однієї з перспективних, рентабельних культур.

На жаль, вузьким місцем ефективного технологічного розвитку виробництва біопалива з *Sorghum saccharatum* в умовах північної та

центральної частин України є відсутність колекції генотипів і адаптованих високопродуктивних скоростиглих сортів для його широкомасштабного вирощування в зонах Лісостепу та Полісся.

В НБС імені М.М.Гришка НАН України створено унікальна колекція енергетичних рослин, що становить Національне надбання. Теоретично обґрунтовано та практично реалізуються основні засади використання мобілізованих і створених нових генотипів *Sorghum saccharatum* з високим біолого-екологічним та енергетичним потенціалом. У результаті багаторічної інтродукційної та селекційної роботи у відділі культурної флори НБС імені М.М. Гришка НАН України напрацьовано цінний генофонд, зокрема створено високопродуктивні генотипи *Sorghum saccharatum* для вирощування в північних районах України. Виведені сортозразки вирізняються високим виходом біоетанолу серед наявних цукроносних культур.

У ДУ “Інститут харчової біотехнології та геноміки НАН України” розгорнуто дослідження, спрямовані на розробку технологічних основ виробництва біоетанолу з сировини *Sorghum saccharatum*. Ця культура (стебла) – не належить до продовольчої сировини, тому що вона містить вуглеводи, які не можна переробити в товарний кристалічний цукор. Протягом багаторічного періоду науковцями Інституту вивчалися технологічні властивості цукрового сорго, вирощеного у Хмельницькій (Шепетівський р-н) та Сумській (Лебединський р-н) областях. Проведена оцінка біомаси сортів та гібридів *Sorghum saccharatum*, створених у співавторстві з Національним ботанічним садом імені М.М.Гришка НАН України.

Важливим напрямом дослідження сорго цукрового в межах даної роботи є отримання бутанолу з фітосировини рослин. Є доведені результати дослідження накопичення бутанолу при культивуванні ліофілізованого штаму після зберігання незернової біомаси чотирьох сортів сорго цукрового (*Sorghum saccharatum*) як субстрату (Тігунова, 2021).

## РОЗДІЛ 2.

### УМОВИ, ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

---

Експериментальні дослідження з інтродукції, селекції та культивування різних форм, гібридів і сортів *Sorghum saccharatum* у польових та лабораторних умовах були проведені в Національному ботанічному саду імені М.М.Гришка НАН України (НБС імені М.М.Гришка) та Дослідному сільськогосподарському виробництві Інституту фізіології рослин і генетики НАН України (ДСВ ІФРГ НАН України “Глеваха”).

Як свідчать результати багаторічних досліджень погодно-кліматичні умови суттєво впливали на особливості росту, розвитку та продуктивність рослин сорго цукрового. У більшості років період активної вегетації рослин супроводжувався значним підвищенням середньодобової температури повітря та низьким рівнем вологозабезпечення. Висока температура та дефіцит вологи суттєво вплинули на ріст і розвиток рослин на початку вегетації. Але завдяки високому адаптаційному потенціалу та стійкості досліджуваних зразків інтродукованих рослин і створених форм та сортів *Sorghum saccharatum* примхливі погодно-кліматичні умови не суттєво позначилися на розвитку, ростових і продуктивних показниках рослин у другому періоді вегетації.

Об'єктом досліджень був процес оцінки різних форм та сортів рослин *Sorghum saccharatum* в умовах північної частини Правобережного Лісостепу України за морфометричними, біохімічними особливостями та продуктивними параметрами. для оптимізації сорго як визначальної економічно цінної сировини для біопалива.

Предметом дослідження були високоадаптивні форми та сорти сорго цукрового власної селекції та інтродуковані рослини (14 зразків).

Польові досліді закладали відповідно до існуючих методик стосовно Держсортмережі і науково-дослідних установ тривалістю від трьох до шести років у чотирьохкратному повторенні (Доспехов, 1986). Розмір посівних ділянок – 60-100 м<sup>2</sup>, їх облікова площа – 30-60 м<sup>3</sup>. Розміщення варіантів за повтореннями систематичне і рендомізоване. Виробничі

досліди виконували за трьох- чотирьохкратного повторення на площі 1-2 га кожна.

Біометричні вимірювання виконані за методиками Г.М. Зайцева, Б.А. Доспехова (Доспехов, 1986; Лакин, 1990). Особливості росту та розвитку рослин встановлено за методикою “Фенологія трав’яних рослин за інтродукційних досліджень” (Рахметов, Ковтун-Водяницька, 2021). Для вивчення морфолого-технічних особливостей надземної частини досліджуваних рослин застосовувалася загальноприйнята термінологія (Артюшенко, 1990; Биоморфология..., 2004).

Хімічні аналізи проводили в біохімічній лабораторії відділу культурної флори НБС імені М. М. Гришка. Дослідні зразки відбирали у фазі квітування та досягання насіння згідно загальноприйнятих методик (Крищенко, 1983). Для встановлення біохімічної цінності рослин визначали: абсолютно суху речовину шляхом висушування зразків при температурі 105 °С до постійної маси, загальний вміст цукрів – методом Бертрана (Крищенко, 1983), вміст ліпідів – методом визначення знежиреного залишку за допомогою апарату Сокслета, золу – методом спалювання сухої сировини в муфельній печі за 300-550<sup>0</sup> (Грицаєнко та ін., 2003). Визначення вмісту білку в сухій рослинній сировині проводилося за методом Кельдаля (KDN – 04D - Kjeldal Digestion Unit та апарату АТН – 100).

Визначення кількості енергії в зразках здійснювали на калориметрі ІКА С 200. Фотографії виконано цифровою фотокамерою Canon Powershot G5X.

Для переробки побічної продукції енергетичних рослин використовували подрібнювач садовий Viking GB 370S та гранулятор ROTEX-100.

Статистичну обробку даних здійснювали за допомогою програми Excel 2010. Для аналізу отриманих даних використовували мінімальні, максимальні, середні значення, стандартне відхилення, коефіцієнт варіації.

Предмет, об’єкт та методики досліджень за проведення дослідів з оптимізації умов культивування штамів-продуцентів для ферментації сорго подано в розділі 4.

## РОЗДІЛ 3.

# ГЕНЕТИЧНІ РЕСУРСИ РОСЛИН *SORGHUM SACCHARATUM* СТВОРЕНІ В НБС ІМЕНІ М.М.ГРИШКА НАН УКРАЇНИ. БІОЛОГО-ТЕХНОЛОГІЧНА І ЕНЕРГЕТИЧНА ОЦІНКА ФІТОСИРОВИНИ ЯК ОСНОВИ ДЛЯ КОМПОНЕНТІВ РІДКИХ ПАЛИВ ТА ЕНЕРГОНОСІЇВ

---

### 3.1. Генетичні ресурси рослин *Sorghum saccharatum* створені в НБС імені М.М.Гришка НАН України

У відділі культурної флори НБС імені М.М.Гришка НАН України проведений скринінг близько 100 мобілізованих зразків сорго цукрового. Виведено, оцінено та відібрано за комплексом біолого-технологічних і продуктивних параметрів перспективні генотипи (близько 60 зразків) сорго цукрового як фітосировини другого покоління для виробництва рідких біопалив (бутанолу) та біоетанолу (рис. 3.1) (Колекційний..., 2020).



Рис. 3.1. Загальний вигляд ділянки: генотипова колекція *Sorghum saccharatum*



Різні генотипи рослин *Sorghum saccharatum*



Різноманіття волотей генотипів рослин *Sorghum saccharatum*

Рис. 3.1. Інтродукційно-селекційний фонд *Sorghum saccharatum* створений в НБС імені М.М.Гришка НАН України

Серед зібраних у генофонді форм та сортів *Sorghum saccharatum* представлені зразки з Європи, Азії, Африки та Америки. У результаті багаторічних інтродукційних та селекційних досліджень ми отримали насінну репродукцію у всіх зазначених генотипів. На основі зібраного генофонду створено нові генотипи, які відзначаються високою адаптивною здатністю до умов культивування. Окремі зразки суттєво перевищують вихідні форми за продукційним та енергетичним потенціалами.

За результатами проведених інтродукційних, селекційних та біотехнологічних досліджень виділено 14 перспективних зразків для проведення комплексної оцінки створених генотипів в умовах північної частини Правобережного Лісостепу України – за біолого-морфометричними, біохімічними особливостями, продуктивністю рослин, технолого-енергетичними показниками вирощування та використання фітосировини (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

**Перелік зразків рослин *Sorghum saccharatum* колекційно-селекційного фонду відділу культурної флори НБС імені М.М.Гришка НАН України, що були задіяні в дослідженнях**

Форма, сорт <i>Sorghum saccharatum</i>	
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, cv. Pamiati Shepelia	Сорго цукрове, с. Пам'яті Шепеля
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, cv. Botanichniy	Сорго цукрове, с. Ботанічний
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, cv. Enerhodar	Сорго цукрове, с. Енергодар
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, cv. Progres	Сорго цукрове, с. Прогрес
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, cv. Medove	С. цукрове, с. Медове
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. RAGT ST-207	Сорго цукрове, ф. RAGT ST-207
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f.AMBR- 2	Сорго цукрове, ф. АМБР-2
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f.AMBR- 3	Сорго цукрове, ф. АМБР-3
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f.AMBR- 4	Сорго цукрове, ф. АМБР-4
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f.AMBR-5	Сорго цукрове, ф. АМБР-5
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f.RUSBR-1	Сорго цукрове, ф. РУСБР-1
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f.RUSBR-4	Сорго цукрове, ф. РУСБР-4
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f.RUSBR-4.1	Сорго цукрове, ф. РУСБР-4.1



Продовження табл. 3.1

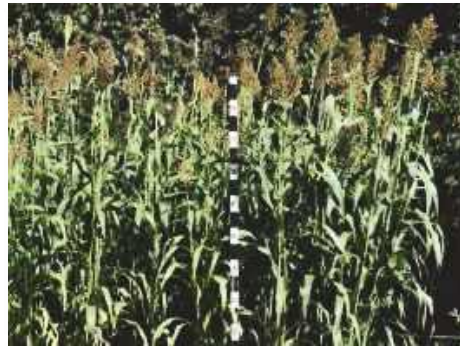
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. ETSSTSF-1.5	Сорго цукрове, ф. ЕЦЦФ -1.5
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. ETSSTSF-2(10)	Сорго цукрове, ф. ЕЦЦФ -2(10)
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. ETSSTSF-1.2	Сорго цукрове, ф. ЕЦЦФ - 1.2
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. ETSSTSF-1.5	Сорго цукрове, ф. ЕЦЦФ -1.5
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. ETSSTSFRT-1	Сорго цукрове, ф. ЕЦЦФРТ -1
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. ETSSTSF-2	Сорго цукрове, ф. ЕЦЦФ -2
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. ETSSTSF-2(1)	Сорго цукрове, ф. ЕЦЦФ -2(1)
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. ETSSTSF-2(6)	Сорго цукрове, ф. ЕЦЦФ – 2(6)
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. ETSSTSF-2(7)	Сорго цукрове, ф. ЕЦЦФ – 2(7)
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. ETSSTSFRR-2(9)	Сорго цукрове, ф. ЕЦЦФРР – 2(9)
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. ETSSTSF-2(10)	Сорго цукрове, ф. ЕЦЦФ – 2(10)
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. ETSSTSFVS-3 (Дн5с×ДнВ42)	Сорго цукрове, ф. ЕЦЦФВС -3
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. ETSSTSFМ-5	Сорго цукрове, ф. ЕЦЦФМ-5
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. ETSSTSFМ-5.1	Сорго цукрове, ф. ЕЦЦФМ-5.1
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. ETSSTSFPSH-7	Сорго цукрове, ф. ЕЦЦФПШ-7
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. ETSSTSF-8	Сорго цукрове, ф. ЕЦЦФ - 8
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. ETSSTSF-89	Сорго цукрове, ф. ЕЦЦФ - 9
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. AMBR-1	Сорго цукрове, ф. АМБР-1
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. AMBR-1.1	Сорго цукрове, ф. АМБР-1.1

<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. AMBR-2	Сорго цукрове, ф.АМБР-2
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. AMBR-2.1	Сорго цукрове, ф.АМБР-2.1
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. AMBR- 3	Сорго цукрове, ф.АМБР-3
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. AMBR- 4	Сорго цукрове, ф.АМБР-4
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. AMBR-5	Сорго цукрове, ф.АМБР-5
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. RUSBR-1	Сорго цукрове, ф.РУСБР-1
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. RUSBR-2	Сорго цукрове, ф.РУСБР-2
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. RUSBR-4	Сорго цукрове, ф.РУСБР-4
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, f. RUSBR-4.1	Сорго цукрове, ф.РУСБР4.1
<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench, hybrid-720	Сорго цукрове, гібрид 720

Установлено біолого-технологічні, біохімічні властивості біомаси як енергетичної сировини другого покоління. Відібрано найцінніші генотипи як вихідні форми, на основі яких виведено нові сорти ('Енергодар', 'Ботанічний' та 'Соргодар') (рис. 3.2). Визначено продуктивний, енергетичний потенціал рослин та біопалива і оцінено вихід компонентів рідких палив.



Сорт Енергодар



Сорт Ботанічний



Сортозразок Соргодар

Рис. 3.2. Сорти *Sorghum saccharatum* створені в НБС імені М.М.Гришка НАН України

Результати досліджень свідчать про те, що *Sorghum saccharatum* (L.) Moench як нова високопродуктивна біоенергетична культура в північній частині України характеризується високими ростовими та продуктивними показниками. В умовах інтродукції сорго цукрове – однорічна рослина, проходить всі етапи органогенезу за один вегетаційний період. Розвивається від проростання насіння до досягання його. Має такі фази розвитку: сходи, кушіння, вихід у трубку, викидання волоті, квітування, молочно-воскова стиглість і досягання. Квітування рослин проходить в липні-серпні, досягання насіння – з другої половини серпня до кінця вересня. Вегетаційний період залежно від формових та сортових особливостей триває від 120 до 180 діб. Дуже пізньостиглі генотипи можуть вегетувати понад 200 діб.

*Sorghum saccharatum* – теплолюбна рослина. Насіння її проростає при температурі ґрунту 10-12 °С, а сходи не витримують температури нижче 0 °С. Добре росте і розвивається за температури 30-35 °С, легко витримує високу температуру – до 40 °С. Це одна з посухостійкіших рослин з транспіраційним коефіцієнтом 150-200.

*Sorghum* невибагливе до ґрунту – може добре рости як на легких, так і на важких за механічним складом ґрунтах, малочутливе до підвищеної засоленості ґрунту. Проте кращими для нього є легкі супіщані ґрунти, де воно формує найвищі врожаї.

Рослини сорго – високорослі (сягають понад 300 см), листки – довголанцетні, суцвіття – волоть. Довжина волоті – понад 40 см (60-70 см). Зерно *Sorghum* – пливчате, видовженої форми, має різну кольорову гаму. Маса 1000 зернин змінюється від 16 до 33 г, залежно від генотипових особливостей та умов вирощування. Коренева система рослин мичкувата, сильнорозвинена, заглиблюється в ґрунт на 150-200 см. Утворюються також і повітряні корені.

В умовах інтродукції врожайність надземної маси становила від 60 до 130 т/га, насіння – від 1300 до 4000 (окремі зразки можуть забезпечувати до 8000) кг/га залежно від генотипових особливостей.

### **3.2. Біолого-технологічна оцінка рослин та фітосировини *Sorghum saccharatum* як основи для компонентів рідких палив та енергоносіїв**

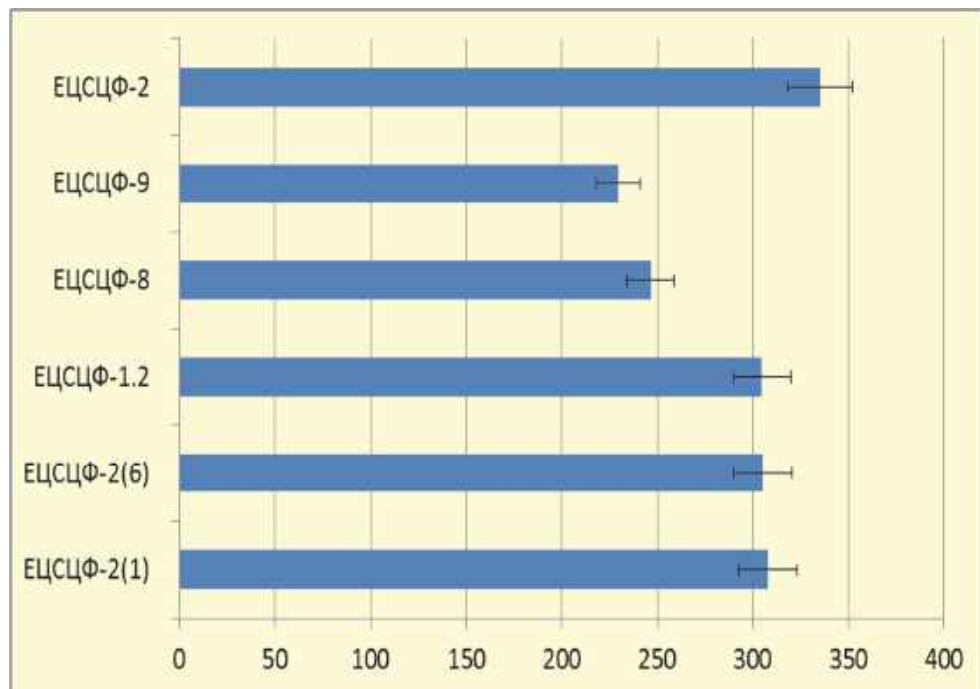
У результаті проведення польових досліджень здійснено біометричний аналіз різних форм та сортів *Sorghum saccharatum* зібраних у колекційному фонді НБС імені М.М. Гришка НАН України у фазах квітання та плодоношення. Важливим показником при оцінці морфолого-технологічних властивостей *Sorghum saccharatum* є висота рослин. Значення цього показнику для даних рослин суттєво залежать від дози внесення добрив (Ayub et al., 2002), що може бути враховано у технології вирощування для підвищення продуктивності зеленої маси. Порівняльні дослідження дозволили визначити суттєві відмінності за ростом рослин залежно від формових, сортових особливостей та періоду вегетації. У фазу квітання рослин найвищої висоти досягли серед форм – ф. ЕЦСЦФ-2, ф. АМБР-1.1 та серед сортів – с. Прогрес і с. Енергодар (рис. 3.3, 3.4).

У цілому, за період досліджень серед всіх випробовуваних генотипів за висотою рослин *Sorghum saccharatum*, під час технічної стиглості, виділено чотири групи. У першу групу входять рослини, які мають висоту до 150 см, у другу групу – 151-200 см, у третю групу – 201-250 см та в

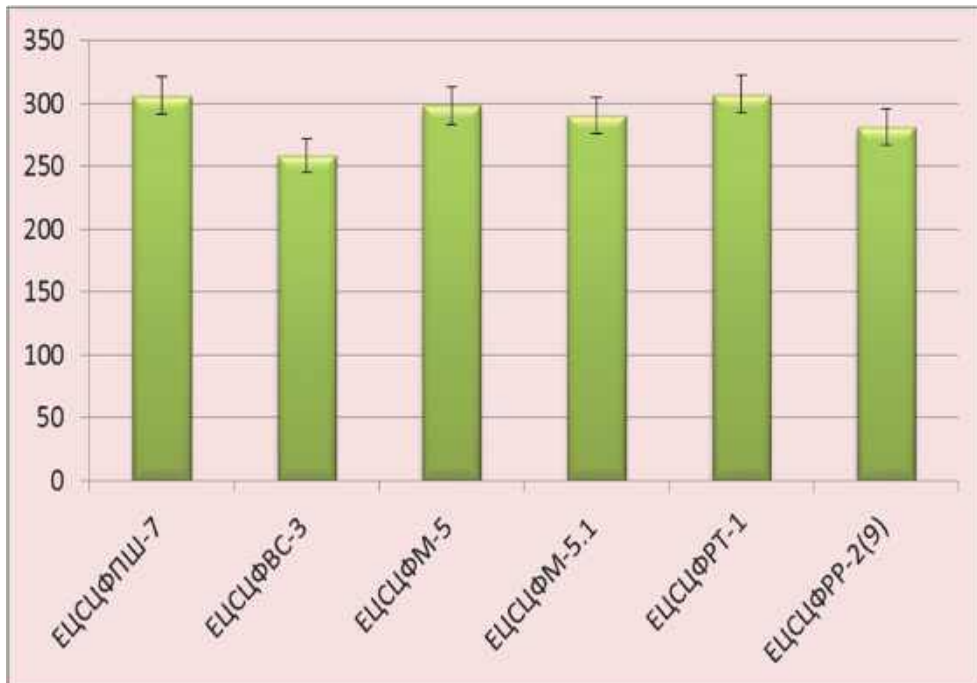
четверту групу – понад 251 см. Виходячи з цієї класифікації створені в НБС генотипи відносяться в більшості до третьої та четвертої групи високорослих рослин.



А



В



С

Рис. 3.3. Висота рослин різних форм *Sorghum saccharatum* у фазу квітування (А, В, С), см

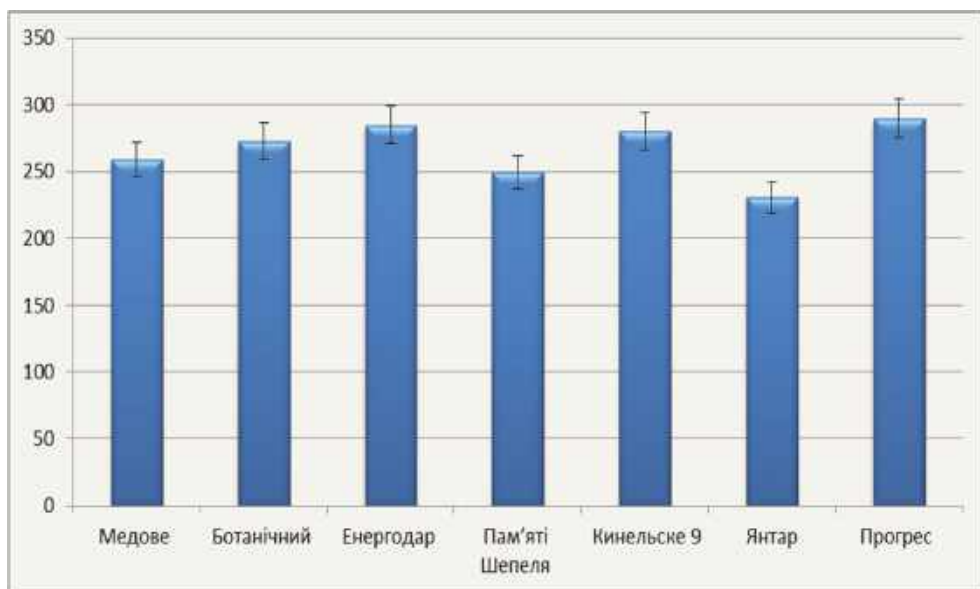


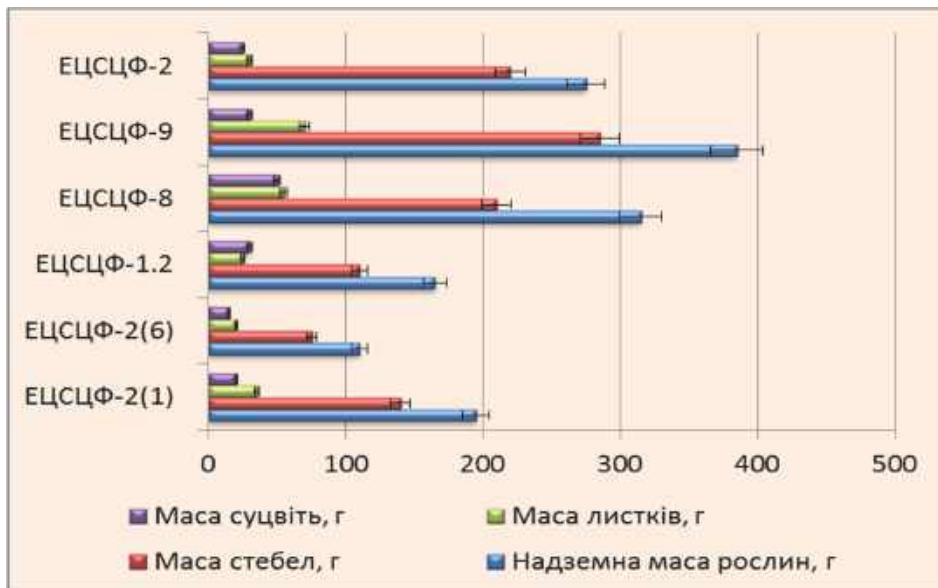
Рис. 3.4. Висота рослин сортів *Sorghum saccharatum* у фазу квітування

Залежно від генотипу сорго у дослідженнях (Harmini et al., 2022) в Індонезії у період квітування встановлено, що найвищі рослини сягали у висоту 320 см, а найнижчі – 204 см.

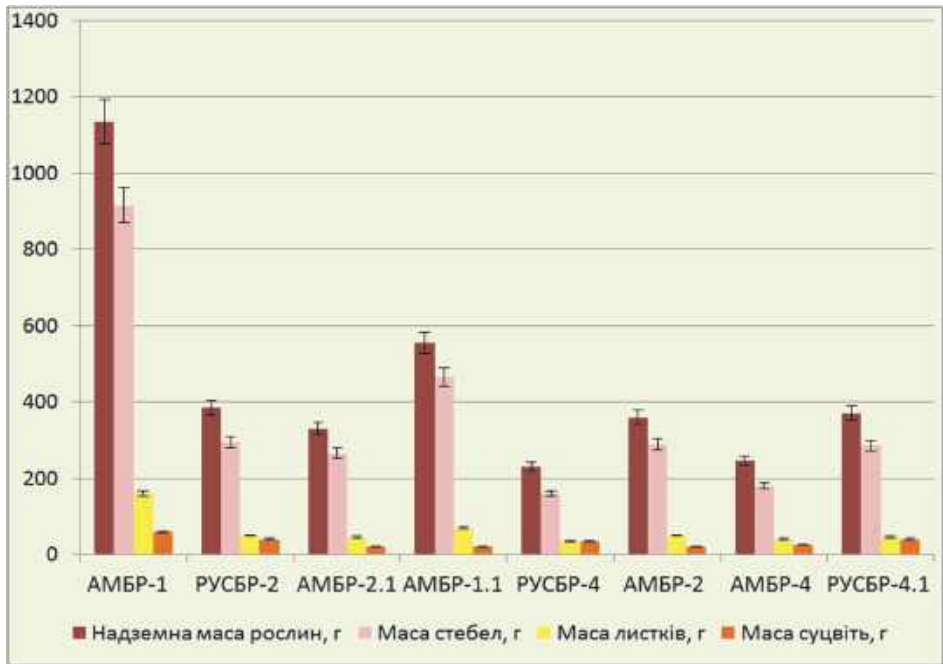
Важливим періодом, з точки зору технологічної стиглості, для сорго цукрового є період квітування–плодоношення. У цей період продуктивність рослин у значній мірі залежить від урожайності фітосировини та від її структурних частин. За цими показниками, між різними генотипами, встановлена суттєва різниця. Серед досліджених форм рослин найвищою сировинною продуктивністю у фазу квітування відзначилися ф. ЕЦСЦФ - 9, ф. АМБР-1, ф. ЕЦСЦФМ-5.1, серед сортів – с. Ботанічний та с. Енергодар (рис. 3.5, 3.6).

Аналіз структурних частин рослин дозволив виявити, що незалежно від генотипових особливостей, найбільша дільова частка у фітосировині припадає на стебла рослин: за масовою часткою найбільша доля стебел була в тих же зразків, що і надземна маса. У більшості зразків дільова частка листків перевищувала суцвіттях, крім форм ф. ЕЦСЦФ-1.2 та ф. ЕЦСЦФРР-2(9) і серед сортів – с. Прогрес.

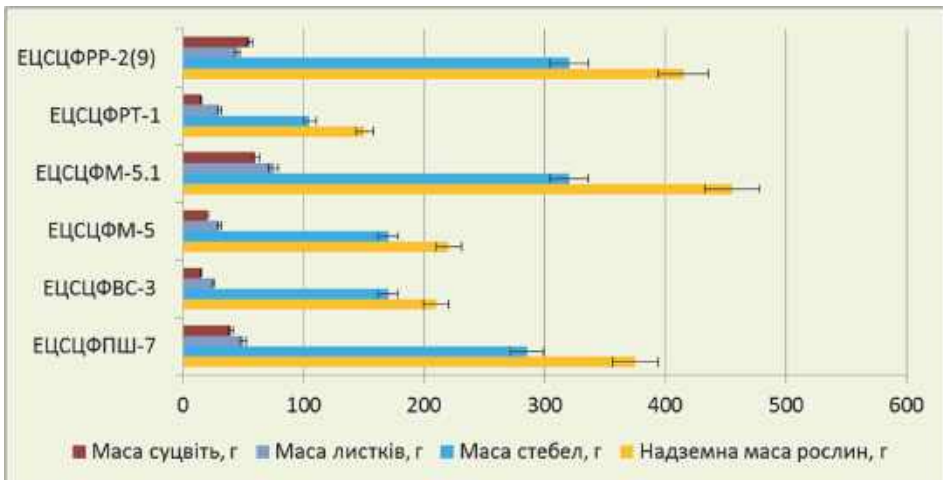
За дільовою часткою листків серед форм перевищували ф. ЕЦСЦФ-9, ф. АМБР-1 та ф. ЕЦСЦФМ-5.1, серед сортів – с. Енергодар. Щодо суцвітть, найбільша їх маса була у форм ф. ЕЦСЦФ-1.2 і ф. ЕЦСЦФРР-2(9) та у сорту – с. Прогрес.



А



В



С

Рис. 3.5. Маса рослин та їх структурних частин різних форм *Sorghum saccharatum* у фазу квітання (А, В, С)



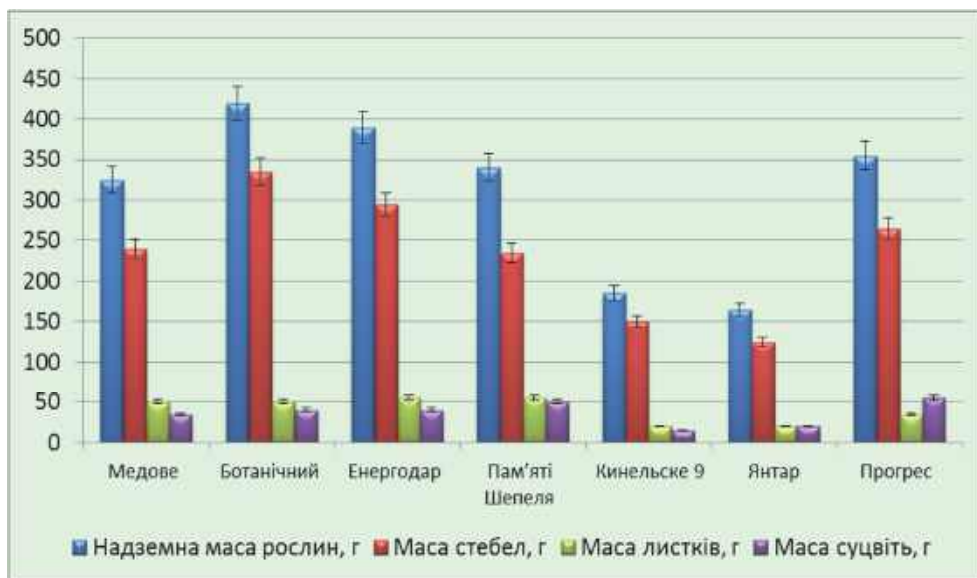
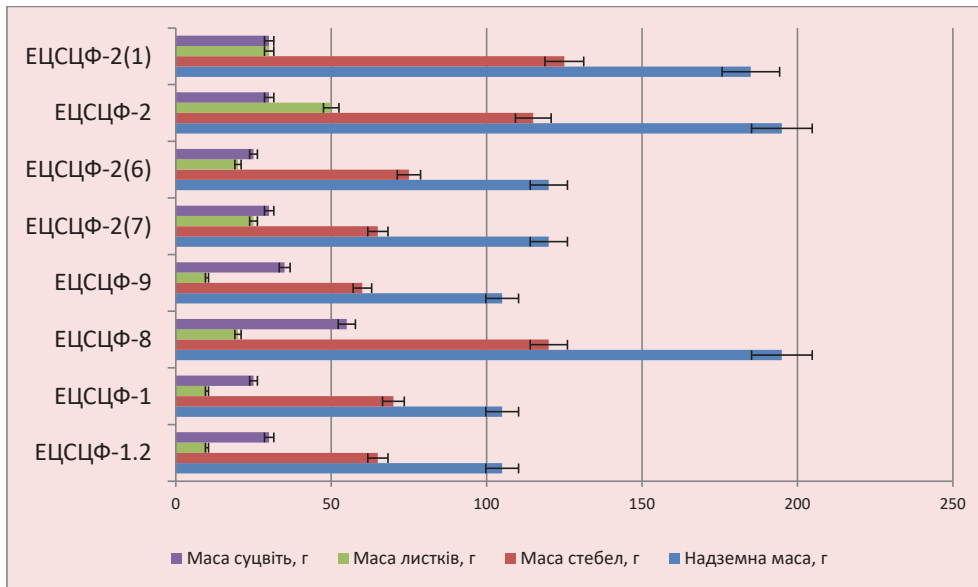


Рис. 3.6. Маса рослин та їх структурних частин різних сортів *Sorghum saccharatum* у фазу квітання

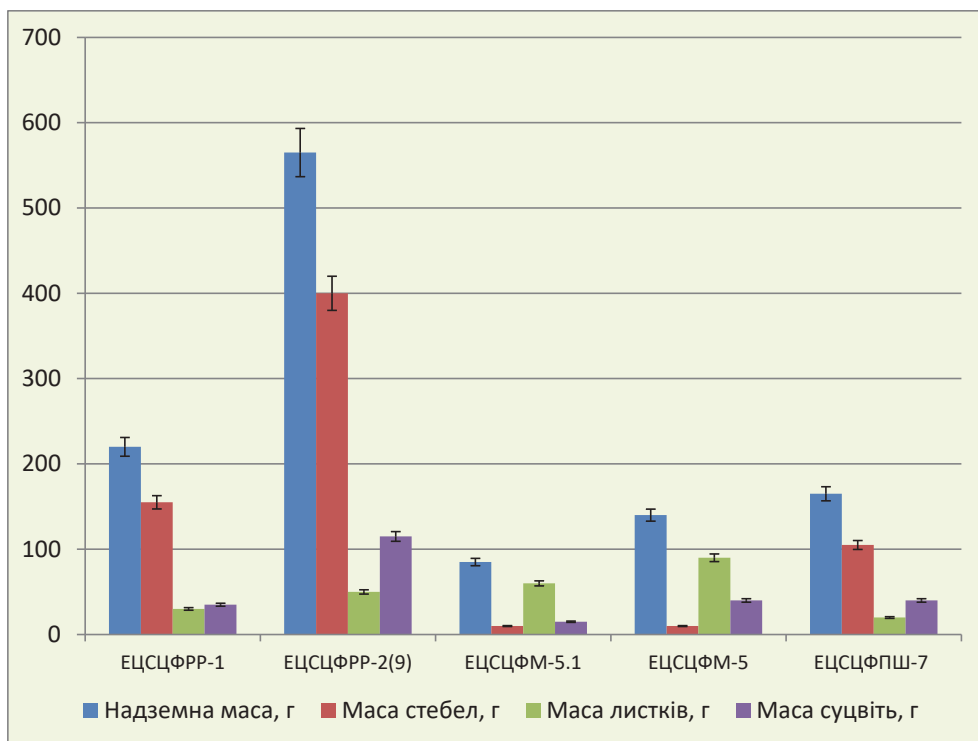
У дослідженнях Waani et al. (2023) відзначено, що чим вища адаптаційна здатність сорту, тим більша продуктивність рослин. Залежно від сорту маса листків сягала від 52,53 г/рослину (сорт Numbu) до 88,33 г/рослину (сорт Super 6). Маса стебел сорго коливалася від 264,6 г/рослину (сорт Numbu) до 327,9 г/рослину (сорт Super 6), маса суцвіть – від 42,60 г/рослину (с. Super 1) до 81,47 (с. Super 6).

Із фази квітання до досягання насіння, завдяки великій кількості опадів у цей період, відбувається суттєвий приріст ростових та продуктивних показників рослин сорго цукрового. Найбільшою висотою в кінці вегетації характеризувалися форми ф. ЕЦЦФ-2, ф. ЕЦЦФМ-5, ф. АМБР-1, ф. АМБР-3 і сорти – с. Кинельское-9 та с. Енергодар.

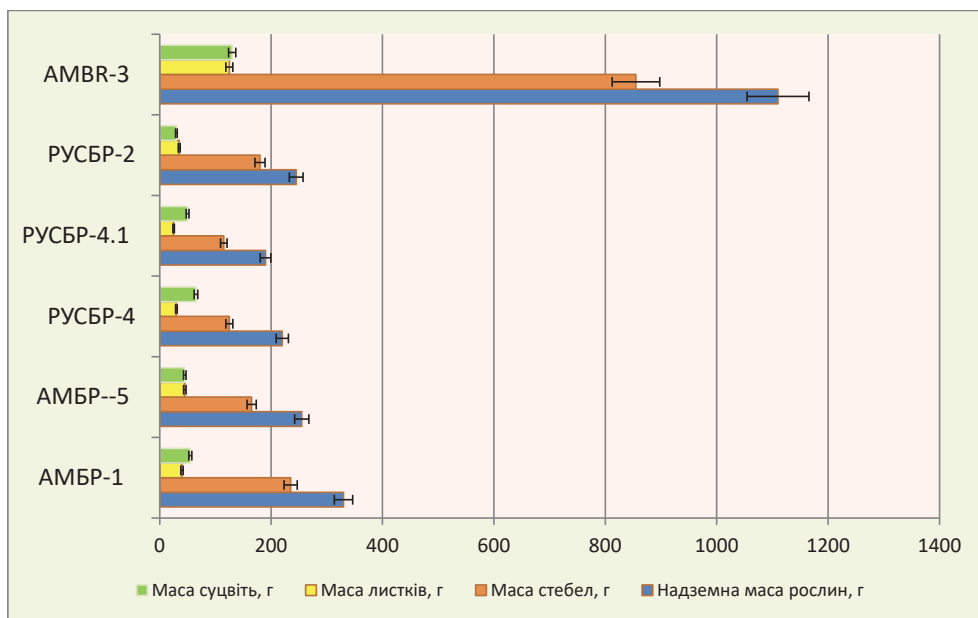
На кінець вегетаційного періоду найбільшу продуктивність надземної маси, серед форм забезпечили ф. ЕЦЦФ-2, ф. ЕЦЦФ-2(1), ф. ЕЦЦФРР-2(9) та ф. АМБР-3, посеред сортів – с. Кинельское-9 і с. Енергодар (рис. 3.7, 3.8).



A



B



С

Рис. 3.7. Маса рослин та їх структурних частин різних форм *Sorghum saccharatum* у фазу достигання насіння (А, В, С)

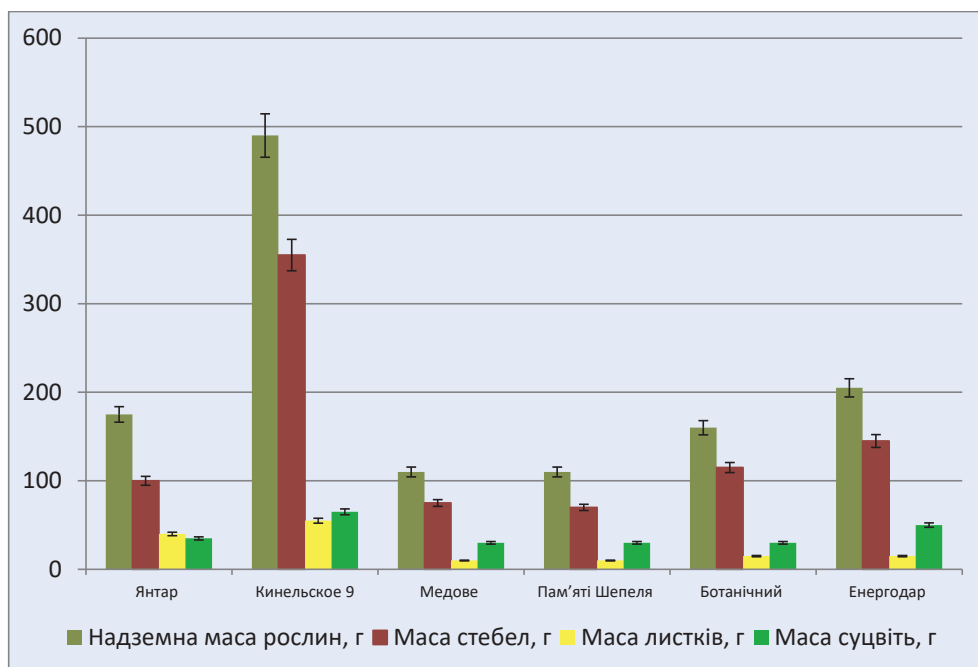


Рис. 3.8. Маса рослин та їх структурних частин різних сортів *Sorghum saccharatum* у фазу достигання насіння

У фітосировині найбільшу дольову частку мали стебла незалежно від генотипових особливостей. Максимальна продуктивність стебел була у тих же форм (ф. ЕЦСЦФ-2, ф. ЕЦСЦФ-2(1), ф. ЕЦСЦФРР-2(9) та ф. АМБР-3) та сортів (с. Кинельское-9 і с. Енергодар), що тенденційно і надземній масі.

Урожайність надземної маси *Sorghum saccharatum* змінюється протягом вегетації та досягає максимального значення в період досягання насіння. Як і основні біометричні показники, урожайність суттєво залежала від площі живлення (табл. 3.2). Серед усіх варіантів найбільшої врожайності досягнуто за площі живлення 700 см<sup>2</sup> на рослину. За виходом цукру найкращим виявився спосіб сівби 45×20 см<sup>2</sup>. Варто відзначити, що при всіх варіантах міжряддя найкращою була схема розміщення рослин у рядку через 20 см.

Таблиця 3.2

**Урожайність надземної маси та вихід цукру з рослин *Sorghum saccharatum* (св. Botanichnyi) залежно від площі живлення на кінець вегетації**

Схема сівби (ширина міжряддя×відстань між рослинами в рядку), см×см	Площа живлення рослин, см <sup>2</sup>	Кількість рослин, тис.шт./га	Урожайність надземної маси, т/га	Вихід цукру, т/га
70 ×30	2100	48	49,76	4,11
70×20	1400	71	77,22	5,87
70 ×10	700	143	81,51	5,24
45 ×30	1350	71	51,06	5,57
45× 20	900	111	64,38	7,18
45 ×10	450	222	59,94	4,39
15× 30	450	222	50,65	4,02
15 ×20	300	333	79,98	6,30
15 ×10	150	667	61,32	4,85
НІР <sub>05</sub>	2,5			

Для оцінки продуктивного потенціалу нових генотипів *Sorghum saccharatum* у виробничих умовах, ми проводили дослідження на Поділлі України на базі ТОВ “Лотівка Еліт” Шепетівського району Хмельницької

області. У виробничих посівах були випробувані сорти створені в НБС – с. Енергодар та с. Ботанічний.

Незважаючи на пізню сівбу (друга декада червня), рослини у виробничих умовах до періоду технічної стиглості (фаза квітування-початок плодоношення) встигли забезпечити великий приріст (до 310 см висоти) та формувати значну продуктивність фітомаси (до 550 г/рослину). Серед досліджених генотипів найкращі показники забезпечив с. Енергодар (рис. 3.9, 3.10).

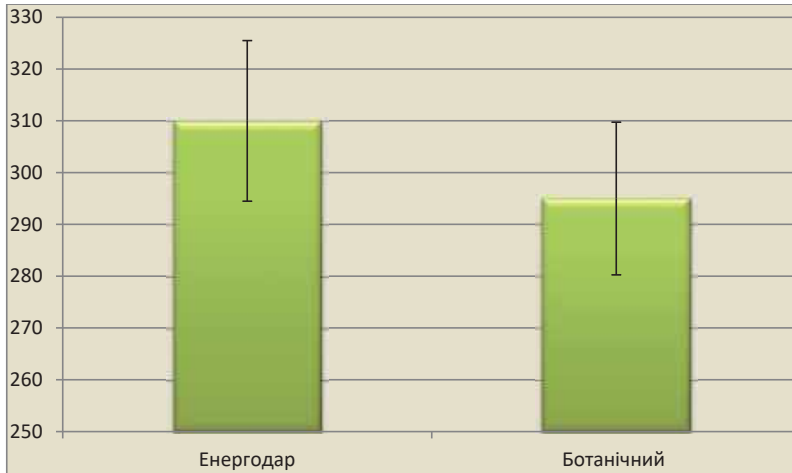


Рис.3.9. Висота рослин сортів *Sorghum saccharatum* у фазу квітування (виробничі випробування), см

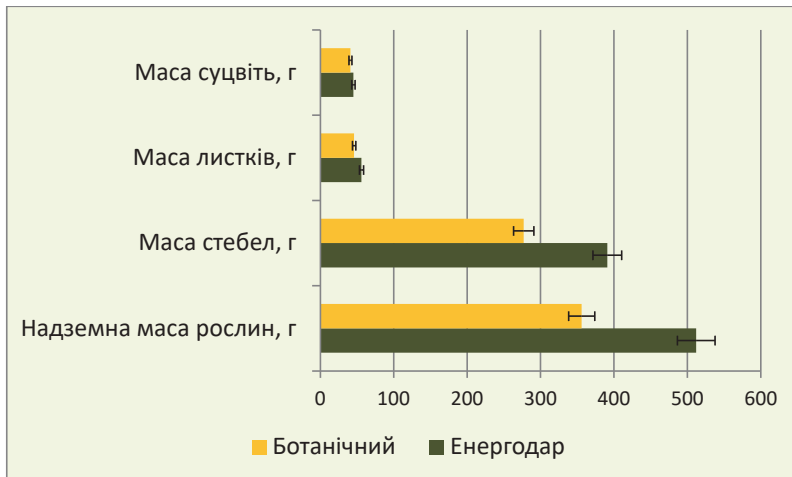


Рис. 3.10. Маса рослин та їх структурних частин різних сортів *Sorghum saccharatum* у фазу квітування (виробничі випробування)

У фітосировині обох зразків найбільшу дольову частку мали стебла, найменшу – суцвіття.

### **3.3. Біохімічні особливості рослин та енергетична оцінка фітосировини *Sorghum saccharatum* як основа для біопалива**

Для ефективного використання основної та побічної продукції *Sorghum saccharatum* важливе значення має дослідження біохімічних особливостей рослин, оцінка енергетичного та продуктивного потенціалу культури сорго на генотиповому рівні.

Одним з найважливіших показників за біохімічного оцінювання рослинної сировини є вміст сухої речовини та її компонентів. Накопичення сухої речовини у сировині рослин сорго залежить від багатьох факторів, а саме періоду розвитку, місця зростання, агротехнічних засобів вирощування, видових та генотипових особливостей (Kumar et al., 2005). Як свідчать результати досліджень за вегетаційний період 2022 року, вміст сухої речовини в надземній масі рослин *Sorghum saccharatum* залежав від формових та сортових особливостей – змінювався від 20,04 до 38,54 % (друга декада серпня) (рис. 3.11). Найбільшим вмістом сухої речовини в цей період характеризувалися форми RUSBR-4 та ETSSTSФ-3.

*Sorghum saccharatum* є культурою, стебла якої містять великий вміст цукрів та сік зі стебла використовується у виробництві етанолу (Oktem et al., 2021). Основними цукрами, що виявлені в сировині сорго цукрового є моносахариди – глюкоза і фруктоза, дисахариди – сахароза і мальтоза (Almodares and Hadi, 2009). Дослідження показали, що вміст цукрів та інших компонентів сировини залежав від строку сівби (Almodares and Darani, 2006).

Вміст загальних цукрів та моноцукрів у надземній масі рослин *Sorghum saccharatum* залежно від формових та сортових особливостей в цей період виявився невисоким. Найвищим вмістом цукрів у фітомасі характеризувалися рослини форм АМВВ-2 та АМВВ-4 (рис. 3.12). У роботі Lestari et al. (2021) відмічено, що залежно від сорту сорго цукрового найбільший вміст цукру у фітомасі становив 13,9 %, найнижчий – від 8,5 % до 10,8%.

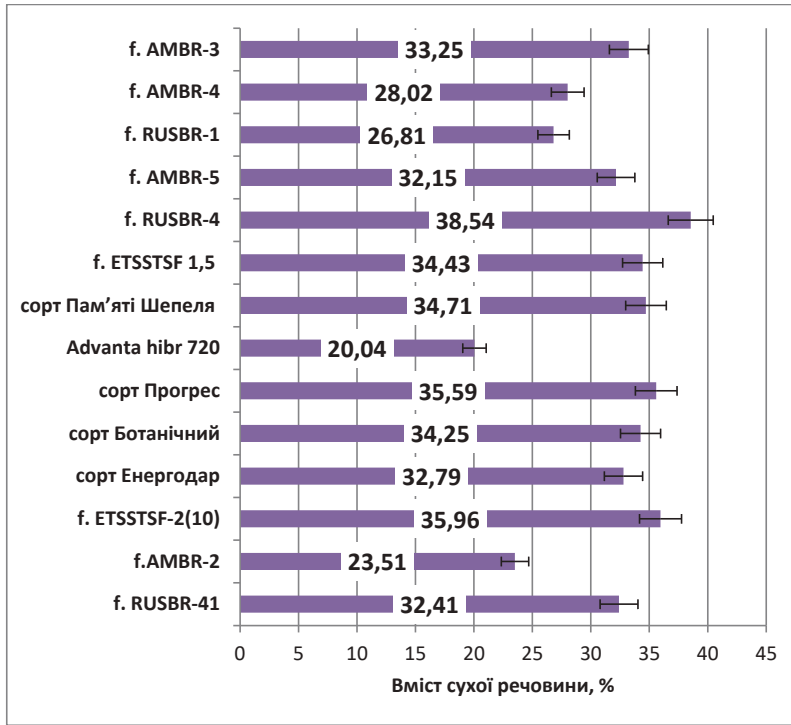


Рис. 3.11. Вміст сухої речовини в надземній масі рослин *Sorghum saccharatum* залежно від формових та сортових особливостей, % (друга декада серпня)

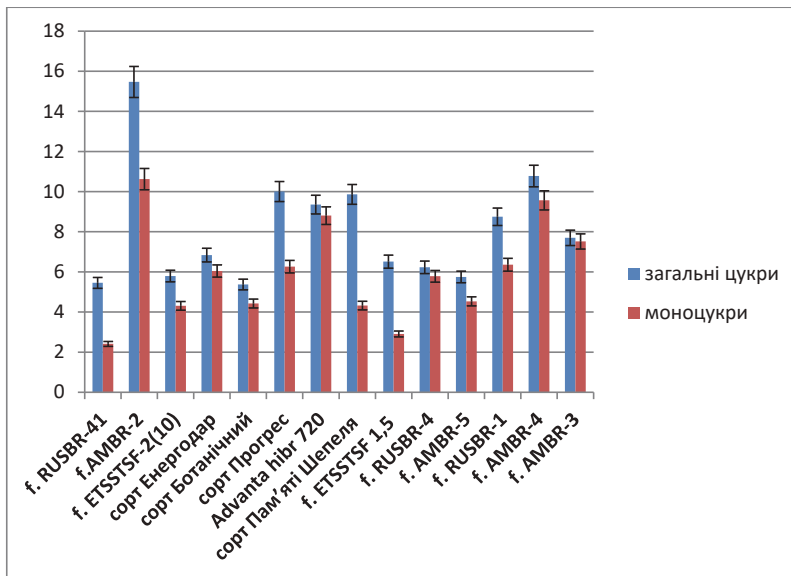


Рис. 3.12. Вміст загальних цукрів та моноцукрів у надземній масі рослин *Sorghum saccharatum* залежно від формових та сортових особливостей, % до абс.сух.реч. (друга декада серпня)

Визначено, що вміст цукрів і моноцукрів у рослин *Sorghum saccharatum* залежить від впливу багатьох факторів (умов вегетації, строків та способів сівби, рівня органічного і мінерального живлення, фази росту та розвитку рослин тощо). Установлено, що в певних випадках у фазу квітання вміст цукрів в окремих зразків може досягати від 26 до 30 %, а моноцукрів 12–16%. За високим рівнем цукрів у фітомасі відзначилися форми AMBR-3, AMBR-5, RUSBR-1 і сорт Енергодар, а моноцукрів – форми AMBR-3, AMBR-5 та сорт Ботанічний (рис. 3.13).

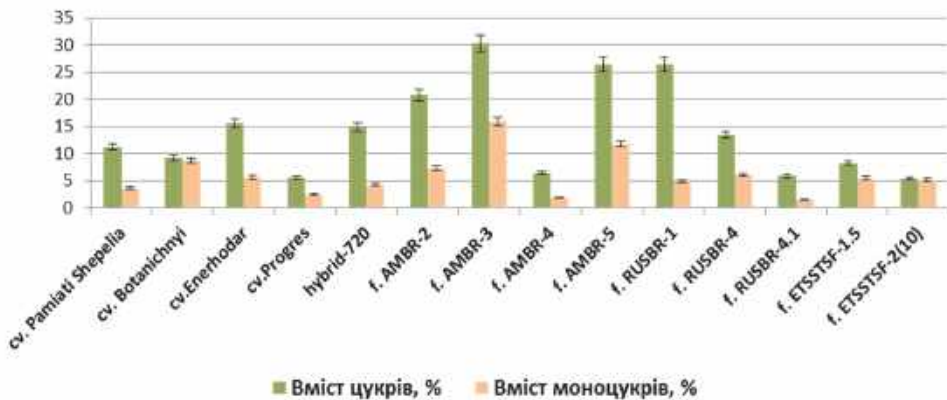


Рис. 3.13. Вміст цукрів і моноцукрів у рослин *Sorghum saccharatum* у фазу квітання залежно від формових та сортових особливостей (f. AMBR-3 – вихід у трубку), %

Іншими дослідниками встановлено, що вміст глюкози та фруктози в сировині *Sorghum saccharatum*, залежно від регіону зростання, становив 0,96–2,72 % та 0,87–3,04% відповідно (Erdurmus et al., 2018). Загальний вміст цукрів 109 генотипів сорго з Японії становив від 0,57 до 20,51 % і переважним компонентом соку була сахароза (Kawahigashi et al., 2013).

Важливим аспектом характеристики рослин є комплексна оцінка побічної продукції У цьому контексті певний сенс представляє наявність у фітомасі ліпідів, білків тощо. Вміст ліпідів у надземній масі рослин *Sorghum saccharatum* залежав від формових та сортових особливостей і найвищим виявився у форм сорго AMBR-4, RUSBR-1 та ETSSTSF-1,5 (рис. 3.14).

Як вміст цукрів, так і вміст ліпідів у рослин *Sorghum saccharatum* змінюється за дії різних чинників. Ліпіди є основним компонентом рослинних мембран і джерелом енергії рослинних клітин, діють як гідрофобний бар'єр для мембран та відіграють роль сигнальних молекул за регулювання клітинного метаболізму (Kim, 2020).



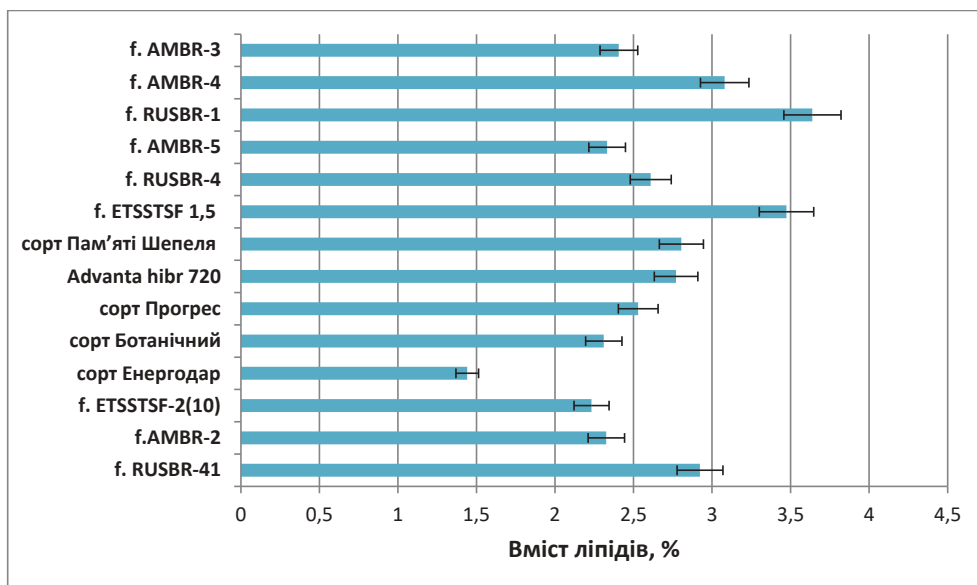


Рис. 3.14. Вміст ліпідів у надземній масі рослин *Sorghum saccharatum* залежно від формових та сортових особливостей, % до абс.сух.реч. (друга декада серпня)

Виявлено, що в певних випадках вміст ліпідів може досягати близько 8 %. За високим рівнем ліпідів у фітомасі вирізнялися форми RUSBR-4.1, AMBR-2 і AMBR-3 (рис.3.15).

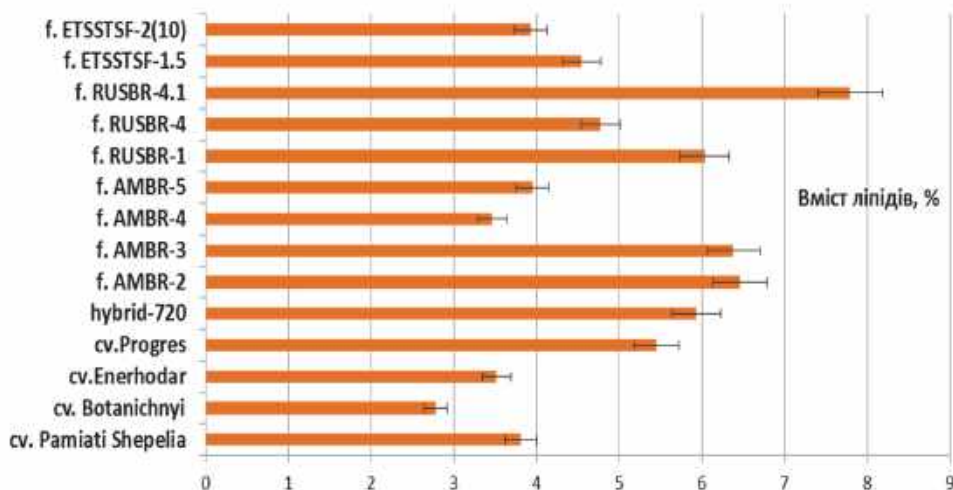


Рис.3.15. Вміст ліпідів у рослин *Sorghum saccharatum* у фазу квітування залежно від формових та сортових особливостей (f. AMBR-3 – вихід у трубку)

Наступним важливим елементом біохімічного складу фітосировини є вміст сирого білку. Виявили, що у надземній масі рослин *Sorghum saccharatum* найвищий вміст білку характерний для форм RUSBR-4.1 та ETSSTSF-2(10) (рис.3.16).

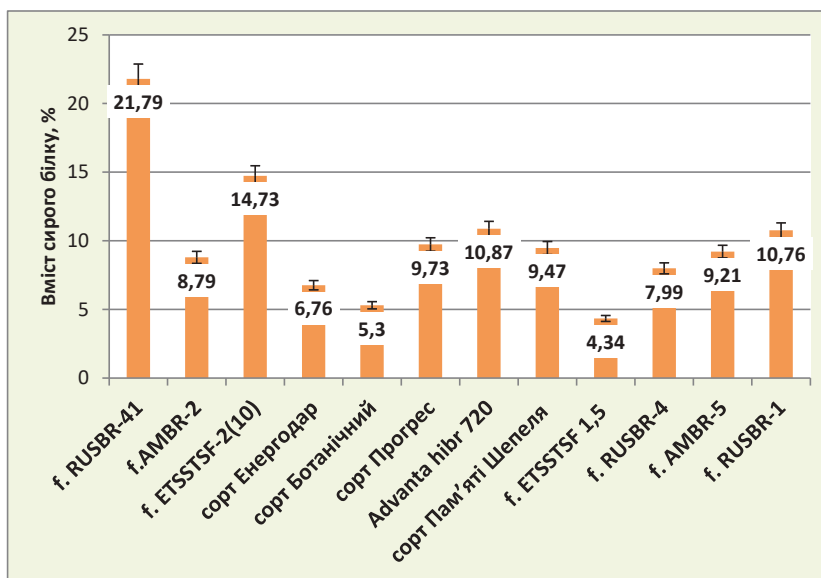


Рис. 3.16. Вміст сирого білку в рослин *Sorghum saccharatum* у фазу квітання залежно від формових та сортових особливостей

Вміст протеїну, золи та ліпідів у сировині *S. bicolor*, як показують дослідження, суттєво підвищувався за внесення азотних добрив (Ayub et al., 2002). Дослідження семи генотипів сорго показало, що вміст сирого протеїну у рослин змінювався від 6,62 до 8,29 % залежно від генотипу (Ayub et al., 2012).

Вегетаційний період року досліджень виявився досить сприятливим для забезпечення високої теплоємності фітосировини сорго. Високий рівень теплоємності забезпечили форми AMBR-2 та ETSSTSF-2(10) (рис. 3.17).

Енергетична цінність сировини сорго цукрового та його генотипів в іншому дослідженні становила 4,6–4,8 Мкал/кг (Lema et al., 2000).

За використання фітосировини сорго цукрового як основи для компонентів енергоносіїв, у період технічної стиглості (перша декада вересня) основні якісні показники вирізняються від попереднього періоду.

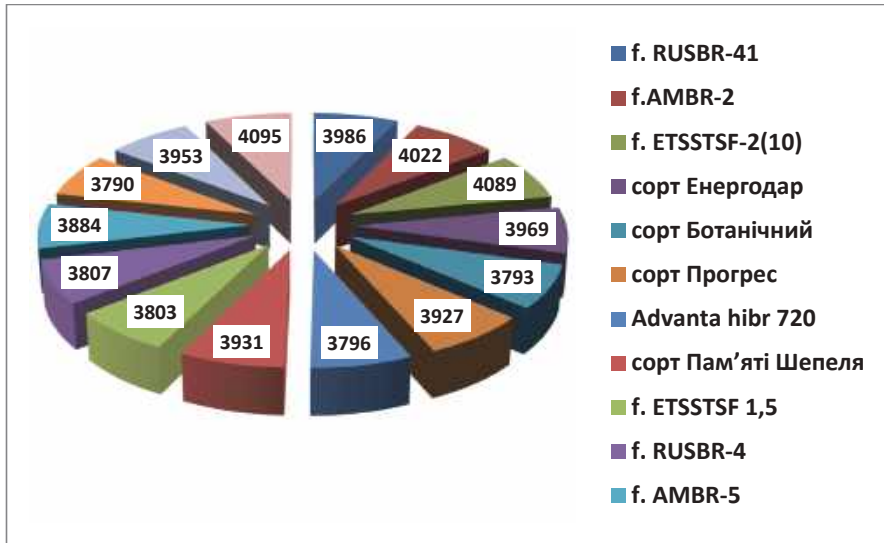


Рис. 3.17. Теплоємність фітосировини *Sorghum saccharatum* залежно від формових та сортових особливостей рослин, ккал/кг на абс.сух.реч. (друга декада серпня)

У цілому вміст сухої речовини в надземній масі рослин *Sorghum saccharatum* збільшувався незалежно від формових та сортових особливостей та становив від 31,26 до 49,89% (рис. 3.18). Найвищим цей показник виявився у сортів Пам'яті Шепеля, Ботанічний, Энергодар і форм RUSBR-4 та ETSSTSF-1,5.

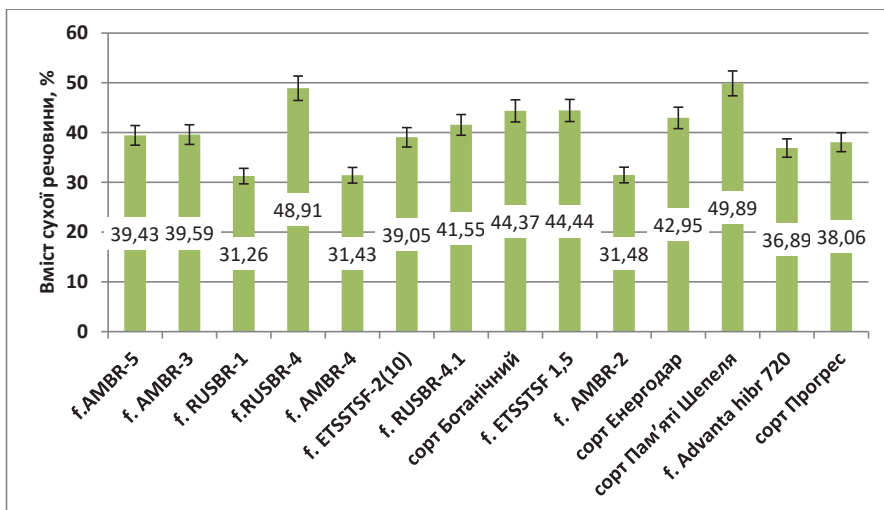


Рис. 3.18. Вміст сухої речовини в надземній масі рослин *Sorghum saccharatum* залежно від формових та сортових особливостей, % (перша декада вересня)

Цукристість рослин *Sorghum saccharatum* значною мірою залежала від генотипових особливостей, фази розвитку рослин та умов вегетації. Суттєвий вплив на вміст цукрів здійснюють погодно-кліматичні умови в період вегетації рослин. Установлено, що цей показник дуже мінливий та в різних генотипів змінювався від 6-7 до 30-35%. У більшості досліджуваних зразків вміст цукрів у фітосировині в період технічної стиглості коливається в межах від 10 до 20 %. Найкращі з досліджених зразків рослин *Sorghum saccharatum* забезпечили високий вміст цукрів – від 18,31 до 28,65%, за виключенням ф. АМБР-2 (рис. 3.19). Високий вміст цукрів, понад 20% забезпечили ф. АМБР -1 та с. Янтар і с. Медове.

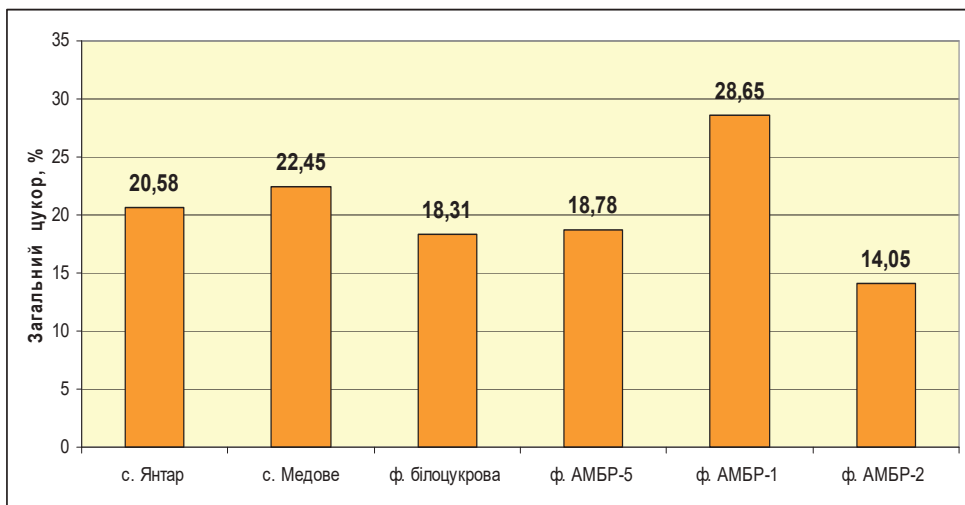


Рис. 3.19. Загальний вміст цукрів у надземній масі рослин *Sorghum saccharatum* в окремих форм та сортів, %

За результатами визначення вмісту цукрів у фітосировині рослин *Sorghum saccharatum*, ми виділили чотири групи за цукристістю. Генотипи, що мають у надземній масі в період технічної стиглості до 10 % цукрів відносяться до першої групи – низькоцукристих рослин; 11-17 % – до другої групи – середньоцукристих; 18-25 % – до третьої групи – високоцукристих; понад 26 % – до четвертої групи – дуже високоцукристих рослин.

За енергетичною цінністю фітосировини *Sorghum saccharatum* відзначилися форми АМБР-3 та ЕТССТSF-2(10) і сорти Енергодар та Прогрес (рис. 3.20).

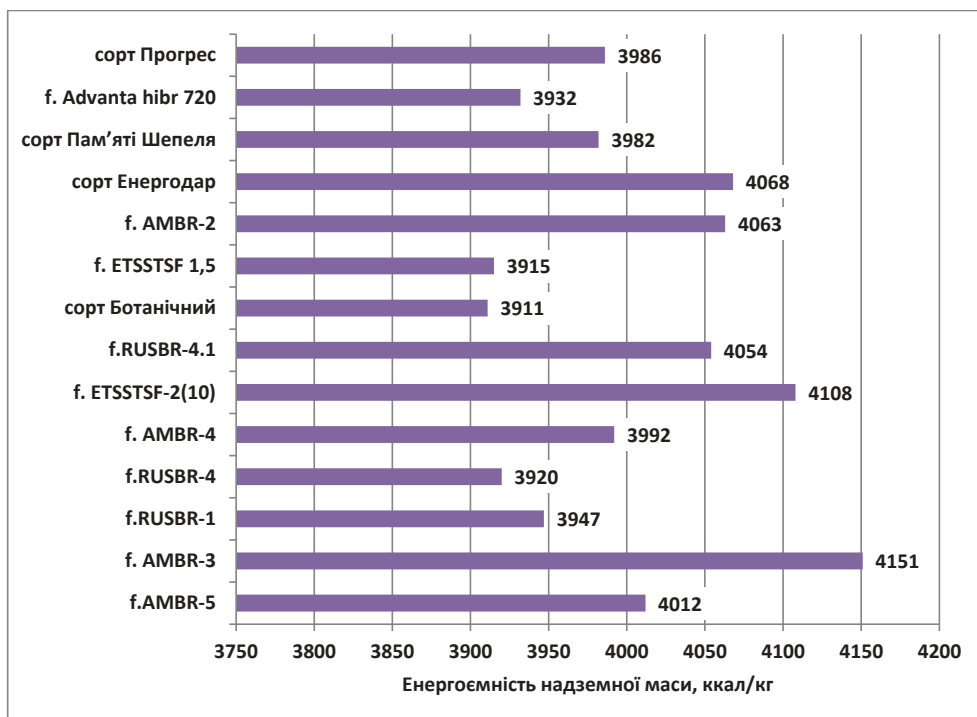


Рис. 3.20. Теплоємність фітосировини *Sorghum saccharatum* залежно від формових та сортових особливостей рослин, ккал/кг на абс.сух.реч. (перша декада вересня)

При використанні фітосировини як біопаливного матеріалу, надзвичайно вагоме значення також має дослідження енергетичної цінності різних генотипів *Sorghum saccharatum* на кінець вегетації. До періоду воскової стиглості відбувається суттєве збільшення сухих речовин у фітосировині рослин *Sorghum saccharatum*. Найвищий вміст сухої речовини забезпечили сорти Янтар і Прогрес (рис. 3.21). За енергетичною цінністю фітосировини досліджені зразки були близькими. Максимальна кількість енергії накопичувалася у рослин сортів Янтар та Пам'яті Шепеля.

За дослідження різних форм, виявилось, що найбільше суха речовина накопичувалася у фітосировині форм ETSSTSFSF-1(2), ETSSTSFTK-1 та AMBR-2 (рис. 3.22-3.24). Енергетична цінність відповідно в цей час найвищою була у форм ETSSTSFSF-1(2), ETSSTSFSVS-3 та AMBR-3.

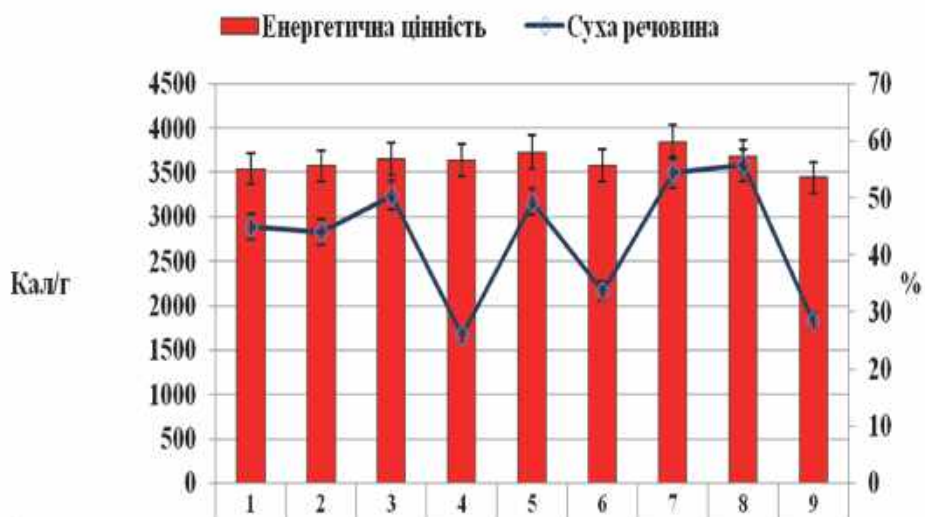


Рис. 3.21. Енергетична цінність та вміст сухої речовини у сортів *Sorghum saccharatum* (L.) Moench у період воскової стиглості (1 – cv. Medove; 2 – cv. Botanichniy; 3 – cv. Energodar; 4 – cv. Energodar (Шепетівка); 5 – cv. Pamiati Shepelia; 6 – cv. Kinelske-9; 7 – cv. Yantar; 8 – cv. Progres; 9 – cv. Botanichniy (Шепетівка)).

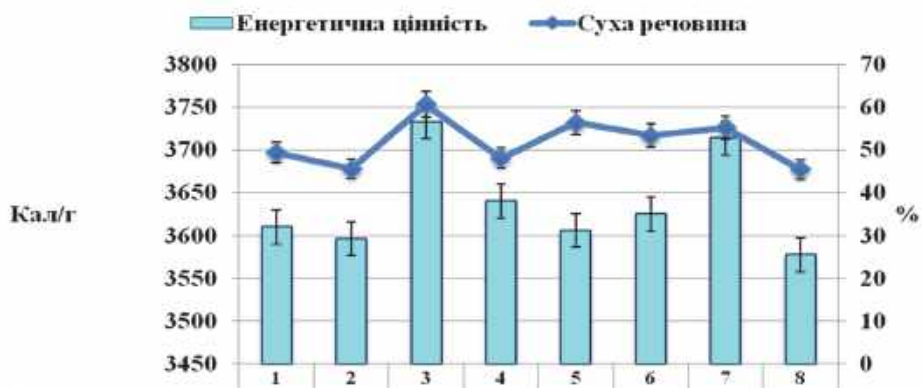


Рис. 3.22. Енергетична цінність та вміст сухої речовини у форм *Sorghum saccharatum* (L.) Moench у період воскової стиглості (1 – f. ETSSTSF-1; 2 – f. ETSSTSF-2; 3 – f. ETSSTSF-1(2); 4 – f. ETSSTSF-2(1); 5 – f. ETSSTSF-2(6); 6 – f. ETSSTSF-2(7); 7 – f. ETSSTSF-8; 8 – f. ETSSTSF-9).



Рис. 3.23. Енергетична цінність та вміст сухої речовини у форм *Sorghum saccharatum* (L.) Moench у період воскової стиглості (1 – f. ETSSTSFМ-5, 1; 2 – f. ETSSTSFМ-5; 3 – f. ETSSTSFRR-1; 4 – f. ETSSTSFRR-2(9); 5 – f. ETSSTSFVS-3; 6 – f. ETSSTSFPSH-7; 7 – f. ETSSTSFRT-1; 8 – f. ETSSTSFTK-1).



Рис. 3.24. Енергетична цінність та вміст сухої речовини у форм *Sorghum saccharatum* (L.) Moench у період воскової стиглості (1 – f. AMBR-1; 2 – f. AMBR-1.1; 3 – f. AMBR-2; 4 – f. AMBR-3.1; 5 – f. AMBR-4; 6 – f. AMBR-5; 7 – f. RUSBR-2; 8 – f. RUSBR-4; 9 – f. RUSBR-4.1; 10 – f. AMBR-3).

У цілому, за період воскової стиглості досліджених зразків, найвищий вміст сухої речовини встановлено у форми ETSSTSF-1(2), цукрів – у форми AMBR-1.1 та енергетичної цінності – у форми AMBR-3.

Після використання фітосировини *Sorghum saccharatum* для отримання біоетанолу лишається велика кількість побічної продукції. Ці тверді відходи є цінною сировиною для виробництва пелетів та брикетів. Тому нами надана оцінка теплоємності різних зразків рослин. Цей показник залежав від формових та сортових особливостей рослин, що для більшості зразків становив від 3881,14 до 4075,62 ккал/кг абсолютно сухої речовини (рис. 3.25). Серед генотипів найбільшою теплоємністю відзначилися форми АМБР-1 та АМБР-5.

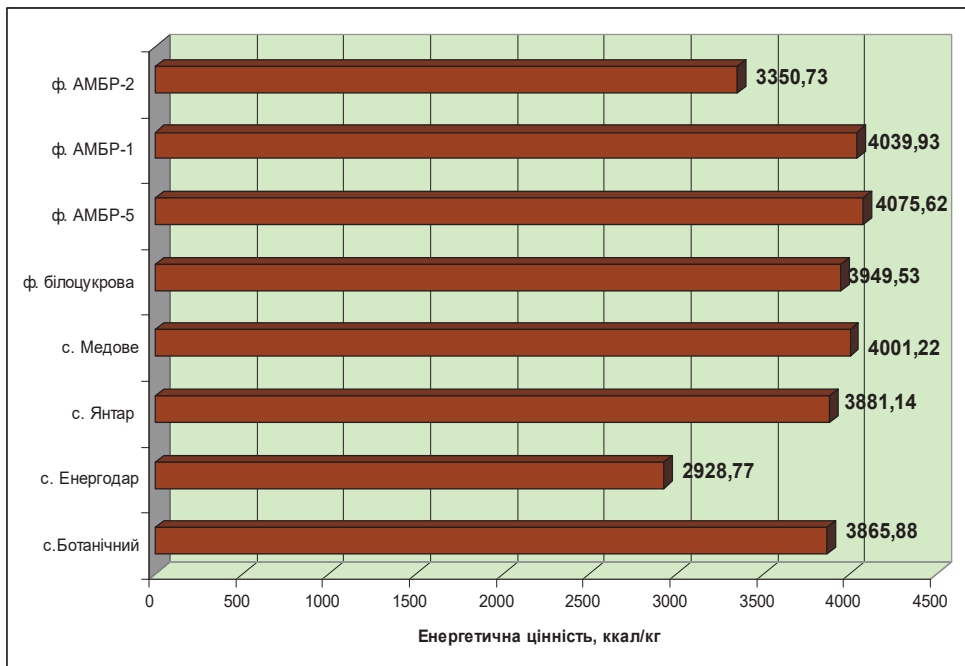


Рис. 3.25. Енергетична цінність побічної продукції (твердих відходів) рослин *Sorghum saccharatum* залежно від форми та сорту, ккал/кг

### 3.4. Формування насіння різних генотипів *Sorghum saccharatum* та його характеристика за якісними показниками

Ми проводили всебічні дослідження морфолого-технологічних, біохімічних чинників та енергетичної цінності насіння сорго цукрового. Загалом між генотипами є суттєва різниця за досліджуваними показниками насіння (рис. 3.26).



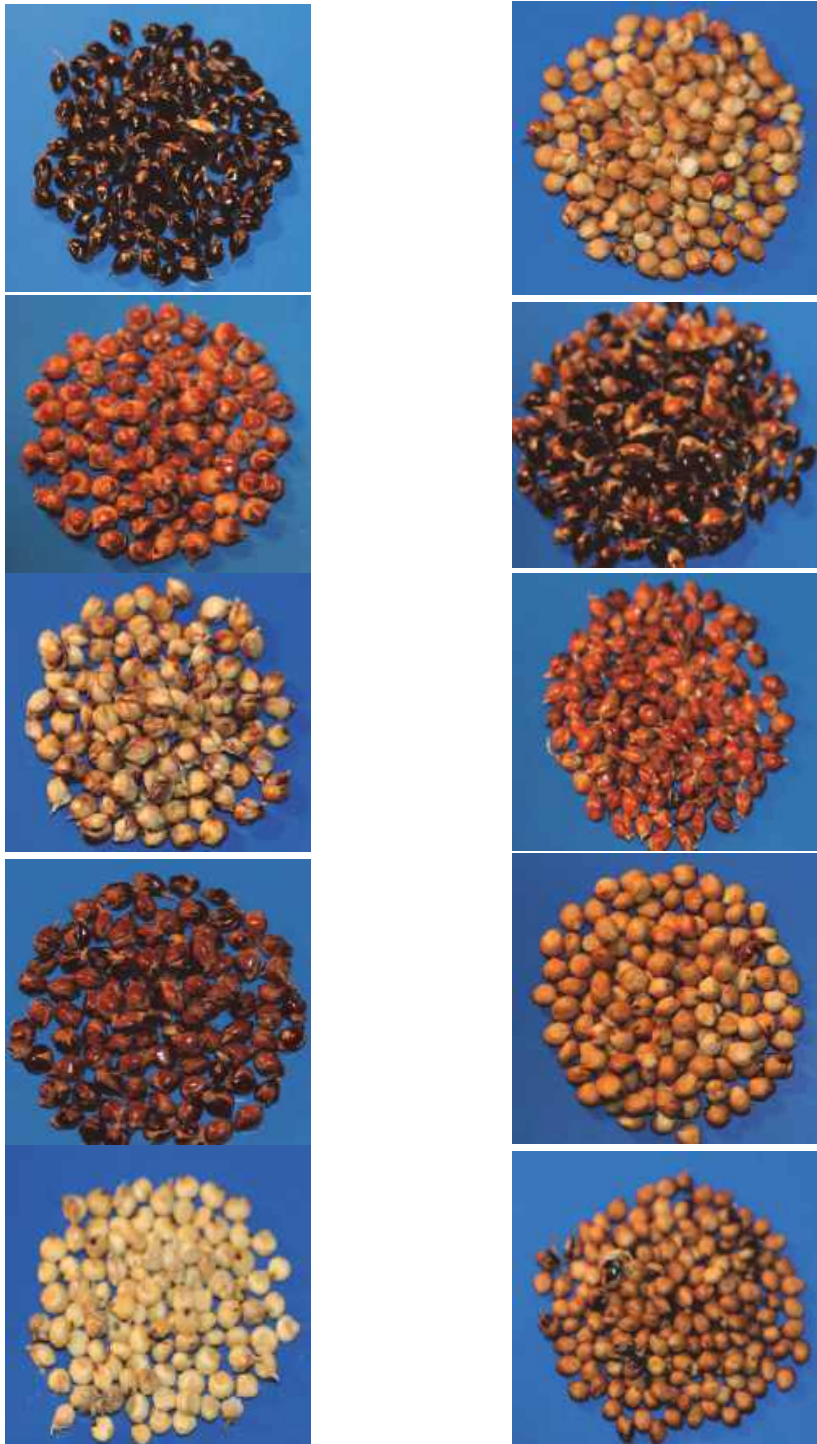


Рис. 3.26. Зразки насіння різних генотипів *Sorghum saccharatum* селекційно-генетичного фонду НБС імені М.М.Гришка НАН України

Приоритетним показником будь якої культури є насінна продуктивність. Оцінка цього показника для *Sorghum saccharatum* дозволяє відзначити суттєву різницю між генотипами (табл. 3.3). Структурними складовими насінної продуктивності рослин *Sorghum saccharatum* є маса волоті, маса насіння з волоті, маса 1000 насінин тощо.

Таблиця 3.3

**Показники кількісної та якісної характеристики насіння різних генотипів *Sorghum saccharatum* селекції НБС імені М.М.Гришка НАН України**

№ з/П	Генотип <i>Sorghum saccharatum</i>	Маса волоті, г	Маса насіння з волоті, г	Вихід насіння з волоті, %	Маса 1000 насінин, г	Лабораторна схожість насіння, %
1.	f. ETSSTSF-1	45,90±6,61	37,90±6,02	82,57	23,09±0,07	99,00±0
2.	f. ETSSTSF-2	31,20±3,38	23,22±2,34	74,42	19,94±0,16	99,33±0,37
3.	f. ETSSTSF-3	30,60±3,05	24,88±2,09	81,31	19,11±0,56	98,50±1,12
4.	f. ETSSTSF-4	16,40±1,25	13,22±0,78	80,61	18,2±0,34	95,85±2,45
5.	f. ETSSTSF-5	27,30±2,58	22,00±2,07	80,59	19,74±0,11	88,52±2,01
6.	f. ETSSTSF-6 (розлога волоть)	29,22±4,05	20,29±2,14	69,44	20,07±0,20	90,52±1,13
7.	f. ETSSTSF-7 (компактна волоть)	31,30±3,80	26,00±3,24	83,07	18,28±1,51	99,33±1,12

Аналіз отриманих даних свідчать про те, що найбільшою середньою масою волоті характеризується генотип f. ETSSTSF-1, а найменшою – f. ETSSTSF-4. За масою насіння з однієї волоті зберігається така ж закономірність. За виходом насіння з волоті відзначилися генотипи f. ETSSTSF-7 (компактна волоть) і f. ETSSTSF-1. За масою 1000 насінин також перевага генотипу f. ETSSTSF-1 очевидна. Усі форми, крім f. ETSSTSF-5, характеризуються високою схожістю насіння.

Маса 1000 насінин суттєво залежала як від генотипових особливостей, так і від умов вегетації. Визначено, що за інших умов росту та розвитку рослин, маса 1000 насінин змінювалася від 16 до 28 г. Щодо зразків, то найбільшу перевагу мав той же самий генотип – ETSSTSF-1.5. Крім нього

великою масою насіння відзначилися форми AMBR-5, RUSBR-1 та RUSBR-4 (рис. 3.27).

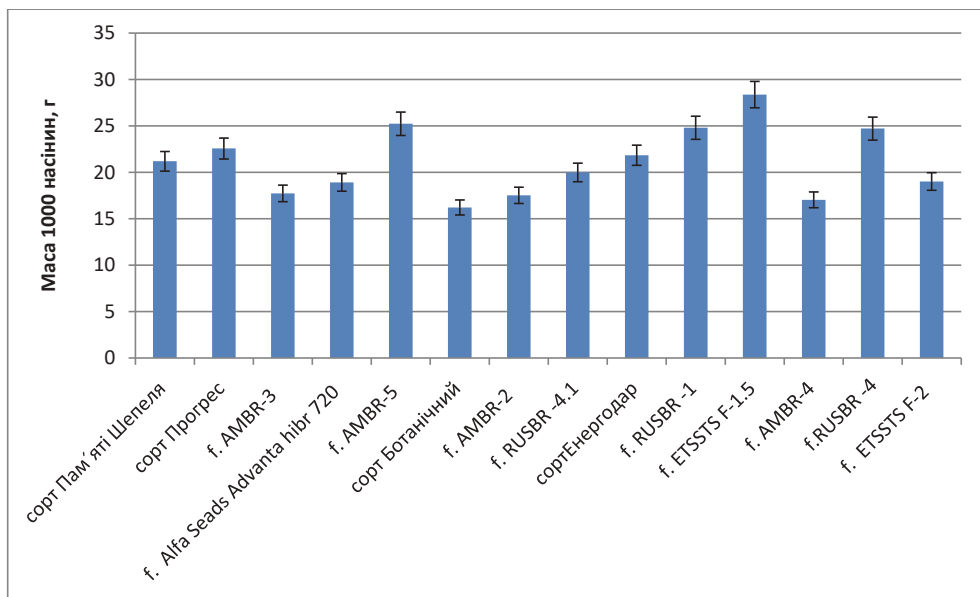


Рис. 3.27. Маса 1000 насінин рослин *Sorghum saccharatum* залежно від формових та сортових особливостей, г

Аналіз насінної продуктивності різних генотипів *Sorghum saccharatum* свідчить про суттєві відмінності між ними (табл. 3.4). Найбільшу масу сухих волотей з насінням під час обмолоту мали форми ETSSTS F-1 і ETSSTS F-3. За масою насіння з одиниці площі також переважали ці варіанти. Важливо те, що вихід насіння з волоті становив від 80,2 до 87,3%. Найбільший вихід насіння при обмолоті забезпечив генотип f. ETSSTS F- 2(7) (компактна волоть).

На урожайний потенціал насіння рослин сорго позитивно впливає внесення добрив (Kansaye et al., 2023). Як відзначено дослідниками, при внесенні фосфорних добрив урожайність зерна збільшується на 2 т/га, а вміст цукру у надземній масі змінювався від 18% до 20,25% та 15,3% до 17,7% у окремих сортах.

Результати проведених досліджень свідчать про те, що врожайність надземної маси, насіння та сумарний вихід сухої речовини з рослин *Sorghum saccharatum* залежали від сортових особливостей (табл. 3.5).

Таблиця 3.4

**Насінна продуктивність різних генотипів *Sorghum saccharatum*  
селекції НБС імені М.М.Гришка НАН України**

Генотип <i>Sorghum saccharatum</i>	Маса волотей з насінням, г/ м <sup>2</sup>	Маса насіння з волоті, г/м <sup>2</sup>	% виходу насіння з волоті
f. ETSSTSF-1	554	463	83,6
f. ETSSTSF-2	439	352	80,2
f. ETSSTSF-3	507	409	80,7
f. ETSSTSF-1.4	370	302	81,6
f. ETSSTSF-5	433	367	84,8
f. ETSSTSF – 2(6) (розлога волоть)	300	241	80,3
f. ETSSTSF- 2(7) (компактна волоть)	339	296	87,3
НІР <sub>05</sub>	18,9	14,5	-

Таблиця 3.5

**Урожайність надземної маси, насіння та вихід сухої речовини з  
рослин *Sorghum saccharatum* залежно від сортових особливостей на  
кінець вегетації**

Сорт <i>Sorghum saccharatum</i>	Урожайність, т/г		Сумарний вихід сухої речовини з надземної маси та насіння, т/га
	надземної маси	насіння (потенційна)	
Янтар	75,5	5,57	28,43
Медове	86,5	5,98	30,65
Ботанічний	97,8	6,41	41,18
Прогрес	84,7	6,23	35,40
Енергодар	98,5	6,85	39,99
НІР <sub>05</sub>	2,04	0,13	

Найвищий рівень урожайності надземної маси (84,7-98,5 т/га), насіння (6,23-6,85 т/га) та вихід сухої речовини (35,4-41,18 т/га) установлено в сортів Енергодар, Ботанічний та Прогрес.

Високим вмістом сухої речовини в насінні характеризувалися зразки сорго цукрового – форми RUSBR-1, ETSSTSF-1,5 та сорт Енергодар (рис. 3.28).

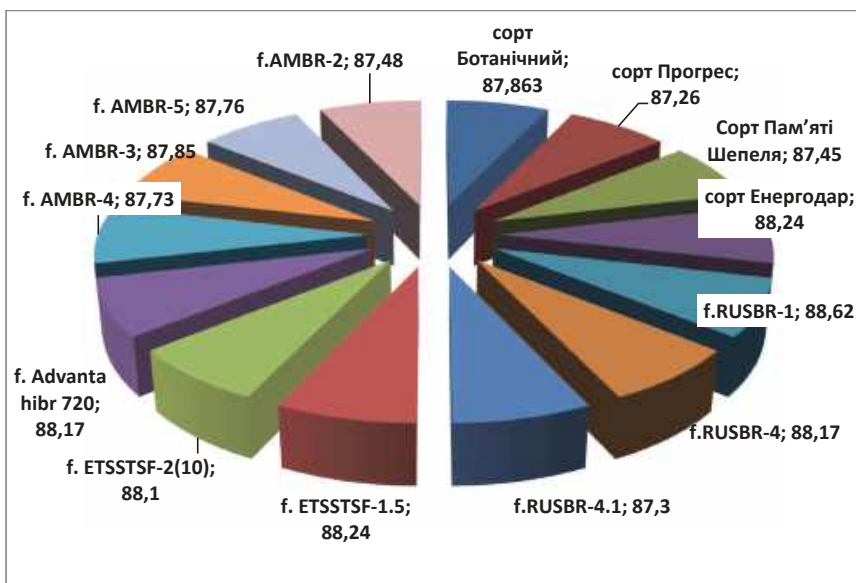


Рис. 3.28. Вміст сухої речовини в насінні різних генотипів *Sorghum saccharatum*, %

Вміст ліпідів у насінні виявився суттєво вищим, ніж у фітомасі та становив від 2,27 до 5,30 % (рис. 3.29). Найвищим вмістом ліпідів відзначилися сорти Енергодар, Пам'яті Шепеля і форми RUSBR-1, ETSSTSF-2 (10).

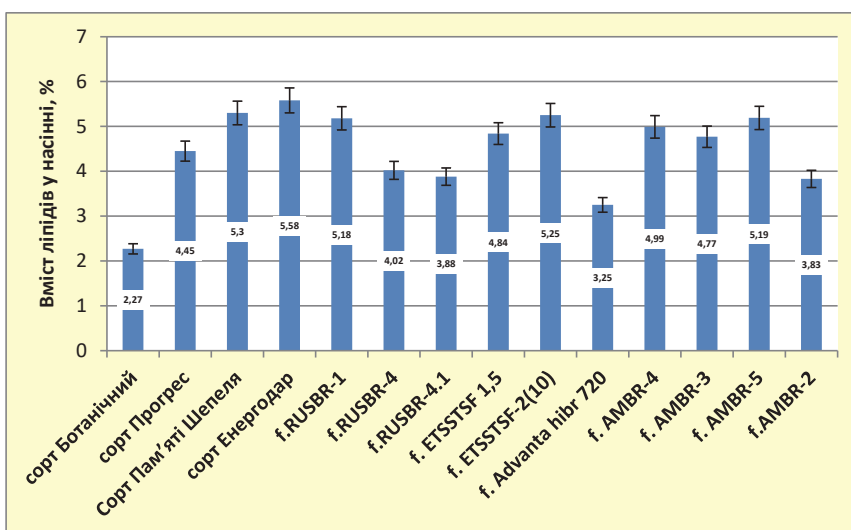


Рис. 3.29. Вміст ліпідів у насінні різних генотипів *Sorghum saccharatum*, %

У насінні досліджуваних зразків сорго цукрового вміст загальних цукрів виявився досить низьким. Можливо це пов'язано з тим, що насіння в більшості зразків у цьому періоді розвитку рослин неповністю сформоване та є неповноцінне. Відносно високим вмістом цукрів у насінні характеризувалися форма AMBR-3 та сорт Енергодар (рис. 3.30).

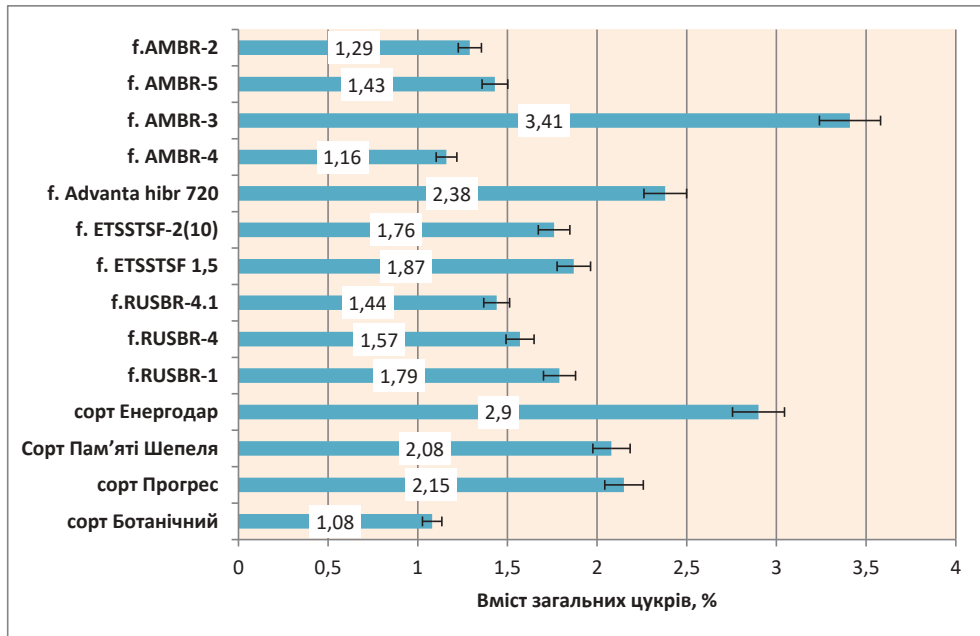


Рис. 3.30. Вміст загальних цукрів у насінні різних генотипів *Sorghum saccharatum*, %

У період воскової стиглості рослини *Sorghum saccharatum* досягають максимальних продуктивних показників. Серед досліджуваних сортів найбільшу врожайність стебла (63,1-73,3 т/га) та вихід етанолу (3,53-4,39 т/га) забезпечили сорти Ботанічний, Енергодар та Медове. Загальна вартість етанолу становила від 132,60 до 228,280 тис.грн/га (табл. 3.6).

Після використання фітосировини *Sorghum saccharatum* для виробництва етанолу залишається значна кількість твердих відходів стеблової маси, що є цінною сировиною для виготовлення біопаливних пелетів (рис.3.31).

Таблиця 3.6

**Продуктивність стеблової маси, вихід та вартість етанолу з  
фітосировини *Sorghum saccharatum* у період воскової стиглості**

Сорт <i>Sorghum saccharatum</i>	Продуктивність стебла, т/га	Вихід етанолу, т/га	Загальна вартість етанолу, тис.грн/га
Янтар	49,1	2,55	132,600
Медове	63,1	3,53	183,560
Ботанічний	73,3	4,39	228,280
Прогрес	61,8	3,47	180,440
Енергодар	72,8	4,33	225,160
Памяті Шепеля	59,4	3,48	180,960



Гранулятор ROTEX-100



Фітосировина з паливними пелетами

Рис. 3.31. Побічна продукція з фітосировини *Sorghum saccharatum* –  
біопаливні пелети

Результати проведеної оцінки свідчать про те, що з побічної продукції стеблової фітомаси найбільший вихід твердого біопалива (26,81-32,47 т/га) забезпечили сорти Ботанічний, Енергодар та Медовий (табл. 3.7).

Доведено, що сорго є цінною сировиною для виробництва біобутанолу. Вихід біобутанолу суттєво залежить від багатьох чинників. За удосконалення технології отримання біобутанолу на основі фізіологічних та біохімічних особливостей штамів співвиконавцями проекту з ДУ “ІХБГ НАНУ” визначено вихід цільового продукту із

зеленої біомаси різних генотипів сорго. Зважаючи на отримані результати ми оцінили потенційний вихід біобутанолу з урожаєм фітосировини сорго з одиниці площі (табл. 3.8).

Таблиця 3. 7

**Вихід твердого біопалива з побічної продукції стеблової фітомаси *Sorghum saccharatum* та його загальна вартість у період воскової стиглості**

Сорт <i>Sorghum saccharatum</i>	Вихід твердого палива, т/га	Загальна вартість твердого біопалива, тис.грн/га
Янтар	20,22	121,32
Медове	26,81	160,86
Ботанічний	32,47	194,82
Прогрес	24,9	149,4
Енергодар	31,66	189,96
Памяті Шепеля	26,0	156,0

Таблиця 3.8

**Потенційна продуктивність рослин *Sorghum saccharatum* за виходом біобутанолу**

Сорт сорго цукрового	Урожайність фітосировини, т/га	Розрахунковий вихід біобутанолу, кг/га	Загальна вартість біобутанолу, тис.грн/га
Янтар	75,5	3775	430,35
Медове	86,5	4325	493,05
Ботанічний	97,8	4890	557,46
Прогрес	84,7	4235	482,79
Енергодар	98,5	4925	561,45
НІР <sub>05</sub>	2,04		

Варто зазначити, що всі досліджені сорти забезпечують досить високий розрахунковий вихід біобутанолу – від 3775 до 4925 кг/га. Загальна вартість біобутанолу з урожаю з одиниці площі оцінюється від 430,35 до 561,45 тис.грн/га. Найвищий потенційний вихід біобутанолу та його загальна вартість отримано з урожаю фітосировини сортів Енергодар та Ботанічний.



Таким чином, результати досліджень свідчать про те, що *Sorghum saccharatum* (L.) Moench як нова високопродуктивна біоенергетична культура в північній частині України характеризується високими ростовими, продуктивними, енергетичними та економічними показниками.

За багаторічний період інтродукційних, селекційно-генетичних та біотехнологічних досліджень в НБС імені М.М.Гришка НАН України створено колекцію генотипів *Sorghum saccharatum* (близько 100 зразків). Відібрано найцінніші генотипи як вихідні форми (14 зразків), на основі яких виведено нові сорти ('Енергодар', 'Ботанічний' та Соргодар').

Установлено біолого-технологічні, біохімічні властивості біомаси як енергетичної сировини другого покоління. Визначено продуктивний, енергетичний потенціал рослин та біопалива і оцінено вихід компонентів рідких палив. Оптимізовано елементи технології виробництва фітосировини та високоякісного біопалива на основі нових адаптивних генотипів рослин *Sorghum saccharatum*.

За висотою рослин *Sorghum saccharatum* під час технічної стиглості виділено чотири групи. У першу групу входять рослини, які мають висоту до 150 см, у другу групу – 151-200 см, у третю групу – 201-250 см та в четверту групу – понад 251 см. Створені в НБС генотипи відносяться в більшості до третьої та четвертої групи високорослих рослин. Найвищою висоти досягли: серед форм – f. ETSSTSF-2, f. AMBR-1.1 та серед сортів – cv. Progres і cv. Energodar.

Показано, що найвищою сировинною продуктивністю відзначилися f. ETSSTSF-9, f. AMBR-1, f. ETSSTSFM-5.1, серед сортів – cv. Botanichnyi та cv. Energodar. У фітосировині найбільшу дольову частку мали стебла незалежно від генотипових особливостей. Максимальна продуктивність стебел була у форм f. ETSSTSF-2, f. AMBR-3 та сорту cv. Energodar.

За вмістом цукрів у фітосировині *Sorghum saccharatum* ми виділили чотири групи рослин за цукристістю. Генотипи, що мають у надземній масі у період технічної стиглості до 10 % цукрів відносяться до першої групи – низькоцукристих рослин; 11-15 % – до другої групи середньоцукристих; 16-20 % – до третьої групи високоцукристих; понад 20 % – до четвертої групи – дуже високоцукристих рослин.

Установлено, що в більшості досліджуваних зразків вміст цукрів у фітосировині в період технічної стиглості коливається від 13 до 16 %. Найкращі з досліджених зразків рослин забезпечили високий вміст цукрів – 18-20 %, у окремих випадках близько 30%. За високим рівнем

цукрів у фітомасі відзначилися форми AMBR-3, AMBR-5, RUSBR-1 і сорт Енергодар, а моноцукрів – AMBR-3, AMBR-5 та сорт Ботанічний.

Визначено, що вміст ліпідів у фітосировині рослин *Sorghum saccharatum* змінюється залежно від дії впливу різних факторів та становив від 2,5-3,0 до 5,0-6,0 %. Виявлено, що в певних випадках цей показник може досягати близько 8 %. За високим рівнем ліпідів у фітомасі вирізнялися форми RUSBR-4.1, AMBR-2 і AMBR-3. Вміст ліпідів у насінні становив від 2,27 до 5,30 %. Найвищим вмістом ліпідів відзначилися сорти Енергодар, Пам'яті Шепеля і форми RUSBR-1 та ETSSTSF-2 (10).

Виявлено, що в надземній масі рослин *Sorghum saccharatum* найвищий вміст білку є у форм RUSBR-4.1 та ETSSTSF-2(10). У більшості зразків цей показник становить 9-11 %, а в окремих випадках – від 14 до 21 %.

Установлено, що найвищий рівень урожайності надземної маси (84,7-98,5 т/га), насіння (6,23-6,85 т/га), вихід сухої речовини (35,4-41,18 т/га) та загального цукру (4,48-6,25 т/га) – у сортів Енергодар, Ботанічний та Прогрес.

Показано, що в період воскової стиглості рослин *S. saccharatum* найбільшу врожайність стебла (63,1-73,3 т/га) та вихід етанолу (3,53-4,39 т/га) забезпечили сорти Ботанічний, Енергодар та Медове. Загальна вартість етанолу становила від 183,56 до 228,28 тис.грн/га. Великий вихід побічної продукції з стеблових відходів – твердого біопалива (26,81-32,47 т/га) забезпечили ці ж сорти.

За теплоємністю твердого біопалива *Sorghum saccharatum* ми виділили чотири групи рослин. У першу групу відносяться низькокалорійні рослини з теплоємністю до 2800 ккал/кг, у другу групу – середньокалорійні – 2900-3300, у третю групу – висококалорійні – 3400-3900, у четверту групу – дуже висококалорійні, які мають понад 4000 ккал/кг вихід енергії з твердого біопалива. Теплоємність біопалива з побічної продукції становила від 3350 до 4151 ккал/кг на абсолютно суху речовину.

Установлено, що всі досліджені сорти *Sorghum saccharatum* забезпечують високий розрахунковий вихід біобутанолу – від 3775 до 4925 кг/га та його загальну вартість – від 430,35 до 561,45 тис.грн/га. Найвищий потенційний вихід біобутанолу та його загальну вартість отримано з урожаю фітосировини сортів Енергодар та Ботанічний.

## РОЗДІЛ 4.

# УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ БІОБУТАНОЛУ НА ОСНОВІ ДОСЛІДЖЕНН ФІЗІОЛОГІЧНИХ ТА БІОХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВІТЧИЗНЯНИХ ШТАМІВ- ПРОДУЦЕНТІВ

---

Все більше уваги акцентується на виробництві рідких органічних продуктів і палива в останні роки, в першу чергу, етанолу та бутанолу із поновлювальних джерел на основі біомаси. Промислове виробництво бутанолу на початку ХХ століття було засновано на ферментації вуглеводної сировини (кукурудзяного борошна) бактеріями *Clostridium acetobutylicum* з отриманням, в основному, ацетону та бутанолу. Збільшення попиту на бутанол та різкий ріст нафтохімічного виробництва призвели до того, що біотехнологічний процес отримання бутанолу став нерентабельним і його було замінено, більш ефективним, хімічним синтезом. В останні роки поновилася зацікавленість у мікробіологічному способі отримання бутанолу, не лише як сировини для хімічної промисловості, але і як альтернативного палива (Tigunova et al., 2020).

Біобутанол можна отримати з біомаси, як і біоетанол, декількома шляхами: ферментацією цукро- або крохмалевмісної рослинної сировини (біобутанол I покоління) та переробкою лігноцелюлозної сировини (біобутанол II покоління) (Шульга та ін., 2013). Біобутанол, вироблений з біомаси за допомогою клостридій у процесі АБЕ ферментації, має ідентичні характеристики з бутанолом, отриманим у результаті хімічного синтезу (Lee et.al., 2008).

Основним чинником, що впливає на економіку АБЕ бродіння, є висока собівартість крохмальних (кукурудза, пшениця, просо тощо) та цукрових (меяса, сорго тощо) субстратів (Gibbs et.al., 1983; Lenz, Moreira, 1980; Petitdemange et.al., 1968; Ross, 1961; Volesky et.al., 1981). Саме оцей факт та властивість цукролітичних клостридій використовувати різні вуглеводи, стимулювали дослідження з використання альтернативних субстратів (Mitchell, 1998).

Сорго цукрове (*Sorgum Sacharatum*) – це кормова культура, досить непримхлива рослина як до кліматичних умов (посухи), так і до складу ґрунтів (засолення), яка широко розповсюджена в багатьох країнах світу. Наразі до цієї культури значно підвищилася зацікавленість і зросли площі під засів у південних регіонах України. До того ж, сорго може рости і у степовій, і в лісостеповій зоні країни та давати високі врожаї. На утворення 1 кг сухої речовини сорго потребує лише 270 літрів води, водночас як пшениця – 500, цукровий буряк – 470, кукурудза – 370. Ця рослина здатна і в несприятливих умовах отримати високі врожаї до 40-60 т зеленої маси з 1 га та накопичувати у стеблах вітаміни, амінокислоти, мікроелементи та до 16-18 % цукрів (Шульга та ін., 2013). Висота стеблин сорго цукрового у фазі збиральної стиглості досягає 2,7-3,5 м. При переробці сорго цукрового одержують сік, а стебла і листки використовують на кормові потреби у тваринництві або для виробництва будівельних матеріалів та паперу (Курило та ін., 2013).

Цукрове сорго як сировина використовується в декількох напрямках: по-перше, мова про харчові запити – з одного гектара можна отримати до 4 т цукрового сиропу. По-друге, зелена маса рослин іде на виробництво кормів, адже з 1 га є можливість отримати близько до 25 тис. кормових одиниць. По-третє – біопаливо, а саме:

біоетанол (до 6,0 т/га ~ 35,7 Гкал/га);

тверде біопаливо (до 25 т/га ~ 95,3 Гкал/га);

біогаз (до 17,6 тис. м<sup>3</sup>/га~ 90,8 Гкал/га);

якісне органічне добриво.

Рід сорго має велику кількість різноманітних сортів і гібридів, які вирощуються майже в усіх країнах світу і вирізняються формою волоті, кольором, якістю зерна, висотою і товщиною стебел та періодом дозрівання. За зовнішніми ознаками, а саме своїм суцвіттям (волоттю), сорго цукрове нагадує просо, але на відміну від нього, сорго має великі, гладкі, прямостоячі, соковиті стебла заввишки близько 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. Сорго цукрове має добре розвинену кореневу систему, яка занурюється 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 сорго цукрове краще, ніж інші культури, росте на легких піщаних, важких глинистих та інших малопродуктивних ґрунтах, легко витримує близькість ґрунтових вод та засоленість ґрунту. Зерно сорго цукрового

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

Інтегральним показником, який характеризує ефективність вирощування сорго цукрового на енергетичні цілі, є вихід біопалива (біоетанолу, біогазу, твердого біопалива) та вихід енергії. Вихід біоетанолу 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 сорго цукрового, 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 з формулою вихід біоетанолу з сахарози становить 53%, решта 47% – вуглекислий газ. Отже, коефіцієнт  $b$ , який характеризує вихід біоетанолу з сахарози, яка домінує в соці стебел цукрового сорго, становить 0,53. Сучасні заводи допускають втрати біоетанолу на рівні 9...15%, тому коефіцієнт заводського виходу  $k$  приймаємо 0,9. Сік зі стебел сорго цукрового отримують переважно за допомогою вальцевих пресів. Вихід соку при цьому становить близько 50% від урожаю стебел, або 75% від наявної у стеблах вологи (Аврамчук, 2018).

Для полегшення біоконверсії лігноцелюлозної сировини, її попередньо обробляють у декілька технологічних стадій (Шульга та ін., 2013).

Основною, для всіх видів такої сировини, є стадія подрібнення (Олійнічук, 2000). Властивості помелу обумовлюють температурний режим водно-теплової обробки і ступінь втрат зброджувальних вуглеводів. При збільшенні ступеню диспергування сировини знижувалась температура розварювання, зменшувались втрати цукру та підвищувався вихід розчинників. Це пояснювалось частковим розчепленням целюлози та утворенням додаткової кількості зброджувальних цукрів.

Наступна стадія – це стадія температурної обробки лігноцелюлозної біомаси для вивільнення цукрів. Температурна обробка відбувалась як при відносно низькій температурі (135-145<sup>0</sup>C) протягом однієї або більше годин, так і при підвищеній температурі (165-175<sup>0</sup>C) від двох до п'яти

хвилин, або постадійно (від вищої температури до нижчої). Стадія попередньої підготовки сировини мала багато варіацій, прикладом яких була органозольна підготовка (Cateto et al., 2011; Sannigrahi et al., 2010) з використанням лугів (Wang et al., 2008), гідроксиду натрію, розбавлених кислот (Sun, Cheng, 2005; Laser et al., 2011; et al., 2002), іонних рідин (Li et al., 2010; Arora et al., 2018; Zhao et al., 2010), високочастотного нагрівання (Hu et al., 2008), оброблення за допомогою гострого пару (Sassner et al., 2008; Sassner et al., 2005), вапна (Rio et al., 2012) або аміаку (Bals et al., 2010). Найбільш перспективними визнані підготовки і органозольна та за допомогою гострого пару. При таких обробках збільшувався вихід цукрів, зменшувалась кількість нерозчинного лігніну та підвищувався вміст целюлози, що легко розщеплювалась.

Наступною стадією підготовки сировини для подальшої біоконверсії був гідроліз до пентозних або гексозних цукрів. Гідроліз відбувався із застосуванням або лугів, або кислот, або ензимів.

В якості ензиматичного гідролізу використовували як власно ензими, так і мікроорганізми, що продукують ензими. Каталітична активність ензимів характеризувалась “числом обертів”, тобто кількістю перетворених за одиницю часу молей речовини на один моль ензиму. Активність ензимів залежала від температури, концентрації водних іонів, присутності активатора та інгібітора. Детальний механізм ензиматичного гідролізу лігноцелюлози до цього часу невідомий. Значні успіхи були досягнуті у вивченні лігноцелюлолітичних генів мікроорганізмів, що брали участь в ензиматичному гідролізі.

Ацетонобутилове бродіння – хімічний процес розкладання вуглеводів ацетонобутиловими бактеріями і проходить анаеробно (без доступу кисню) з утворенням ацетону, бутилового спирту, а також оцтової, масляної кислот та газів бродіння – водню та вуглекислого газу.

Існує кілька видів бактерій, яким властиво маслянокисле бродіння та його різновид ацетонобутилового бродіння (Bao et al., 2022; Liberato et al., 2019; Lawson et al., 2021). При маслянокислому бродінні глюкоза окислюється до пірувату гліколітичним шляхом, який далі перетворюється на ацетил-КоА. Ацетонобутилове бродіння здійснюється мікроорганізмами, що належать до родів *Clostridium*, *Butyrivibrio*, *Butyribacterium*, *Sarcina*, *Eubacterium*, *Fusobacterium* та *Megasphaera* (Tigunova et al., 2013; Shaw et al., 2020).

Рід *Clostridium* відноситься до сімейства *Bacillaceae*, як і інші представники цього сімейства (*Bacillus*, *Sporolactobacillus*, *Desulfotomaculum* та *Sporosarcina*). Клострідії грампозитивні,

спороутворюючі, їх розміри варіюються в середньому від 2-3 до 7-8 мкм завдовжки і 0,5-1 мкм завширшки. Серед спороутворюючих анаеробів зустрічаються і гіганти - вегетативні клітини, що досягають 15-30 мкм завдовжки і 1,5-2,5 мкм завширшки. Вони дуже рухливі через перитрихально розташовані джгутики. Вегетативні клітини паличкоподібні, проте, форма їх може змінюватись у залежності від умов середовища. Овальні або кулясті ендоспори змінюють форму паличкоподібної материнської клітини, тому що їх діаметр, як правило, більший за ширину цієї клітини (Buckel, 2021).

Фізіологічно клостридії відрізняються явно вираженим бродильним типом метаболізму, а також чутливістю до кисню – зростають лише в анаеробних умовах. Однак існують і перехідні форми від строго анаеробних видів (*C. pasteurianum*, *C. kluyveri*) до майже аеротолерантних (*C. histolyticum*, *C. acetobutylicum*). Клостридії, як правило, не містять гемопротейнів (цитохромів та каталази). Деякі види здатні утворювати цитохроми, якщо вживильному середовищі містяться їх попередники. Із запасних речовин поширені крохмалеподібні полісахариди (Meramo-Hurtado et al., 2020).

Температурний оптимум зростання більшості відомих видів *Clostridium* варіює між 30 і 40°C. Поряд із цими мезофільними мікроорганізмами, зустрічається багато термофільних видів з оптимумом 60 - 75°C (*C. thermoaceticum* і *C. thermohydrosulfuricum*). Вони здатні зростати, як правило, у нейтральному чи лужному середовищі, а при підкисленні – їх зростання практично повністю зупиняється (Roehlein et al., 2017; Moon et al., 2016).

Клостридії різняться між собою стосовно субстратів, які можуть зброджувати (Xu, Jiang, 2011). Одні види мікроорганізмів можуть зброджувати широке коло різних субстратів, інші – вузькоспеціалізовані та здатні зброджувати лише один або кілька видів сировини (рис. 4.1). Клостридії здатні конвертувати полісахариди (крохмаль, глікоген, целюлозу, геміцелюлози, пектини), органічні кислоти, білки, амінокислоти, гетероциклічні сполуки (Nawab et al., 2020). Ряд мікроорганізмів використовують складні живильні середовища та/або ростові речовини, а інші – молекулярний азот, як єдине джерело (*C. pasteurianum*) (Xin et al., 2020).

За здатністю зброджувати різні субстрати, мікроорганізми можна підрозділити на цукролітичні та пептолітичні. Цукролітичні клостридії розщеплюють переважно моно- або полісахариди, а пептолітичні клостридії розщеплюють білки та амінокислоти (Sapireddy et al., 2021).

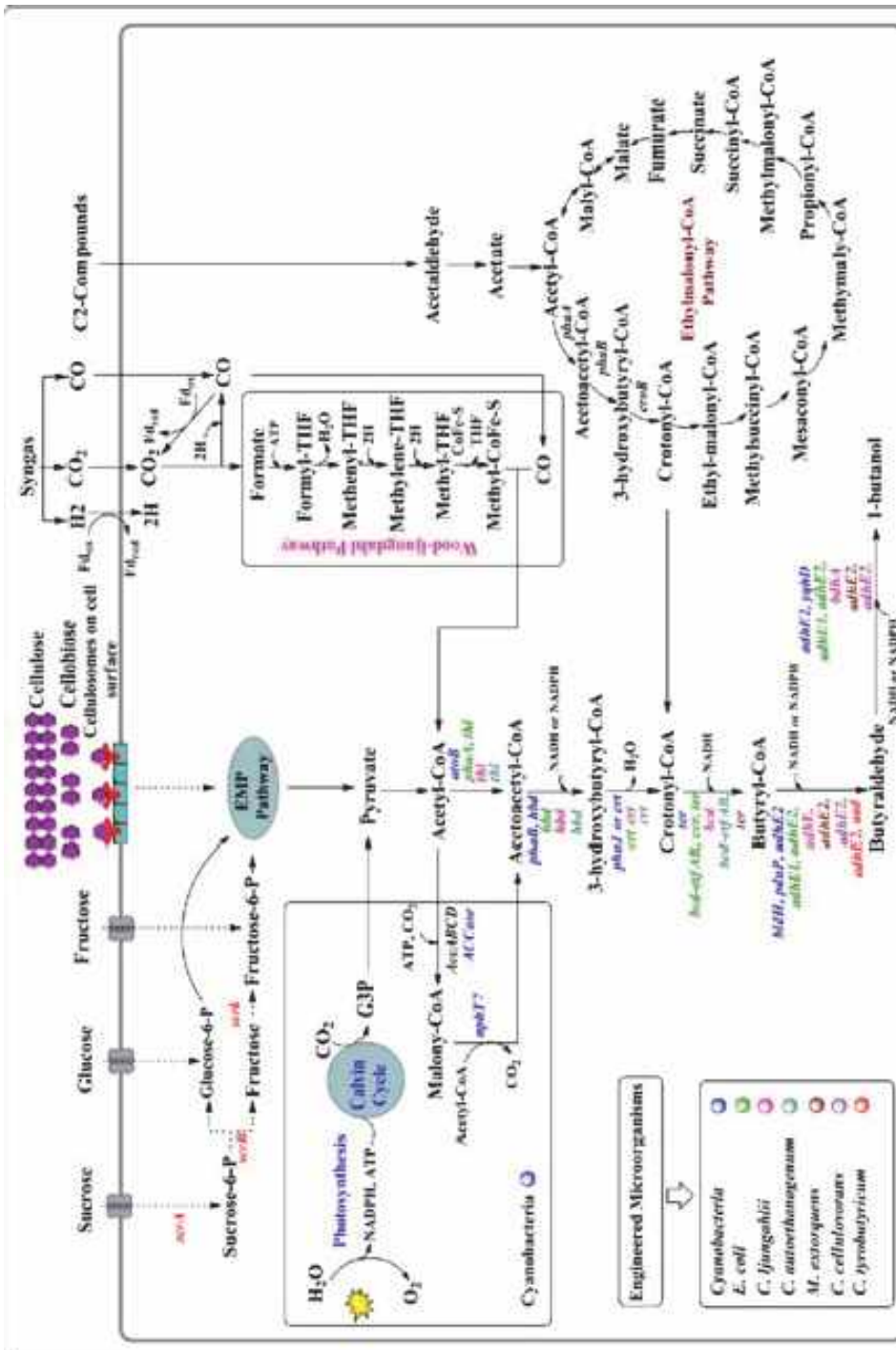


Рис. 4.1. Схема виробництва 1-бутанолу в гетерологічних господарях з різних сировинних матеріалів. Кольори представляють гетерологічні гени, що експресуються в різних господарях (Wan et al., 2020)



Маслянокисле бродіння здійснюють переважно мікроорганізми анаероби *C. butyricum*, *C. tyrobutyricum*, *C. lactoacetophilum* (Therien et al., 2017). Їх основні продукти бродіння олійна та оцтова кислоти. Оцтовокисле бродіння вуглеводів спостерігається у *C. aceticum* та *C. thermoaceticum* (Cai et al., 2021). Пропіоновокисле бродіння властиве *C. propionicum* з утворенням основних продуктів пропіонової та оцтової кислот та вуглекислого газу (Cao et al., 2021).

Найбільш активні пектинолітичні види – *C. felsineum*, *C. laniganii*, *C. pectinolyticum*, *C. pectinovorum*, *C. virens* та інші пігментовані та непігментовані кластридії та плектридії (Du et al., 2021). Кожному виду властиві свої специфічні деталі обміну речовин, але їх загальною властивістю є здатність розкладати пектинові речовини з утворенням органічних кислот, спиртів і газів.

Ряд мікроорганізмів мають дуже стійкі пектинолітичні властивості і виділяють пектинолітичні ферменти на середовищах без пектинових речовин. Для інших анаеробів (наприклад, *C. multif fermentans*) синтез ферментів відбувається тільки при додаванні до середовища пектинів (індукований синтез ферментів) (Gonzalez-Garcia et al., 2017). Пектинолітичні анаероби здійснюють зброджування цукрів за маслянокислим або ацетонобутиловим типом. Існує група високо спеціалізованих анаеробних спороутворюючих бактерій, що отримує енергію за рахунок зброджування целюлози з кінцевими продуктами бродіння оцтової, пропіонової, олійної та молочної кислот, етиловим спиртом, воднем і вуглекислим газом і проміжними продуктами – глюкозою. Для таких бактерій при додаванні в живильне середовище глюкози або сахарози процес бродіння практично відсутній (цукри не засвоюються), а при одночасному внесенні глюкози та клітковини – зброджується в основному клітковина. Це свідчить про високу спеціалізацію целюлозорозкладних мікроорганізмів.

Целюлозолітичні бактерії відрізняються як фізіологічними, так й морфологічними особливостями. Більшість целюлозолітичних спороутворюючих анаеробів мають вигляд тонких довгих паличок, що утворюють суперечки по плектридіальному типу. Зазвичай вегетативні клітини перебувають в адсорбованому стані на волокнах целюлози. Можливо, це пов'язано з тим, що ферменти, що гідролізують клітковину (целюлази) у середовище не виділяються, а прикріплені до поверхні клітин. Спорують клітини зазвичай знаходяться в розчині, і при спороутворенні змінюється характер їхнього зв'язку з середовищем, а

спороутворення йде за рахунок ендogenous метаболізму (за рахунок внутрішньоклітинних запасів поживних речовин). Виділено кілька спеціалізованих видів анаеробних бактерій, які використовують органічні кислоти та спирти як джерело вуглецю та енергії (Wan et al., 2020).

Мікроорганізми *C. kluyveri*, як правило, отримують енергію за рахунок сполученого окислення-відновлення системи етиловий спирт - оцтова кислота і, у результаті, утворюються вищі жирні кислоти (в основному капронова та масляна кислоти). Не всі бактерії *C. kluyveri* здатні зброджувати вуглеводи, амінокислоти та пурини. Накопичення енергії через АТФ у таких анаеробів відбувається через механізм окисного фосфорилування (Hasan et al., 2020).

Існують три види бактерій (*C. acidiurici*, *C. cylindrosporum* та *C. uracilicum*), що зброджують гетероциклічні сполуки. Вони здатні руйнувати гетероцикли з утворенням оцтової кислоти, вуглекислого газу та аміаку. Перші два види бактерій не здатні використовувати вуглеводи та білки (амінокислоти). Ці бактерії відносно швидко розщеплюють ксантин, гуанін, гуанозин, 6,8-діоксипурин та порівняно повільно (і то після адаптації) – гіпоксантин та інозит (Benito et al., 2020).

Специфічність щодо субстратів у спороутворюючих анаеробів різко виражена. Деякі протеолітичні анаероби (наприклад, *C. sporogens*) не задовольняються середовищами, які містять набір амінокислот, вуглеводів, мінеральних солей, комплекс вітамінів і активатори мікробного росту. Такі виражені гетеротрофи ростуть лише на середовищах, що містять білки або продукти їхнього часткового гідролізу. Однак, існують анаероби (сульфаторедукуючі бактерії), що зброджують прості середовища, до складу яких входить кілька мінеральних солей (у тому числі сульфати) і органічна кислота (може засвоюватися і атмосферний азот).

Здатність фіксувати молекулярний азот поширена серед спороносних бактерій. Такий процес можуть здійснювати маслянокислі, ацетонобутилові та сульфаторедукуючі бактерії. Найбільш активні азотфіксатори – цукролітичні анаероби (кlostридії). Ставлення до кисню у різних фізіологічних груп спороутворюючих анаеробів не однакове. Більш стійкими до дії кисню є цукролітичні анаероби. Частина представників цієї групи – аеротолерантні форми *C. carnis*, *C. histolyticum*, здатні виявляти слабе зростання на платівках агару навіть в аеробних умовах. Чутливі до кисню і важко культивуються сульфаторедукуючі бактерії. Їх зростання можливе лише в анаеробних умовах без кисню серед культивування (Brunt et al., 2020).

## РОЗДІЛ 5.

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ШТАМІВ-ПРОДУЦЕНТІВ БУТАНОЛУ У ПРОЦЕСІ ЗБЕРІГАННЯ

---

Проблема зберігання мікроорганізмів у колекціях чистих культур є актуальною. Зацікавленість до чистих культур мікроорганізмів виявляється на достатньо високому рівні спеціалістами самого широкого профілю. Традиційні методи підтримання культур мікроорганізмів зводяться до їх вирощування на багатих живильних середовищах з частими пересівами. При цьому спостерігаються мутаційні зміни і автоселекція, які часто призводять до втрати важливих фізіолого-біохімічних властивостей. Тривале зберігання культур мікроорганізмів без втрати властивостей продуцентів можливе, якщо різко припинити всі процеси, які протікають у клітині. При цьому клітина переводиться в стан, близький до анабіозу.

Відомо багато способів зберігання культур мікроорганізмів: періодичні пересіви, зберігання у 25%-вому розчині гліцерину за температури 20 °С, зберігання в дистильованій воді, зберігання під вазеліновим маслом на агаризованому середовищі та зберігання в ліофілізованому стані. Жоден з відомих способів не є універсальним.

При зберіганні в більшості мікроорганізмів відбувається часткова загибель клітин, а у деяких випадках – зміна їх властивостей. Крім того, характеристики культур які зберігаються, залежать від правильного проведення кожної операції і визначаються, у свою чергу, фізіологічними та технологічними властивостями мікроорганізму, який підлягає зберіганню. Збереження життєздатності і інших біологічних властивостей мікроорганізмів залежить від багатьох факторів: віку культури (деякі види мікроорганізмів найбільш стійкі до заморожування у кінці логарифмічної стадії та на початку стаціонарної фази росту), концентрації клітин, складу захисного середовища, активності метаболічних процесів та ін. Особливо це стосується промислових мікроорганізмів, визначальним параметром яких є продуктивність цільового продукту.

Основною проблемою збереження будь-яких мікроорганізмів у колекціях є те, що біологічний матеріал дуже нестійкий. При зберіганні на штучних поживних середовищах мікроорганізми швидко висихають, відмирають, знижують або гублять свої фізіологічні та ферментативні властивості. Потреба у способах довготривалого збереження мікроорганізмів та різного матеріалу біологічного походження виникла ще на початку розвитку мікробіологічної науки.

У наш час, для консервування матеріалів біологічного походження, широке застосування має метод висушування – ліофілізація. При ліофілізації біологічних матеріалів наявна в них вільна вода замерзає після досягнення достатнього розрідження газів, а потім видаляється методом сублімації – шляхом переходу в пару безпосередньо з твердого стану (льоду) оминаючи рідку фазу. При ліофілізації температура матеріалу, що піддається зневодненню, протягом усього періоду видалення вільної води залишається нижче температури замерзання, унаслідок чого білки не піддаються денатуруючій дії підвищених концентрацій електролітів.

Однак, важливе значення має структура сухого матеріалу після ліофілізації. Після сублімації льоду це має бути суха, пориста, без вільної води маса, що майже зберегла об'єм і структуру вихідної речовини. При додаванні води ця суха маса повинна швидко розчинятися. Заморожування з подальшим висушуванням не гарантує збереження всіх властивостей біологічного матеріалу, але цей метод значно підвищує можливості довготривалого зберігання культур мікроорганізмів, живих вакцин, сироваток, плазми тощо.

Особливо важливими при ліофілізації є значення наступних властивостей біологічного матеріалу:

- 1) евтектична температура, або евтектична точка;
- 2) вміст зв'язаної води та енергія її зв'язку з гідрофільними речовинами;
- 3) залишкова вологість сухого матеріалу (Fernandez-Segovia et al., 2007).

При заморожуванні будь-якого матеріалу, що містить воду та розчинені в ній солі, спостерігається евтектичне розділення розчину. Це розділення заключається в тому, що спочатку замерзає чиста вода, а сіль при цьому концентрується в незамерзлій частині води, до того часу, доки розчин не досягне найвищої, властивої даній солі, за низької температури (евтектичної) концентрації, лише після цього подальше зниження

температури приводить до швидкого замерзання евтектичної концентрації розчину. Евтектичною температурою або евтектичною точкою називають температуру, за якої досягається максимальна концентрація даної солі та відбувається замерзання всього розчину. Наприклад, евтектична температура харчової солі складає 22,42%. Такої концентрації розчин досягає за температури  $-21^{\circ}\text{C}$ . У біологічних матеріалах, що є складними поєднаннями колоїдів і розчинених солей, міститься ряд речовин, що здатні утворювати евтектичні концентрації при охолодженні до нуля. Підвищені концентрації солей, що утворюються при заморожуванні матеріалу можуть викликати денатурацію білків, що містяться в цьому матеріалі або руйнувати мікробні клітини. Ступінь пошкоджуючої дії солей, концентрації яких наближаються до евтектичних, залежить, у першу чергу, від природи розчиненої солі, швидкості охолодження суспензії та вихідної концентрації матеріалу. Чим швидше проходить охолодження, тобто коротший період впливу концентрованих розчинів солей, тим менше їх пошкоджуючий вплив. Деякі речовини складних біологічних систем мають виражений захисний вплив проти шкідливого впливу евтектичних концентрацій солей. Руйнуючий вплив харчової солі при заморожуванні деяких бактерій повністю знімається уприсутності желатози. Тобто шляхом підбору і використання так званих “захисних” середовищ різного складу для різних мікроорганізмів можна позбавитись пошкоджуючого впливу евтектичних концентрацій при заморожуванні та ліофілізації.

Другим важливим параметром при використанні ліофілізації є вміст зв'язаної води та енергія її зв'язку з гідрофільними речовинами. При великому вмісті води, що має значну енергію зв'язку, видалення води з матеріалу викликає труднощі, термін ліофілізації подовжується, кінцевий сухий матеріал має більш високу залишкову вологість, у порівнянні з вихідним матеріалом, який має невелику гідрофільність. Крім того ступінь гідрофільності впливає також на захисні властивості середовищ, що додаються до культур мікроорганізмів перед ліофілізацією. Пряме визначення зв'язаної води можна замінити визначенням порівняльної гідрофільності, наприклад, визначенням залишкової вологості в біологічних препаратах при їх одночасній ліофілізації на одному й тому ж апараті. Цей прийом може бути використаний при вивченні захисних середовищ. Захисні середовища обов'язково мають бути гідрофільними. Захисні властивості середовища покращуються з підвищенням її гідрофільності. Великий вміст гідрофільних речовин у захисному

середовищі подовжує процес сушки, створює підвищену залишкову вологість, знижує розчинність сухого матеріалу. Тобто вміст гідрофільних речовин має лише забезпечувати оптимальну залишкову вологість.

Окрім наявності в середовищі речовин, від яких залежить залишкова гідрофільність матеріалу, у середовищі мають бути ще й речовини, які максимально захищають клітини мікроорганізму від шкідливого впливу, наприклад, евтектичних температур. Після видалення вільної води середовище має забезпечувати дрібнопористу достатньо щільну структуру. Якщо середовище не відповідає цим вимогам і сухий матеріал має не щільну структуру або має вигляд окремих грудочок, порошку, то частина мікробних клітин може бути видалена з ампул у процесі ліофілізації в потоці газів і водяної пари. Проте, якщо захисне середовище містить достатню кількість ефективних наповнювачів, ці речовини, після видалення вільної води, залишаться у вигляді пористої маси з включеними до неї мікроорганізмами. Така структура забезпечує фіксацію мікроорганізмів у сухому залишку і ліофільні властивості біологічного матеріалу.

Кількість життєздатних клітин після ліофілізації в значній мірі залежить від складу захисних середовищ. Виживання мікроорганізмів при ліофілізації можна збільшити шляхом підбирання захисних середовищ, їх оптимального складу і співвідношення компонентів у середовищі, які запобігають або зменшують інтенсивність деструктивних процесів.

Існують загальні вимоги до захисних середовищ. Ці середовища мають бути гідрофільними (речовини, які не зв'язують воду не є захисними для мікроорганізмів при їх ліофілізації) і не повинні містити солей (для цього їх готують на дистильованій або бідистильованій воді). Крім того, необхідно запобігти попаданню солей із середовища культивування разом з мікробною масою. Для цього, перед змивом мікробної маси захисним середовищем, необхідно видалити конденсаційну воду із пробірок, у яких вирощували культуру.

Дослідження різних захисних середовищ дозволило підібрати середовища, до складу яких входили вуглеводи (глюкоза і сахароза як гідрофільні речовини), желатина та агар (як колоїди), що максимально захищали клітини мікроорганізму від шкідливого впливу ліофілізації і не мали антигенних властивостей. Ці середовища можна вважати гідрофільними, але вміст цих речовин не повинен бути надмірним.

Занадто великий вміст гідрофільних речовин уповільнює процес висушування, створює підвищену залишкову вологість і зменшує розчинність сухого препарату. Тобто вміст гідрофільних речовин має лише забезпечувати оптимальну залишкову вологість.

На життєздатність мікроорганізмів у процесі ліофілізації впливають такі фактори як умови культивування, вік клітин, склад захисного середовища (кріопротектора) і співвідношення в ньому компонентів, особливості процесу заморожування та висушування. Оптимізація цих процесів дозволяє досягти збереження до 80-90% життєздатних клітин.

Пошкодження мікроорганізмів при заморожуванні, ліофілізації і подальшому зберіганні виявляються у втраті життєздатності в частини особин. Таким чином, показник життєздатності клітин дозволяє робити висновки щодо умов усього процесу одержання сухого біологічного матеріалу.

Охолодження і заморожування – попередня стадія ліофілізації. Мікробні клітини, що відносяться не тільки до одного виду, а й до одного штаму чи генерації, реагують на охолодження неоднаково. Кількість клітин, що зберігають життєздатність при впливі холоду залежить від виду мікроорганізму, швидкості і температури охолодження, наявності в середовищі захисних речовин, стану мікроорганізму (вік, кількість води та електролітів у клітинах тощо).

При підготовці ліофілізованого матеріалу для дослідження необхідно виконати дві умови: максимально точно відновити попередній (до висушування) об'єм матеріалу та вивести живі клітини із стану анабіозу. Для виконання першої умови до ліофілізованого матеріалу додають дистильовану воду в кількості, що дорівнює масі води, що випарилася при ліофілізації. Щодо другої умови, відомо, що виведення ліофілізованої культури з анабіозу більш ефективно, якщо висів на тверде поживне середовище проводиться не одразу після розчинення сухої маси, а через деякий час.

## 5.1. Матеріали та методи

Для досліджень використовували штам-продуценти бутанолу *Clostridium* sp. UCM В-7570, *Clostridium acetobutylicum* UCM В-7407 та *S. tyrobutylicum* IFBG С4В з “Колекції штамів мікроорганізмів та ліній рослин для сільськогосподарської та промислової біотехнології” Інституту харчової біотехнології та геноміки НАН України і Національного ботанічного саду імені М. М. Гришка НАН України. Сік, багасу та незернову біомасу сорго цукрового (*Sorghum saccharatum* (L.) Moench) сорту Energodar (НБС, ІХБГ), hybrid AMBR-1 (НБС, ІХБГ), hybrid-720 (Alta Seeds Advanta US), hybrid ST-207 (RAGT Semences) були отримані з фітосировини рослин, вирощених на інтродукційно-селекційних ділянках НБС імені М.М.Гришка НАН України (рис. 5.1).



Рис.5.1. Біомаса сорго цукрового (зліва направо) сорт Energodar, hybrid AMBR-1, hybrid-720, hybrid ST-207

Біомасу сорго висушували за температури 30 °С протягом тижня. Вологість сировини визначалася за допомогою вагового аналізатору вологості RADWAG MA 50/C/1 (Польща). Висушену біомасу подрібнювали, використовуючи млин лабораторний “Циклон МШ 1” (Україна) до розміру 200 меш.

Як активаційні середовища застосовували середовище Виноградського (склад г на л дистильованої води: глюкози – 5,  $K_2HPO_4$  – 1,  $MgSO_4$  – 0,5;  $NaCl$  – 0,01;  $FeSO_4$  – 0,01;  $MnSO_4$  – 0,01; стерилізували



протягом 30 хв при 0,5 атм). Як ферментаційне середовище використовували затор із сухої біомаси концентрацією 60 г/л (рис. 5.2а, 5.3), багасу концентрацією 60 г/л (рис.5.2б) та сік сорго (рис. 5.2в). Затори стерилізували 1 атм 30 хв, сік 0,5 атм 30 хв.



Рис.5.2. Сировина сорго цукрового для ферментації



Рис. 5.3. Підготовлена біомаса чотирьох сортів сорго цукрового

Культивування зразків проводили в колбах з рідким середовищем або на чашках Петрі в ексікаторі, кришку якого герметично притирали за допомогою вазеліну та тричі продували азотом у термостаті при 30 °С. Після вирощування, через 7 діб від початку ферментації, клітини

осадили за допомогою ультрацентрифуги “Labofuge 400R” (Німеччина) протягом 30 хв при 13000 об/хв. Ферментацію проводили в колбах об’ємом 500 мл з використанням 250 мл середовища. Колби зважували та термостатували за температури 35°C.

Після ферментації, з культуральної рідини за допомогою перегінної установки, відганяли продукти бродіння. У культуральній рідині визначали етанол, бутанол та ацетон за допомогою газового хроматографу з полум’яно-іонізаційним детектором (ДІП), колонка 2,4 м×3мм з хромсорбом карбовакс 6000. Температура колонки 80±5°, випарювача 140±10°C. Співвідношення потоків азот-водень-повітря 1:1:10. Для визначення концентрації бутанолу в культуральній рідині було побудовано калібрувальний графік з використанням різних концентрацій бутанолу в дистильованій воді (рис.5.4).

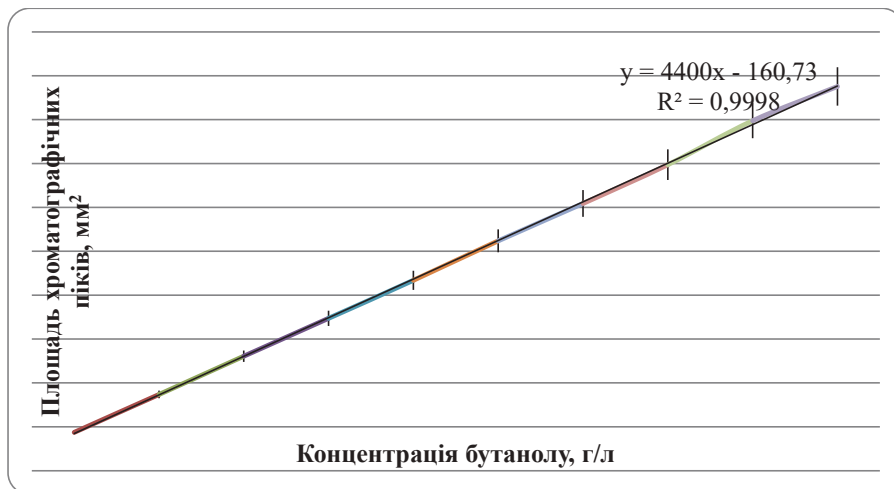


Рис. 5.4. Калібрувальний графік залежності площі хроматографічних піків від концентрації бутанолу

Для вивчення впливу захисного середовища на життєздатність клітин після ліофілізації, досліджували захисні середовища наступного складу (%): глюкоза або цукроза – 1,0; 10,0; 30,0; желатоза – 10,0; агар-0,3. Бактерії вносили в захисне середовище з розрахунку концентрації клітин  $4 \times 10^6$  клітин/мл, потім суспензію в кількості 5 мл вносили в пеніцилінові флакони (рис. 5.5).

Одержані зразки заморожували в низькотемпературному холодильнику “LAB 11/EL19LT” (“Elcold”, Данія) за температури -80°C. Заморожені зразки переносили в спеціальних касетах у попередньо

охолоджену камеру (температура конденсатора – 50 °С) ліофільної сушки “CRUODOS-50” (“TELSTAR”, Іспанія). Тривалість висушування становила 72 год. Кінцеву вологість контролювали за допомогою аналізатора вологості.



Рис.5.5. Флакони з ліофілізованими бактеріями

При підготовці ліофілізованого матеріалу для досліджень необхідно було виконати дві умови: максимально точно відновити попередній (до висушування) об’єм матеріалу та вивести живі клітини із стану анабіозу. Для виконання цих умов, ліофілізований матеріал доводили дистильованою водою до об’єму 5 мл і витримували бактерії при кімнатній температурі.

Органозольну підготовку сировини проводили з ацетоном у колбах на 200 мл зі зворотнім холодильником. 60 г сировини поміщали в колбу та доливали 100 мл водного розчину ацетону (50 мл води та 50 мл ацетону) та 0,1% сірчаної кислоти, як каталізатору, кип’ятіння проводили протягом 60 та 90 хв.

Для визначення компонентів біомаси, а саме лігніну, використовували ДСТУ ISO 13906:2013, целюлози – ДСТУ ISO 2470:2005, вологості – ДСТУ EN 13041:2005, білка – ДСТУ 4595:2006, геміцелюлоз – ДСТУ 3500-97, загального цукру - ДСТУ 5059, золи - ДСТУ ISO 5985:20054.

Вибуховий автогідроліз сировини проводили на спеціально виготовленій лабораторній установці. Сировину обробляли насиченою водною парою в інтервалі температур 180-260 °С під відповідним тиском, з наступним різким скидом тиску до атмосферного. При цьому відбувалось розділення (розволокнення) лігноцелюлозної сировини.

Ензиматичний гідроліз, попередньо підготовленої біомаси, здійснювали за допомогою целюлозного ферментного комплексу

целюлозу з *Trichoderma reesei* ATCC 26921(Sigma, США) та целобіаз з *Aspergillus niger* (Sigma, США) та  $\beta$ -глюкозидазами в оптимальних умовах, рекомендованих виробником: температура процесу — 50°C, pH = 5,0 (допустимий діапазон 50–65°C; pH 4–5). За лужного гідролізу відбувається часткове розщеплення лігніну і такий гідроліз здійснюють за рахунок 1 %-го розчину NaOH за температури 100°C. Кислотний гідроліз виконували за 100°C з 1% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Усі досліді проводили в трьох повтореннях. Статистична обробка експериментальних даних була зроблена за допомогою програми Microsoft Excel. Різницю між двома середніми величинами вважали достовірною при  $p < 0,05$ .

## 5.2. Результати і обговорення

Аналіз макрокомпонентного складу рослинних тканин дає можливість урахувати і визначити з достатньою точністю речовини, які входять до складу рослин. Цей метод є першою ланкою при використанні біосировини як субстрату. Отже, досліджено хімічний склад біомаси сорго цукрового та визначено його компоненти (рис.5.6).

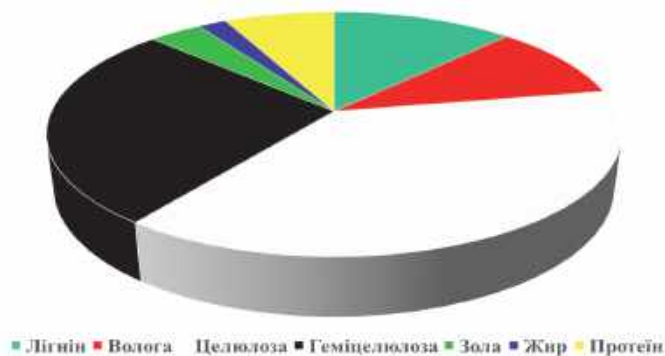


Рис. 5.6. Усереднений макрокомпонентний склад біомаси сортів сорго цукрового, %

За результатами аналізу було показано, що найбільшу частину складала целюлоза (38%) та геміцелюлоза (26,9%), що можуть бути використані як субстрат для бактерій. Однак, значну частину складає лігнін, який не розкладається мікроорганізмами (12,2 %).

Було також досліджено хімічний склад багаси сорго цукрового та визначено його компоненти (рис. 5.7).

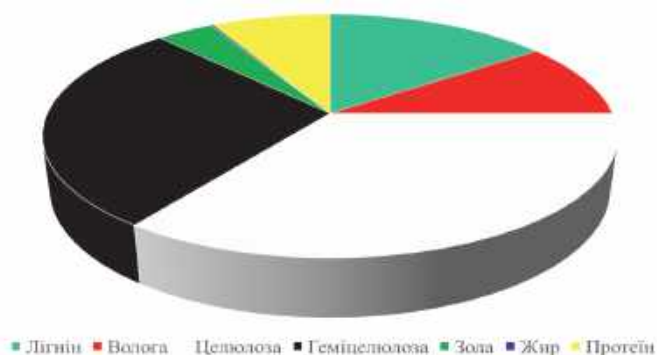


Рис. 5.7. Усереднений макрокомпонентний склад сортозразків багаси сорго цукрового, %

Показано, що на відміну від біомаси сорго цукрового, багаса містить більше геміцелюлози (28%), але менше целюлози (35%) та більше лігніну (15%), що певно може інгібувати ферментацію.

Нами досліджено склад соку одержаного шляхом вичавлювання зеленої маси сортозразків сорго цукрового як сировини для ферментації. Отримані результати відображені в табл. 5. 1 та 5.2.

Таблиця 5.1

### Хімічний склад сорго цукрового

Показник	Значення
Концентрація сухих речовин, %	16,5-18,7
Вміст цукрів, що зброджуються: усього, %	14,3-16,2
у тому числі: сахароза, %	8,8-9,9
фруктоза, %	0,9-1,4
глюкоза, %	2,3-2,7
інші моноцукри	1,5-2,3
pH соку	4,8-5,2
Вміст загального азоту, %	0,076-0,082
Вміст фосфору (у перерахунку на P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ), %	0,004-0,0045

Таблиця 5.2

## Амінокислотний склад соку сорго цукрового

Амінокислота	Вміст, мг/100 г соку	Аамінокислота	Вміст, мг/100 г соку
аланін	0,76-1,3	лізин	0,57-0,95
аргінін	0,40-0,57	метіонін	0,14-0,36
аспарагінова кислота	0,95-1,5	пролін	0,38-0,58
валін	1,12-1,70	серин	1,42-2,07
гістидин	0,76-1,12	тиразин	0,95-1,12
гліцин	0,38-0,45	треонін	0,76-1,1
глутамінова кислота	1,80-2,6	фенілаланін	0,42-0,74
ізолейцин	0,76-1,3	цистин	0,05
лейцин	0,95-1,65		

Узагальнюючи експериментальні дані наведені в таблицях можна зазначити, що, з одного боку сік містить достатню кількість елементів і амінокислот потрібних для життєдіяльності мікроорганізмів, а, з іншого боку, має необхідну кількість цукрів, придатних для біоконверсії в бутанол. Отже, за своїми технологічними показниками сік сорго цукрового є доброякісною сировиною для біосинтезу бутанолу при створенні відповідних умов.

Проведено культивування штамів *Clostridium sp.* IMB B-7570 (IFBG C6H 5M) *Clostridium acetobutylicum* IMB B-7407 (IFBG C6H) та *C. tyrobutylicum* IFBG C4B на соці, багасі та біомасі сорго (рис. 5.8).

Визначено, що найменше накопичення бутанолу було за використання подрібненої біомаси сорго сортозразків та штаму *C. tyrobutylicum* IFBG C4B (0,5 г/л). Найбільше накопичення бутанолу в культуральній рідині отримали за використання нативного соку сортозразків сорго та штаму *Clostridium acetobutylicum* IMB B-7407 (IFBG C6H) та склало 8,2 г/л.

Підготовка субстрату значно впливає на накопичення кінцевого продукту. На першому етапі було висушено біомасу 4 сортів сорго до сталої вологості 7%. Висушену біомасу подрібнено до розміру часточок 200 меш. З отриманими субстратами було створено агаризоване

середовище. Для вивчення властивості культури *Clostridium sp.* ІМВ В-7570 до використання зазначеного сорту сорго та гібридів як субстрату, бактерії було внесено методом глибинного культивування на чашки Петрі в агаризовані середовища (рис. 5.9).

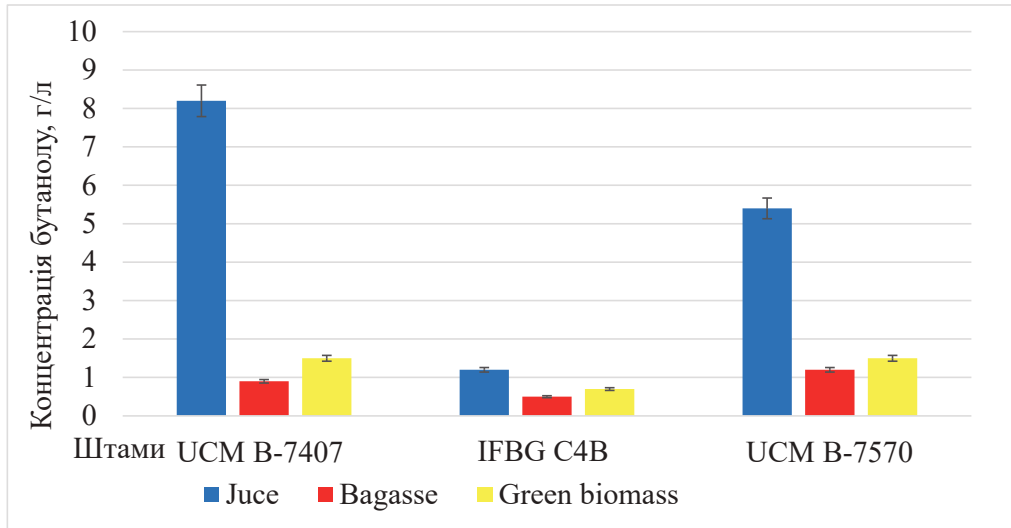


Рис. 5.8. Скринінг штамів-продуцентів бутанолу



Рис. 5.9. Колонії *Clostridium sp.* ІМВ В-7570 на чотирьох сортозразках сорго цукрового як субстратів

Отримані дані показують, що культура *Clostridium sp.* ІМВ В-7570 утворювала колонії на всіх чотирьох агаризованих середовищах. Навколо колоній були характерні зони просвітлення, та скупчення пухирців газу. Результати дослідження свідчать, що культура *Clostridium sp.* ІМВ В-7570 може ферментувати біомасу в усіх чотирьох сортозразків сортів сорго. Колонії культури промікроскопійовано за допомогою Carl Zeiss 2000-с (Німеччина) (рис.5.10).



Рис. 5.10. Колонії культури *Clostridium sp.* ІМВ В-7570 у товщі агару, збільшення 240

Визначено, що колонії змінили свою форму з двояковипуклої лінзи на амебоподібну, що можливо зв'язано зі складністю в доступності субстрату. Клітини бактерій було промікроскопійовано (використовували метиленовий синій) (рис.5.11).

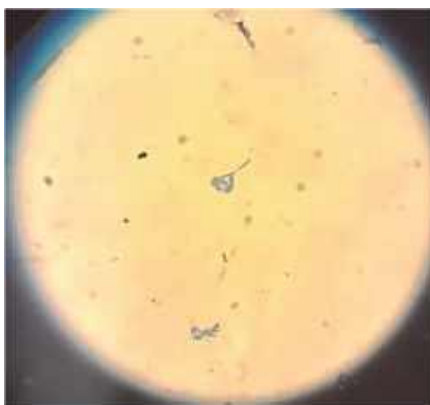


Рис. 5.11. Цитологічне дослідження клітин (збільшення 400)

На рис. 5.11 показано, що клітини культури *Clostridium sp.* ІМВ В-7570 з агаризованих середовищ 4-х сортів сорго не змінили своєї морфології порівняно з вихідною культурою. Культуру *Clostridium sp.* ІМВ В-7570 було висаджено на поверхню агару та культивовано за анаеробних умов (рис. 5.12).





Рис. 5.12. Колонії культури *Clostridium sp.* ІМВ В-7570 на поверхні агару

Досліджено, що за культивування в анаеростаті на поверхні 4х агаризованих середовищах, колонії *Clostridium sp.* ІМВ В-7570 мають відповідні характеристики з вихідною культурою. Для вивчення здатності до накопичення бутанолу на рідкому середовищі було пересаджено колонії зі сорго (рис.5.13).



Рис. 5.13. Бродильна активність колонії *Clostridium sp.* ІМВ В-7570 з агаризованих середовищ

Було показано, що при перенесення культури *Clostridium sp.* ІМВ В-7570 на рідке середовище її бродильна активність не змінюється. Отже, культура не деградувала та здатна була до накопичення розчинників у культуральній рідині. Для визначення потенціалу стосовно накопичення розчинників було проведено дослідження біомасі 4-х сортозразків сорго цукрового. Було створено ензиматичне середовище, яке містило 60 г/л кожного (сорту Energodar (НБС, ІХБГ), hybrid AMBR-1 (НБС, ІХБГ),

hybrid-720 (Alta Seeds Advanta US), hybrid ST-207 (RAGT Semences) сорго цукрового та висаджено культуру *Clostridium sp.* IMB B-7570 (рис. 5. 14).



Рис. 5.14. Бродильна активність культури *Clostridium sp.* IMB B-7570

За культивування різних сортів сорго цукрового було виявлено активне бродіння з послідуочим накопиченням розчинників у культуральній рідині, яке визначено за використання методу газової хроматографії (рис.5.15).

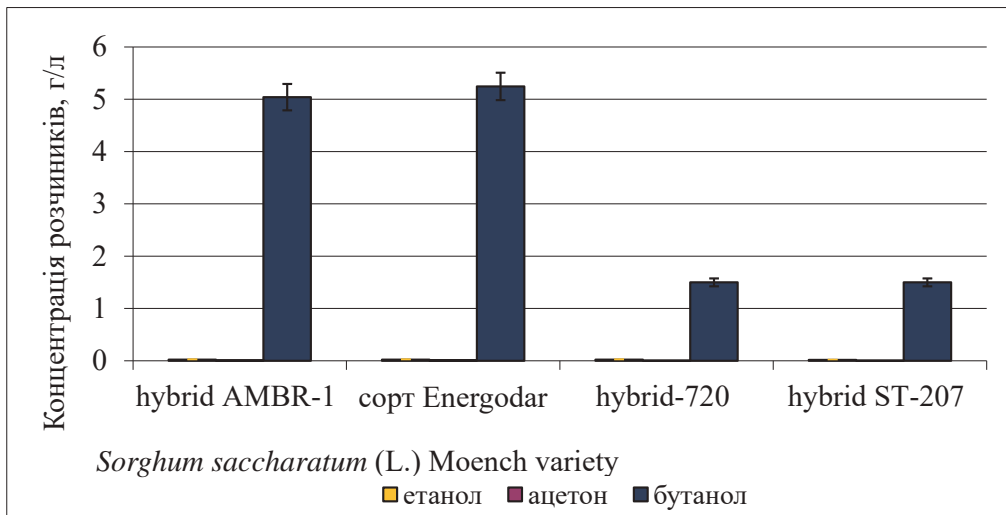


Рис. 5.15. Накопичення бутанолу за культивування на різних сортах сорго цукрового

Показано, що найбільше накопичення бутанолу у культуральній рідині відбулося за використанні біомаси сорту Energodar та hybrid AMBR-1 (5,2 та 5 г/л відповідно). Натомість, за використання hybrid-720

та hybrid ST-207 бутанол теж накопичувався, але в меншій кількості (1,5 г/л в обох випадках).

Проведено попередню підготовку незернової частини біомаси сорго цукрового hybrid-720 за допомогою лужного, кислотного, лужно-ензиматичного та кислотно-ензиматичного гідролізів. Встановлено рН нейтральне рН середовища за допомогою додавання крейди та HCl та проведено ферментацію. Отримані результати відображено на рис. 5.16.

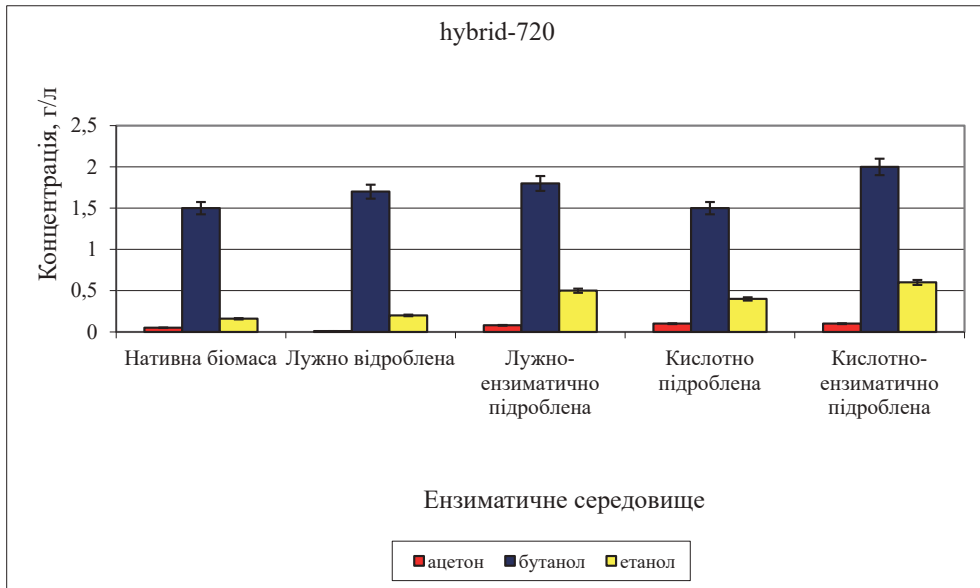


Рис.5.16. Накопичення розчинників на ензиматичному середовищі за різної підготовки

Було показано, що оброблення за допомогою кислотного гідролізу не впливало на накопичення розчинників у процесі ферментації. Лужна та лужно-ензиматична попередня підготовка сировини підвищила накопичення бутанолу у культуральній рідині порівняно з нативною біомасою. Найбільше накопичення бутанолу відмічали за кислотно-ензиматичної попередньої обробки та становило 2 г/л порівняно з нативною біомасою – 1 г/л.

Також проведено попередню підготовку не зернової частини біомаси сорго цукрового hybrid ST-207 за допомогою лужного, кислотного, лужно-ензиматичного та кислотно-ензиматичного гідролізів. Установлено рН нейтральне рН середовища за допомогою додавання

крейди та HCl та проведено ферментацію. Отримані результати наведено на рис. 5.17.

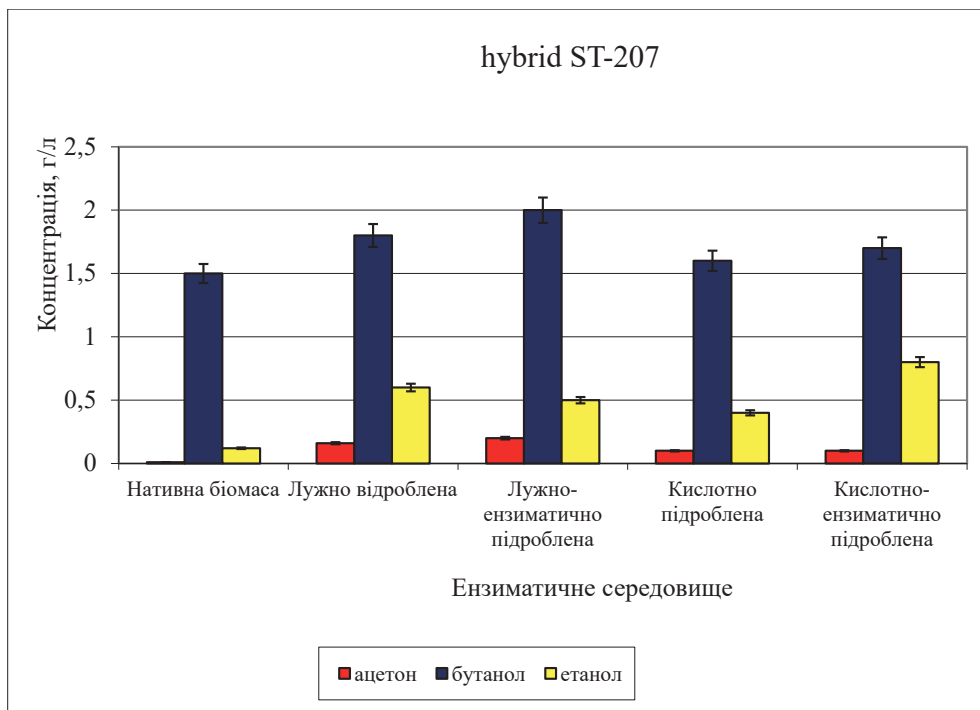


Рис. 5.17. Накопичення розчинників на ензиматичному середовищі за різної підготовки

Як для hybrid-720 так і для hybrid ST-207 оброблення за допомогою кислотного гідролізу не впливало на накопичення розчинників у процесі ферментації. Лужна та кислотно-ензиматична попередня підготовка сировини підвищила накопичення бутанолу в культуральній рідині порівняно з нативною біомасою. Найбільше накопичення бутанолу було отримано за лужно-ензиматичної попередньої обробки та становило 2 г/л порівняно з нативною біомасою – 1 г/л.

Аналогічно проведено дослідження hybrid AMBR-1 за допомогою лужного, кислотного, лужно-ензиматичного та кислотно-ензиматичного гідролізів. Встановлено рН нейтральне рН середовища за допомогою додавання крейди та HCl та проведено ферментацію. Отримані результати представлені на рис. 5.18.

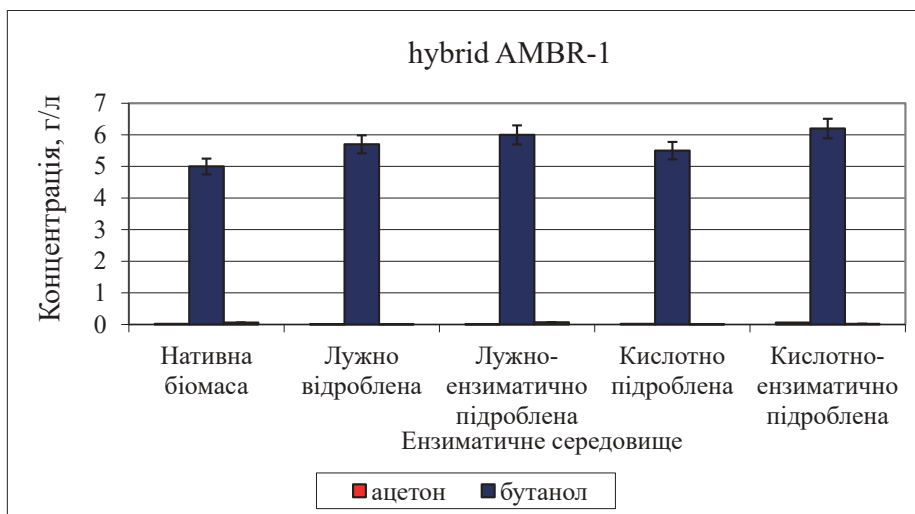


Рис. 5.18. Накопичення розчинників на ензиматичному середовищі за різної підготовки

Отже, оброблення за допомогою кислотного гідролізу не впливало на накопичення розчинників у процесі ферментації. Лужна та лужно-ензиматична попередня підготовка сировини підвищила накопичення бутанолу у культуральній рідині порівняно з нативною біомасою. Найбільше накопичення бутанолу отримано за кислотно-ензиматичної попередньої обробки та становило 6,2 г/л порівняно з нативною біомасою – 5 г/л.

Результати досліджень сорго цукрового сорту Energodar проілюстровано на рис. 5.19.

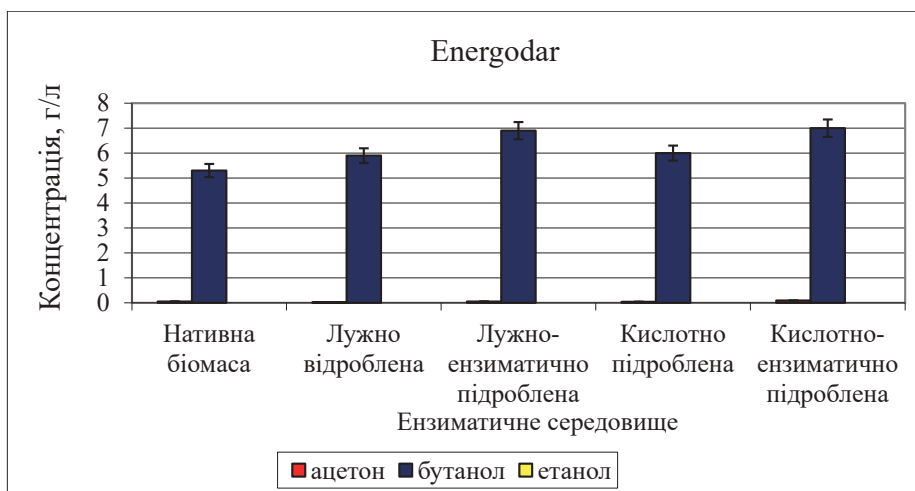


Рис. 5.19 Накопичення розчинників на ензиматичному середовищі за різної підготовки

Показано, що лужна, кислотна та лужно-ензиматична попередня підготовка сировини підвищила накопичення бутанолу у культуральній рідині порівняно з нативною біомасою. Найбільше накопичення бутанолу було отримано за кислотно-ензиматичної попередньої обробки та становило 7 г/л порівняно з нативною біомасою – 5,3 г/л.

Для підготовки культури *Clostridium sp.* IMB B-7570 (IFBG C6H 5M) до ліофілізації, спершу було досліджено залежність залишкової вологості ліофілізованих культур, після ліофілізації, від концентрації глюкози або цукрози в захисному середовищі (табл. 5.3).

Таблиця 5.3

**Залишкова вологість ліофілізованих культур  
залежно від концентрації глюкози та цукрози**

Вуглевод	Концентрація, %	Залишкова вологість суспензії, %
глюкоза	1	18,00± 0,01
	10	2,63± 0,01
	30	43,22± 0,01
сахароза	1	17,99± 0,01
	10	1,68± 0,01
	30	50,44± 0,01

Аналіз даних табл. 5.3 свідчить, що за одних і тих же умов ліофілізації залишкова вологість ліофілізованих культур залежить від типу вуглеводу та його концентрації. Найнижчі показники залишкової вологості одержали за використання глюкози або цукрози в концентрації 10%. Для подальших досліджень було обрано за гідрофільний компонент цукрозу в концентрації 10%. За результатами вивчення було оптимізовано склад захисного середовища, а саме (%): цукроза – 10,0; желатина – 10,0; агар – 0,02.

Надзвичайне значення у процесі зберігання мікроорганізмів після ліофільного висушування, мали температурні умови. З підвищенням температури зберігання знижувалася кількість життєздатних клітин мікроорганізмів та їх продуктивність. Для визначення продуктивності штаму його культивували в заторі з сорго цукрового сорту Energodar. Залежність продуктивності (накопичення бутанолу) ліофілізованих мікроорганізмів від температури після одного місяця зберігання показано на рис. 5.20.

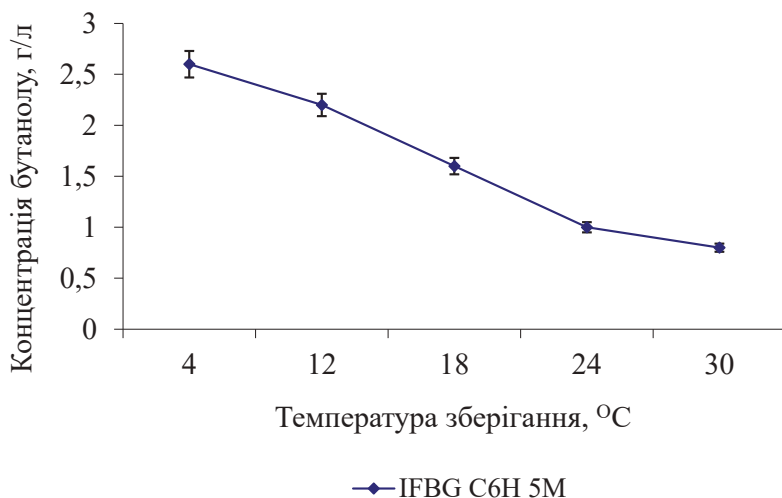


Рис. 5.20. Вплив температури зберігання на накопичення бутанолу

При зберіганні зразків ліофілізованих бактерій протягом одного місяця за температури 4°C продуктивність культур не зменшувалася, порівняно з вихідною (2,7 г/л для IFBG C6H 5M). З підвищенням температури зберігання продуктивність культури поступово знижувалась і за температури 30°C значно зменшувалась.

У подальшому зберігання ліофілізованих культур проводили за температури 4°C протягом шести місяців, досліджуючи через кожен місяць їх продуктивність у заторі з сорго цукрового сорту Energodar (табл. 5.4).

Таблиця 5.4

**Накопичення бутанолу штамом IFBG C6H 5M в процесі зберігання**

Місяці зберігання	Технологічні показники		
	pH, од	суха речовина, %	бутанол, г/л
0	6,65 ± 0,05	11,0 ± 0,1	2,60 ± 0,01
1	6,68 ± 0,05	11,1 ± 0,1	2,56 ± 0,01
2	6,63 ± 0,05	11,2 ± 0,1	2,54 ± 0,03
3	6,65 ± 0,05	11,3 ± 0,1	2,50 ± 0,01
4	6,68 ± 0,05	11,4 ± 0,1	2,49 ± 0,02
5	6,64 ± 0,05	11,3 ± 0,1	2,46 ± 0,01
6	6,63 ± 0,05	11,5 ± 0,1	2,40 ± 0,01

З даних таблиці 5.4 видно, що навіть після зберігання за температури 4<sup>o</sup>C протягом шести місяців, відновлена ліофілізована культура (штам IFBG C6H 5M) була життєздатна. Накопичення бутанолу у культуральній рідині після культивування практично не змінилось в порівнянні з накопиченням до ліофілізації (2,7 г/л).

Було проведено різні види попередньої підготовки не зернової частини біомаси сорго сорту Energodar (термобаричну – вибуховий автогідроліз, органонольну протягом 60 хв та 90 хв) та визначено компонентний склад сировини після оброблення (табл. 5.5).

Таблиця 5.5

### Компонентний склад сорго цукрового сорту Energodar

Попередня підготовка сировини	Компонентний склад, %						
	зольність	жири, смоли	водорозчинні речовини	целюлоза	лігнін	геміцелюлози	вологість
Вихідне	3,6	1,6	16,9	38	13	26,9	10
Термобарична	3,42	1,71	17,5	39,9	9,83	17,64	10
Органонольна 60 хв	2,52	1,7	11,9	42,42	10,92	20,54	10
Органонольна 90 хв	1,65	1,6	6,8	42,54	8,19	29,22	10

За результатами дослідження було показано зміни у компонентному складі після різних видів гідролізу. Відмічено, що кількість целюлози збільшується що можна пояснити деградування кристалічності під впливом гідролітичних факторів та розривом зв'язків лігніноцелюлозних, а також геміцелюлозних комплексів. На тлі підвищення цих компонентів, показано зменшення відсотку залишкового лігніну, що те ж можна пояснити руйнування комплексів під впливом факторів попередньої обробки. Показано, що часу гідролізу суттєво впливав на компонентний склад, зменшуючи водорозчинні речовини, які не витримували жорстких умов гідролізу та підвищував відсоток геміцелюлоз ймовірним звільненням з лігнін-геміцелюлозних комплексів, як наслідок відсоток залишкового лігніну зменшувався.

Було проведено ензиматичний гідроліз з використанням сировини за попередньою різною підготовкою та визначено загальне накопичення цукру (рис. 5.21)



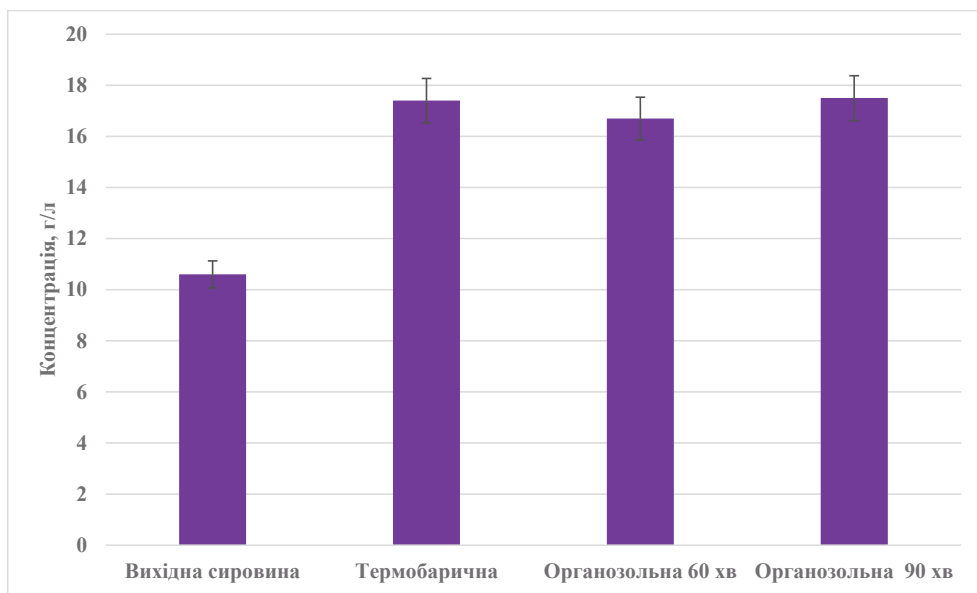


Рис. 5.21. Загальне накопичення цукру після ензиматичного гідролізу сировини за різного виду підготовки.

Виявлено найбільше накопичення цукру було за ензиматичного гідролізу сировини, яка була оброблена термобарично та органозольно протягом 90 хв. Отримані дані свідчать за підвищення доступності субстрату для ензимів за попередньої обробки. Кожен з вище зазначених гідролізів біомаси не зернової частини сорго цукрового сорту Energodar результувався в загальній концентрації цукру 17 г/л у середовищі після ензиматичного оброблення.

Було проведено культивування з використанням органозольної та термобаричної попередньої обробки біомаси сорго та визначення накопичення розчинників (рис. 5. 22).

Показано найбільше накопичення бутанолу (8 г/л) штамом *Clostridium sp.* ІМВ В-7570 у культуральній рідині за використання органозольно обробленої не зернової частини біомаси сорго цукрового сорту Energodar протягом 90 хв.

Було проведено культивування за використання різної попередньої підготовки біомаси сорту Energodar та визначено накопичення розчинників (рис. 5.23).

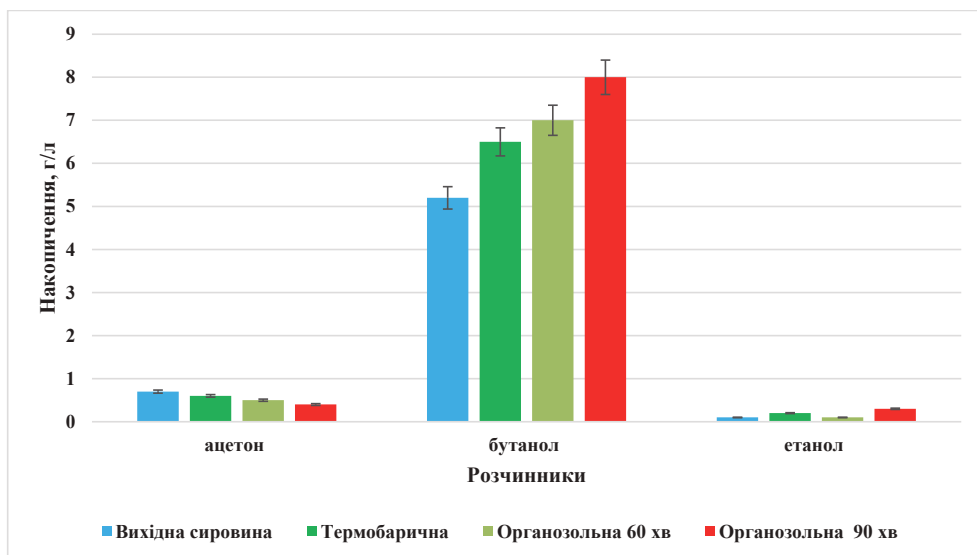


Рис. 5.22. Накопичення розчинників за культивування на сировині з різним обробленням

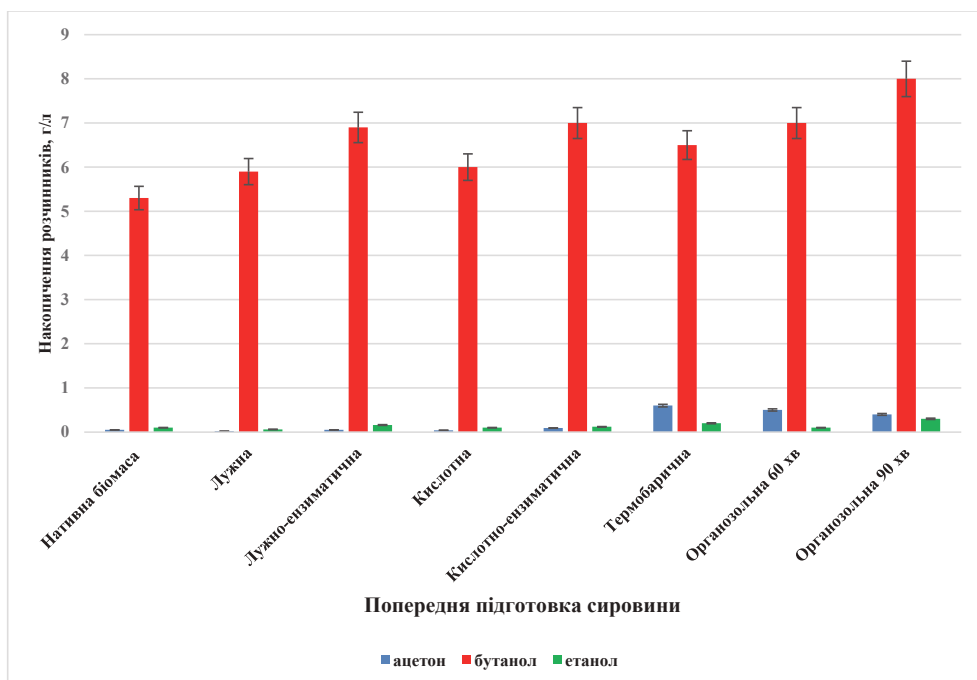


Рис. 5.23. Порівняльне накопичення розчинників за культивування на біомасі сорту Energodar за різної попередньої підготовки

За результатами дослідження показано, що найбільше накопичення бутанолу відбувалося у культуральній рідині за використання органозольної підготовленої не зернової частини біомаси сорго цукрового сорту Energodar. Встановлено, що використання різних видів гідролізу для попереднього оброблення сировини підвищувало накопичення бутанолу.

## Висновки

Проведені дослідження показали, що біомаса, сок та багаса сорго конвертувалась штамми, при цьому накопичення бутанолу залежало від субстрату та його підготовки.

Скринінг штамів продуцентів виявив, що найбільше накопичення бутанолу було за використання штаму *Clostridium sp.* ІМВ В-7570 та подрібненої біомаси сорго (1,5 г/дм<sup>3</sup>) як субстрату, та штаму *Clostridium acetobutylicum* ІМВ В-7407 та соку сорго (8,2 г/л). Виявлено, що оптимізація умов попередньої підготовки сировини підвищувала накопичення бутанолу на 25-50%.

Показана можливість використання біомаси всіх 4 сортозразків сорго для накопичення бутанолу без деградації штамів. Виявлено, що за використання біомаси двох генотипів сорго (Energodar, hybrid AMBR-1) штам-продуцент накопичував найбільше бутанолу (5 г/л).

Визначено, що для біомаси сорго цукрового сортів Energodar та hybrid-720 оптимальною попередньою підготовкою виявилось поєднання кислотного та ензиматичного гідролізів.

Визначено, що для біомаси сорго цукрового сортів hybrid-720 та ST-207 оптимальною попередньою підготовкою виявилось поєднання кислотного та ензиматичного гідролізів.

Оптимізовано склад захисного середовища (%: глюкоза – 10,0; желатина – 10,0; агар – 0,02) для проведення ліофільного висушування культури. Показано, що зберігання зразків ліофілізованих бактерій протягом шести місяців за температури 4 °С не впливало на продуктивність штамів за використання сорго цукрового сорту Energodar.

Показано, що удосконалення технології отримання біобутанолу на основі фізіологічних та біохімічних особливостей штамів дало змогу отримати 8 г/л цільового продукту з 60 г зеленої біомаси сорго сорту Energodar.

## РОЗДІЛ 6.

### МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ З ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ СОРГО ЦУКРОВОГО

---

**Вимоги до кліматичних умов.** Сорго цукрове – теплолюбна культура. Для росту та розвитку потрібно достатньо тепла. У весняний період, коли температура ще нестійка і є загроза приморозків його краще не висівати, це може призвести до загнивання насіння або пошкодження сходів. Оптимальна денна температура повітря для сорго – 20-25 °С, а нічна 12-15 °С. З'явлення сходів залежить від температури ґрунту: за 12-15 °С вони з'являються через 10-14 діб, а при 20 °С – через 5-7 діб. Рослини сорго завдяки низькому транспіраційному коефіцієнту (230-310) та довголанцетним листкам витривалі до посухи та високих температур. •

**Місце у культурі, вибір ділянки, попередники.** Рослини сорго цукрового мають високу екологічну пластичність та забезпечують значну продуктивність при вирощуванні у Лісостепу України. Під посіви сорго, як просапної культури, необхідно виділити ділянки, чисті від бур'янів. Вони добре ростуть на різних типах ґрунтів при поливі та на богарі. Рослини можуть переносити часткову засоленість ґрунту. Сорго цукрове краще сіяти після зернобобових, гречки, картоплі, коренеплодів, післяякісних і післяжнивних культур, але не слід сіяти після кукурудзи чи проса щоб запобігти поширенню однакових хвороб та шкідників. На одному місці його можна вирощувати 3-5 років.

**Обробіток ґрунту:** Система обробітку ґрунту повинна включати технологічні прийоми, щоб забезпечити створення оптимальних умов вирощування сорго цукрового.

Основним завданням передпосівного обробітку є збереження вологи в ґрунті, знищення бур'янів, створення сприятливих умов для проростання насіння та отримання своєчасних сходів .

Основний обробіток ґрунту включає зяблеву оранку на глибину 20-25 см. Слід зазначити, що традиційна система підготовки ґрунту під сорго цілком виправдовує себе. Найбільш поширеною системою обробітку

грунту під сорго є ранньо-осіння оранка. З часом можна боротися з проростками бур'янів (Технологія ..., 2020).

Ранньовесняний обробіток ґрунту проводять для того, щоб як можна довше зберігати вологу, накопичену в ґрунті за зимовий період і знищити бур'яни. Для цього проводять весняне боронування зябу важкими зубчастими боронами. Цю операцію можна проводити агрегатом з вирівнювачами. Після проведення ранньовесняного боронування, поле не культивують до тих пір, поки не з'являться сходи бур'янів. Під посіви рекомендується внесення мінерального добрива (90-120 кг/га NPK) або гною (35-40 т/га).

Перед сівбою сорго цукрового проводиться ранньовесняне боронування з метою закриття вологи. З появою сходів багаторічних бур'янів поле оброблюється гербіцидами. Для вирощування сорго цукрового найбільш ефективними є гербіциди представлені препаратами Прімекстра TZ (4,5 л/га) і Прімекстра Голд (3,5 л/га). За прогрівання ґрунту до температури +14°C здійснюють передпосівну культивуацію на глибину 5-7 см.

**Сівба.** Найкращою глибиною загортання насіння для сорго цукрового є 3-4 см. За посушливих умов глибину можна збільшити до 6 см з обов'язковим коткуванням. Ширина міжрядь становить 45 чи 70 см. Норма висіву – 8-10 кг/га. На 3-7-у добу після сходів необхідно проводити боронування легкими або пружинними боронами для знищення кірки на поверхні ґрунту (закриття вологи) та боротьби зі сходами бур'янів.

У окремих випадках можна проводити рядкову сівбу (15-30 см). На чистих від бур'янів та з високою родючістю ґрунтах найвища урожайність в умовах достатнього зволоження досягається при сівбі рядковим способом та нормою висіву 350-450 тис. схожих зерен на 1 га (11-12 кг/га).

**Догляд за посівами.** Для знищення бур'янів під час вегетації рослин сорго цукрового (фаза - 4-6 листків) посіви можна обприскувати гербіцидом Мікодин у дозі - 0,8 -1,0 кг/га д.р. Можна проводити розпушування міжрядь. У цілях захисту посівів сорго від злакової попелиці використовують інсектициди Бі 58, Шерп та ін.

**Збирання зеленої маси.** Рослини сорго цукрового залежно від генотипу до технічної стиглості досягають у період 100-130 діб. Для

отримання сиропу високої якості сорго цукрове краще збирати від початку викидання волоті до плодоношення. Стебла можна збирати або разом із зерном, або після збирання зерна. Перед використанням стебел на сироп волоті необхідно видалити, висушити і обмолотити. Сироп відмінної якості можна приготувати без видалення листя. Стебла слід подрібнювати через 3-5 діб після підсихання листків. Це сприятиме кращому виробництву сиропу та зменшить його кристалізацію. При урожайності 50-60 т свіжих стебел/га можна отримати 4,5-5,5 т сиропу, що може забезпечити 3200-4000 л вихід етанолу. Побічна продукція після переробки стеблової маси становить 14-16 т/га, яку можна буде використати на біопаливо чи на корм.

**Збирають сорго на зерно** у фазі його повної стиглості прямим комбайнуванням. Оберти барабана не повинні перевищувати 600-700 об./хв. Зазори деки барабана комбайна на вході мають становити 20-22 мм, на виході – 6-8 мм. Обмолочене зерно очищається від рослинних залишків, у разі потреби підсушується (якщо на відкритому повітрі, то шаром не більше 15-20 см) та закладається на зберігання при вологості 14%.

## ЗАКЛЮЧЕННЯ

---

Створено колекцію генотипів *Sorghum saccharatum* (близько 100 зразків). Відібрано найцінніші генотипи як вихідні форми (14 зразків), на основі яких виведено нові сорти ('Енергодар', 'Ботанічний' та Соргодар'). Установлено біолого-технологічні, біохімічні властивості біомаси як енергетичної сировини другого покоління. Визначено продуктивний, енергетичний потенціал рослин та біопалива і оцінено вихід компонентів рідких палив. Оптимізовано елементи технології виробництва фітосировини та високоякісного біопалива на основі нових адаптивних генотипів рослин *Sorghum saccharatum*.

Найвищої висоти рослин *Sorghum saccharatum* під час технічної стиглості досягли форми – f. ETSSTSF-2, f. AMBR-1.1 та сорти – cv. Progres і cv. Energodar. Показано, що великою сировинною продуктивністю відзначилися форми f. ETSSTSF-9, f. AMBR-1 і сорти cv. Botanichnyi та cv. Energodar. Максимальна продуктивність стебел була у форм f. ETSSTSF-2, f. AMBR-3 та сорту cv. Energodar.

Досліджено, що вміст цукрів у фітосировині генотипів сорго в період технічної стиглості коливається від 13 до 16 %. За високим рівнем цукрів у фітомасі відзначилися форма AMBR-3 і сорт Енергодар, а моноцукрів – ф. AMBR-5 та сорт Ботанічний.

Визначено, що вміст ліпідів у фітосировині рослин *S. saccharatum* становить від 2,5-3,0 до 5,0-6,0 % (у окремих генотипів близько 8 %). Вміст ліпідів у насінні становив від 2,27 до 5,30 %. За високим рівнем ліпідів у фітомасі вирізнялися форми RUSBR-4.1 і AMBR-2, у насінні – сорт Енергодар і форма RUSBR-1. Виявлено, що найвищим вмістом білку у надземній масі (9-11 %, а у окремих випадках – від 14 до 21 %) рослин *S. saccharatum* характеризуються форми RUSBR-4.1 та ETSSTSF-2(10).

Установлено, що найвищий рівень урожайності надземної маси (84,7-98,5 т/га), насіння (6,23-6,85 т/га), вихід сухої речовини (35,4-41,18 т/га) та загального цукру (4,48-6,25 т/га) забезпечують сорти Енергодар, Ботанічний та Прогрес. Показано, що в період воскової стиглості рослин *S. saccharatum* найбільшу врожайність стебла (63,1-73,3 т/га) та вихід етанолу (3,53-4,39 т/га) забезпечили сорти Ботанічний, Енергодар та Медове. Загальна вартість етанолу становила від 183,56 до 228,28 тис.грн/га. Великий вихід побічної продукції з стеблових відходів –

твердого біопалива (26,81-32,47 т/га) забезпечили ці ж сорти. Теплоємність біопалива з побічної продукції становила від 3350 до 4151 ккал/кг на абсолютно суху речовину.

Установлено, що всі досліджені сорти *S. saccharatum* забезпечують високий розрахунковий вихід біобутанолу – від 3775 до 4925 кг/га та його загальну вартість – від 430,35 до 561,45 тис.грн/га. Найвищий потенційний вихід біобутанолу та його вартість отримано з урожаю фітосировини сортів Енергодар та Ботанічний.

Проведено дослідження з використання нативної та з попередньою підготовкою біомаси різних сортів сорго цукрового як субстрата для мікробіологічного синтезу біобутанолу другого покоління. Створено ензиматичне середовище, яке містило 60 г/л кожного з чотирьох сортів сорго цукрового та проведено культивуацію штаму-продуценту *Clostridium sp.* ІМВ В-7570. За результатами дослідження показано, що культура зброджує біомасу сорго.

Визначено, що для біомаси сорго цукрового сортів Енергодар, Амбер 1, Alta seeds та St-20 оптимальною попередньою підготовкою було поєднання кислотного та ензиматичного гідролізів. Показано, що оптимізація умов попередньої підготовки сировини підвищувала накопичення бутанолу на 25-50%. Оптимізовано склад захисного середовища (%: глюкоза 10,0; желатин 10,0; агар 0,02) для проведення ліофільного висушування культури. Показано, що зберігання зразків ліофілізованих бактерій протягом шести місяців за температури 4 °С не впливало на продуктивність штаму продуценту.

Удосконалення технології біобутанолу на основі фізіологічних та біохімічних особливостей штамів дало змогу отримати 8 г/л цільового продукту з 60 г зеленої біомаси сорго цукрового сорту Енергодар.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

---

Аврамчук А. Міскантус, буряк та сорго як біоенергетичні культури. Superagronom.com. 2018. URL: <https://superagronom.com/blog/260-miskantus-tsukroviy-buryak-ta-sorgo-yak-bioenergetichni-kulturi>

Алабушев А.В., Герасименко Г.П. Сорго – культура засушливой степи. *Кукуруза и сорго*. 1993. №6. С. 18–19.

Алабушев А.В., Шишкин Н.В., Герасименко Г.П., Герасименко Т.В. Различные способы уборки сахарного сорго. *Кукуруза и сорго*. 1996. №6. С. 12–13.

Артюшенко З.Т. Атлас по описательной морфологии высших растений: Семя. Наука, 1990. 203 с.

Биологический энциклопедический словарь / Под ред. М.С. Гилярова. 1989. С. 733.

Биоморфология растений: иллюстрированный словарь: Учебное пособие / П. Ю. Жмылев, Ю. Е. Алексеев, Е. А. Карпухина и др.; под ред. В.Н. Павлова. 2004. 256 с.

Біологічні ресурси і технології виробництва біопалива / Я.Б. Блюм, Г.Г. Гелетуца, ...Д.Б. Рахметов [та ін.]. Київ : Аграр Медіа Груп, 2010. 408 с.

Вешняков В.А., Хабаров Ю. Г., Камакина Н. Д. Сравнение методов определения редуцирующих веществ: метод Бертрана, эбулиостатический и фотометрический методы. *Химия растительного сырья*. 2008. №4. С. 47–50.

Ганженко О.М., Герасименко Л.А., Иванова О.Г., Копчук К.М. Енергетична продуктивність цукрового сорго залежно від елементів технології вирощування. *Наукові праці Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. 2016. Вип. 24. С. 11–18.

Ганженко О. М. Теоретичні та агробіологічні основи формування продуктивності цукроносних культур для виробництва біопалива в Лісостепу України. Автореф. дисер.... доктора с.-г.н. за спеціальністю 06.01.09 “Рослинництво”. Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН, Київ. 2021. 44 с.

Григоренко Н. О. Сорго сахарное и перспективное направление его использования. *Вестник пищевой промышленности “Сахарная отрасль”*. 2016. № 5. С. 5–7

Григоров М.С., Кенжегалиев Г.Г. Продуктивность сахарного сорго *Кукуруза и сорго*. 1990. №1. С. 37–39.

Грицаєнко З. М., Грицаєнко А. О., Карпенко В. П. Методи біологічних та агрохімічних досліджень рослин і ґрунтів. Київ : Нічлава, 2003. 320 с. URL: <http://lib.udau.edu.ua>

Дремлюк Г.К. Сорго на изломе эпох: приемы и методы селекции: монография. СГП.-НЦ СН. Одесса, 2008. 244 с.

Енергетичні та сировинні рослини : навчальний посібник / С.М. Каленська, Д.Б. Рахметов, Н.В. Новітська та інш. Київ : НУБіП, 2023. 274 с.

Інтродукція нових корисних рослин в Україні: монографія / Д.Б. Рахметов, О.М. Вергун, С.М. Ковтун-Водяницька та ін. Київ : Ліра-К, 2020. 338 с.

КНР: биоэтанол из сорго. URL://<http://freeenergyengines.ru/news/кнр-биоэтанол-из-сорго.html>

Ковальчук В.П., Григоренко Н.О., Костенко О.І. Цукрове сорго – цукроносна сировина та потенційне джерело енергії. *Цукрові буряки*. №6. 2009. С. 6–7.

Колекційний фонд енергетичних, ароматичних та інших корисних рослин НБС імені М.М.Гришка НАН України / Д.Б. Рахметов, С.М. Ковтун-Водяницька, О.А. Корабльова та ін. Київ : ФОП Паливода В.Д., 2020. 208 с.

Крищенко В. П. Методы оценки качества растительной продукции. Колос, 1983. 192 с.

Курило В.Л., Григоренко Н.О., Марчук О.О., Фуніна І.Р. Продуктивність сорго цукрового (*Sorghum saccharatum* (L.) Pers.) залежно від сортових особливостей та різної густоти стояння рослин. *Сортовивчення та охорона прав на сорти рослин*. 2013. № 3. С. 8–13.

Курило В., Ганженко А., Герасименко Л. Энергетическая ценность сахарного сорго в зависимости от сроков сева и глубины заделки семян. MOTROL. *Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2013. Vol.15, N 4. С. 55–61.

Лакин Г. Ф. Биометрия. Высш. школа, 1990. 352 с.

Олійнічук С.Т., Левандовський Л.В., Шевченко В.І., Вакуленко В.О., Ткаченко А.Ф. Технологічний регламент виробництва етилового спирту з крохмалевмісної сировини. Київ : ТОВ “Матриця”, 2000. 142 с.

Основи технології вирощування сорго. 2019. URL: <https://bagro.kz/publikacii-/tehnologiya-vozdelyvaniya-sorgo>.)

Рахметов Д. Б., Ковтун-Водяницька С. М. Фенологія трав'яних рослин за інтродукційних досліджень: посібник. Київ : Видавництво Ліра-К, 2021. 74 с.

Рахметов Д. Б. Теоретичні та прикладні аспекти інтродукції рослин в Україні: монографія. Київ : АграрМедіаГруп, 2011. 398 с.

Рахметов Д.Б. Генетичні ресурси фітоенергетичних інтродуцентів в Україні. *Інтродукція рослин*. 2007. № 3. С. 3–10.

Рахметов Д.Б. Нетрадиційні види рослин для біоенергетики. 2018. 103 с. URL : <https://agrobionet.uniag.sk/flipbkTB03>

Середа В. І. Підбір вихідного матеріалу для селекції сорго цукрового. Дисер.... кандидата с.-г.н. (доктора філософії) за спеціальністю 06.01.05 “селекція і насінництво”. Державна установа Інститут зернових культур НААН України, Дніпро, 2021.

Система використання біоресурсів у новітніх біотехнологіях отримання альтернативних палив / Блюм Я. Б., Григорюк І. П.,.... Рахметов Д. Б. та ін. Київ : Аграр Медіа Груп, 2014. 360 с.

Сорго як сировина для біопалива. 2011. URL : <http://regnum./news/1109391.html>

Стійкість інтродукованих та рідкісних рослин за умов кліматичних змін в Україні : монографія / Д.Б. Рахметов, Н.В. Заіменко, М.Б. Гапоненко та ін. Київ : Видавництво Ліра-К. 2023. 326 с.

Сторожик Л. І., Музика О. В. Фотосинтетичний потенціал посівів сорго цукрового в умовах Центрального Лісостепу України. *Наукові праці інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. 2017. № 25. С.79–85. DOI: 10.47414/np.25.2017.216870

Тігунова О.О., Рахметов Д.Б., Андріяш Г.С., Шульга С.М. Вплив температури зберігання на накопичення бутанолу ліофілізованим штамом-продуцентом. “Відновлювальна енергетика та енергоефективність у XXI столітті” : матер. XXII міжнар. наук.-практ. конф. Київ, 2021. С. 913–915.

Тлеу А.Ж., Умарова А.А., Киршибаев Е.А. Токсическое действие NaCl на биопараметрические показатели некоторых сортов сахарного сорго (*Sorgo saccharatum* Pers.). *Вестник Казахского национального женского педагогического университета*. 2019. Т. 77(1). С.19–24.

Топливная альтернатива в Украине и в мире. 2014. URL : <http://zerno-ua.com/?p=1457>

Фундаментальні та прикладні аспекти інтродукції і збереження рослин у Національному ботанічному саду імені М.М.Гришка НАН

України : монографія / Н.В. Заїменко, Д.Б. Рахметов, М.Б. Гапоненко, М.І. Шумик та ін. Київ : Видавництво Ліра-К, 2023. 540 с.

Харгелія Д.М. Технологія оздоровчого ферментованого напою на основі цукрового сорго. Дис. на здобуття ступ. канд. техн. наук за спеціальністю 05.18.05 Технологія цукристих речовин та продуктів бродіння. Київ, 2016. 223 с.

Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського. 2023. URL : [http://cgo-sreznevskiy.kiev.ua/index.php?fn=k\\_klimat&f=kyiv](http://cgo-sreznevskiy.kiev.ua/index.php?fn=k_klimat&f=kyiv)

Шепель М. Соргові культури просяться на лани України. *Пропозиція*. 2014. URL : <http://www.propozitsiya.com/?page=149&itemid=1440&number=45>)

Шульга С.М., Тігунова О. О., Блюм Я. Б. Лігноцелюлоза як альтернативна сировина для одержання біобутанолу. *Biotechnologia Acta*. 2013. 6(2). С.9–20. DOI: 10.15407/biotech6.03.009

Технологія вирощування сорго на півдні України. 2020. URL : <https://zelenoe-pole.com.ua/ua/a409068-tehnologiya-vozdelyvaniya-sorgo.html>, 2020)

Almodares A., Darani Mostafafi S.M. Effects of planting date and time of nitrogen application on yield and sugar content of sweet sorghum. *Journal of Environmental Biology*. 2006. Vol. 27(3). P. 601–605.

Almodares A., Hadi M.R. Production of bioethanol from sweet sorghum: a review. *African Journal of Agricultural Research*. 2009. Vol. 4(9). P. 772–780.

Anami S.E., Zhang L.M., Xia Y., Zhang Y.M., Liu Z.Q., Jing, H.C. Sweet sorghum ideotypes: genetic improvement of the biofuel syndrome. *Food Energy Secure*. 2015. Vol. 4. P.159–177.

Arora R., Manisseri C., Li Ch., Ong M.D., Scheller H.V., Vogel K., Simmons B., Singh S. Monitoring and analyzing process streams towards understanding ionic liquid pretreatment of switchgrass (*Panicum virgatum L.*). *BioEnergy Research*. 2010. Vol. 3. P.134–145.

Ayub M., Khalid M., Tariq M., Elahi M., Nadeem M.A. Comparison of sorghum genotypes for forage production and quality. *The Journal of Animal and Plant Sciences*. 2012. Vol. 22(3). P. 733–737.

Ayub M., Nadeem M.A., Tanveer A., Husnain A. Effect of different levels of nitrogen and harvesting times on the growth, yield and quality of sorghum fodder. *Asian Journal of Plant Sciences*. 2002. Vol. 1(4). P. 304–307.

Baiseitova G., Sarsenbayev B., Kirshibayev E., Kamunur M. Influence of salinity (NaCl) on the pigment content of some sweet sorghum varieties. *BIO*

*Web of Conferences*. 2018. Vol. 11(3). P. 2–4. DOI: 10.1051/bioconf/20181100003

Baiseitova G., Moraru G., Sarsenbayev B., Kirshibayev E., Kenenbayev S. Biological characteristics and productivity of sweet sorghum varieties in the arid conditions of Southeastern Kazakhstan. *OnLine Journal of Biological Sciences*. 2021. Vol. 21(2). P. 245–253. DOI: 10.3844/ojbsci.2021.245.252

Bals B., Rogers C., Jin M., Balan V., Dale B. Evaluation of ammonia fibre expansion (AFEX) pretreatment for enzymatic hydrolysis of switchgrass harvested in different seasons and locations. *Biotechnol. Biofuels*. 2010. Vol. 3. P.101–123.

Bao T., Jiang W., Ahmad Q., Yang S. 13-Consolidated bioprocessing for ethanol and butanol production from lignocellulosic biomass: Recent advances in strain and process engineering. *A-Z of Biorefinery*. 2022. P. 473–506. DOI: 10.1016/B978-0-12-819248-1.00009-9

Batog J., Frankowski J., Wawro A., Łack A. Bioethanol production from biomass of selected sorghum varieties cultivated as main and second crop. *Energies*. 2020. Vol. 13. P. 62–91. DOI: 10.3390/en13236291

Benito-Vaquerizo S., Diender M., Olm I., dos Santos V., Schaap P., Sousa D., Suarez-Diez M. Modeling a co-culture of *Clostridium autoethanogenum* and *Clostridium kluyveri* to increase syngas conversion to medium-chain fatty-acids. *Computational and Structural Biotechnology Journal*. 2020. Vol. 18. P. 3255–3266. DOI: 10.1016/j.csbj.2020.10.003

Bihmidine S., Baker F., Hoffner C., Braun D. Sucrose accumulation in sweet sorghum stems occurs by apoplasmic phloem unloading and does not involve differential sucrose transporter expression. *BMC Plant Biology*. 2015. Vol. 15. P. 1–23.

Bobokulov N.A., Popova V.V., Kh R.B. Nutritional and energy value of non-traditional forage plants for cultivation in the arid zone of Uzbekistan. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*. 2021. Vol. 27(1). P.237–243. DOI: 10.52155/ijpsat.v27.1.3210

Bórawski, P., Bełdycka-Bórawska, A., Szymańska, E. J., Jankowski, K. J., Dubis, B., Dunn, J. W. Development of renewable energy sources market and biofuels in The European Union. *Journal of cleaner production*. 2019. Vol. 228. P. 467–484. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.242

Brunt J., van Vliet A.H.M., Carter A.T., Stringer S.C., Amar C., Grant K.A., Godbole G., Peck M.W. Diversity of the genomes and neurotoxins of strains of *Clostridium botulinum* Group I and *Clostridium*

*sporogenes* associated with foodborne, infant and wound botulism. *Toxins*. 2020. Vol. 12(9). P. 586. DOI: 10.3390/toxins12090586

Buckel W. Energy Conservation in Fermentations of Anaerobic Bacteria. *Frontiers in Microbiology*. 2021. Vol. 12(703525). P. 1–16. DOI: 10.3389/fmicb.2021.703525

Cai S., Kumar R., Singh B.R. Clostridial neurotoxins: structure, function and implications to other bacterial toxins. *Microorganisms*. 2021. Vol. 9(11), 2206. P. 1–30. DOI: 10.3390/microorganisms9112206

Cao L., Gao Y., Wang X.-Zh., Shu G.-Y., Hu Y.-N., Xie Z.-P., Cui W., Guo X.-P., Zhou X. A Series of efficient umbrella modeling strategies to track irradiation-mutation strains improving butyric acid production from the pre-development earlier stage point of view. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2021. Vol. 9. DOI: 10.3389/fbioe.2021.609345

Cateto C., Hu G., Ragauskas A. Enzymatic hydrolysis of organosolv Kanlow switchgrass and its impact on cellulose crystallinity and degree of polymerization. *Energy and Environmental Science*. 2011. Vol. 4. P.1516–1521.

Coclea D., Nita S., Mateas I.M., Albai A., Popa D., Borta L. Potential production of leaves and panicles stems from several varieties and hybrids of sorghum (*Sorghum saccharatum*) under the influence of fertilization. *Research Journal of Agricultural Science*. 2014. Vol. 46(3). P. 11–13.

Csefalvay E., Bakasci Z.. Chemical-free processing of sweet sorghum juice of cultivar Sucrosorgho 506. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*. 2019. Vol. 63(1). P. 36–50. DOI: 10.3311/PPch.12056

Derya Y., Hatice H., Celal Y., İsmail D. Genetic variability, heritability, and genetic advance for ethanol yield and yield components in sweet sorghum (*Sorghum bicolor* var. *saccharatum* (L.)). *International Journal of Innovative Approaches in Agricultural*. 2020. Vol. 4. C. 21–33.

Draghici I., Draghici R., Diaconu A., Croitoru M., Paraschiv A., Dima M., Ciuciuc E., Ciuciuc D. Results on bioenergetic potential of some sweet sorghum hybrids cultivated under psamosols conditions in Southern Oltenia. *E3S Web of Conference*. 2019. Vol. 112, 03014. DOI: 10.1051/e3sconf/201911203014

Du Y., Zou W., Zhang K., Ye G., Yang J. Advances and applications of *Clostridium* Co-culture systems in biotechnology. *Frontiers in Microbiology*. 2020. Vol. 11. DOI: 10.3389/fmicb.2020.560223

El-Abed M.A., Osman M.S., Okaz A.M., Amer E.A. Studies on breeding for improving sweet sorghum. *Reading*. 2010. Vol. 10. P.100.

Elseed Fadel A.M.A., Eldaim Nor N.I., Amasaib E.O. Chemical composition and in situ dry matter degradability of stover fractions of five sorghum varieties. *Journal of Applied Sciences Research*. 2007. Vol. 3(10). 1141–1145.

Enchev S. Productivity and feed quality of Sudan grass (*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf.) and sweet sorghum forms. *Agricultural Science & Technology*. 2021. Vol. 13(1). P. 1313–8820.

Erdurmus C., Yucel C., Cinar O., Yegin A., Oten M. Bioethanol and sugar yields of sweet sorghum. *The International Journal of Engineering and Science*. 2018. Vol. 7. P. 21–26. DOI: 10.9790/1813-0711022126

Fagundes T.G., Lombardi G.M., Lopes A.C., Fernandes Filho C.C., Lopes L.S., da Costa Parrella R.A., Nunes J.A.R. Characterization of sweet sorghum genotypes based on agro-industrial performance and fermentation potential. *Sugar Tech*. 2021. P.1–10. DOI: 10.1007/s12355-021-00974-8

Fakrudin R. B., Kavil S. P., Girma Y. Molecular mapping of genomic regions harbouring QTLs for root and yield traits in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2013. Vol. 19. P. 409–419. DOI: 10.1007/s12298-013-0188-0

Gibbs D. F. The rise and fall (... and rise?) of acetone/butanol fermentations. *Trends Biotechnol*. 1983. Vol. 1. P. 12–15. DOI: 10.1016/0167-7799(83)90020-3

Gleadow R.M., McKinley B.A., Blomstedt C.K., Lamb A.C., Møller B. L., Mullet J.E. Regulation of dhurrin pathway gene expression during *Sorghum bicolor* development. *Planta*. 2021. P. 254. DOI: 10.1007/ s00425-021-03774-2

Gonzalez-Garcia R.A., McCubbin T., Navone L., Stowers C., Nielsen L.K., Marcellin E. Microbial propionic acid production. *Fermentation*. 2017. Vol. 3(2), P.1–21. DOI: 10.3390/fermentation3020021

Hasan R., Aktar N., Kabir S., Honi U., Halim A., Islam R., Sarker M., Haque M., Alam M., Islam M. Pectinolytic bacterial consortia reduce jute retting period and improve fibre quality. *Sci Rep*. 2020. Vol. 10. P.51–74. DOI: 10.1038/s41598-020-61898-z

Hawrot-Paw M., Koniuszy A., Zając G., Szyszlak-Bargłowicz J. Ecotoxicity of soil contaminated with diesel fuel and biodiesel. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10(1). P.1–9. DOI: 10.1038/s41598-020-73469-3

Hu Z., Wang Y., Wen Z. Alkali (NaOH) pretreatment of switchgrass by radiofrequency-based dielectric heating *Appl. Biochem. Biotechnol*. 2008. Vol. 148. P. 71–81.

Hutsol T., Glowacki S., Mudryk K., Yermakov S., Kucher O., Knapczyk A., Prokopchuk L. Agrobiomass of Ukraine – energy potential of Central and Eastern Europe (Engineering, Technology, Innovation, Economics). Monograph (International Vysegrad Fund). Lomza : Libra-Print, 2021. 136 p. DOI: 10.22630/SGGW.IIM.9788382370201

Iglinski B., Piechota G., Buczkowski R. Development of biomass in polish energy sector: an overview. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2015. Vol. 17(2). P. 317–329. DOI: 10.1007/s10098-014-0820-x

Jankowski K.J., Dubis B., Sokólski M.M., Załuski D., Borawski P., Szempliński W. Productivity and energy balance of maize and sorghum grown for biogas in a large-area farm in Poland: an 11-year field experiment. *Industrial Crops and Products*. 2020. Vol. 148. P. 112–326. DOI: 10.1016/j.indcrop. 2020.112326

Jankowski K.J., Dubis B., Budzyński W.S., Bórawski P., Bułkowska K. Energy efficiency of crops grown for biogas production in a large-scale farm in Poland. *Energy*. 2016. Vol. 109. P. 277–286. DOI: 10.1016/j.energy.2016.04.087

Kawahigashi H., Kasuga S., Okuizumi H., Hiradate S., Yonemaru J. Evaluation of Brix and sugar content in stem juice from sorghum varieties. *Grassland Science*. 2013. Vol. 59. P. 11–19. DOI: 10.1111/grs.12006

Kharytonov M.M., Babenko M.G., Kozechko V.I., Mytsyk O.O., Martynova N.V., Hamandii V.L. Sweet sorghum raw material production on reclaimed lands. *Agrology* . 2021. Vol. 4(3). P.77–84

Khidr, Y., Mekuriaw, S., Amer, E., Hegazy, A. Performance of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L.) Germplasm resources for their industrial traits under egyptian conditions. *Journal of Productivity and Development*. 2021. Vol. 26(1). P. 119–137. DOI: 10.21608/JPD.2021.149752

Kim H.U. Lipid metabolism in plants. *Plants*. 2020. Vol. 9. Vol. 871. DOI: 10.3390/plants9070871

Kozłowski S., Zielewicz W., Potkanski A., Cieslak A., Szumacher-Strabel M. Effect of chemical composition of sugar sorghum and the cultivation technology on its utilization for silage production. *Acta Agronomica Hungarica*. 2009. Vol. 57(1). P. 67–78. DOI: 10.1556/AAgr.57.2009.1.8

Kumar C.G., Fatima A., Rao P.S., Reddy B.V.S., Rathore A., Rao R.N., Khalid S., Kumar A.A., Kamal A.A. Characterization of improved sweet sorghum genotypes for biochemical parameters, sugar yield and its attributes at different phenological stages. *Sugar Technology*. 2010. Vol. 13. P. 322–328. DOI: 10.1007/s12355-010-0045-1



Kumar S., Rawat C.R., Dhar Sh., Rai S.K. Dry-matter accumulation, nutrient uptake and changes in soil-fertility status as influenced by different organic and inorganic sources of nutrients to forage sorghum (*Sorghum bicolor*). *Indian Journal of Agricultural Sciences*. 2005. Vol. 75(6). P. 340–342.

Laser M., Schulman D., Allen S. Lichwa J., Antal M. A comparison of liquid hot water and steam pretreatments of sugar cane bagasse for bioconversion to ethanol. *Bioresource technology*. 2003. Vol. 81. P.33-44. DOI: 10.1016/S0960-8524(01)00103-1

Lawson C.E., Nuijten G.H., de Graaf R.M., Jacobson T.B., Pabst M., Stevenson D. M., Jetten M.S., Noguera D. R., McMahon K.D., Amador-Noguez D., Lucker S. Autotrophic and mixotrophic metabolism of an anammox bacterium revealed by in vivo  $^{13}\text{C}$  and  $^2\text{H}$  metabolic network mapping. *ISME J*. 2021. Vol. 15. P. 673–687. DOI: 10.1038/s41396-020-00805-w

Lee S.Y., Park J.H., et.al. Fermentative Butanol Production by *Clostridia*. *Biotechnology and Bioengineering*. 2008. Vol. 101(2). P. 209–228. DOI: 10.002/bit.2203

Lema M., Felix A., Salako S., Bishnoi U. Nutrient content and in vitro dry matter digestibility of silages made from various grain sorghum and sweet sorghum cultivars. *Journal of Sustainable Agriculture*. 2000. Vol. 17(1). P. 55–70. DOI: 10.1300/J064v17n01\_06

Lenz T. G., Moreira A. R. Economic evaluation of the acetone-butanol fermentation. *Industrial and Engineering Chemistry Product Resesearch and Development*. 1980. Vol. 19. P.478–483. DOI: 10.1021/i360076a002

Li C., Knierim B. et.al. Comparison of dilute acid and ionic liquid pretreatment of switchgrass: biomass recalcitrance, delignification and enzymatic saccharification. *Bioresourse Technology*. 2010. Vol. 101. P. 4900–4906. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.10.066

Liberato V., Benevenuti C., Coelho F., Botelho A., Amaral P., Pereira N.Jr., Ferreira T. *Clostridium* sp. as bio-catalyst for fuels and chemicals production in a biorefinery context. *Catalysts*. 2019. Vol. 9(11). P. 1–37. DOI: 10.3390/catal9110962

Li-Min Zhang, Chuan-Yuan Leng, Hong Luo, Xiao-Yuan Wu, Zhi-Quan Liu, Yu-Miao Zhang, Hong Zhang, Yan Xia, Li Shang, Chun-Ming Liu, Dong-Yun Hao, Yi-Hua Zhou, Cheng-Cai Chu, Hong-Wei Cai, and Hai-Chun Jing. Sweet sorghum originated through selection of dry, a plant-specific NAC

transcription factor gene. *The Plant Cell*. 2018. Vol. 30. P. 2286–2307. DOI: 10.1105/tpc.18.00313

Lipińska A., Wyszowska J., Kucharski J. Diversity of organotrophic bacteria, activity of dehydrogenases and urease as well as seed germination and root growth *Lepidium sativum*, *Sorghum saccharatum* and *Sinapis alba* under the influence of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environmental Science and Pollution Research*. 2015. Vol. 22(23). P.18519–18530.

Liu Y.L., Wang L.H., Li J.Q., Zhan Q.W., Zhang Q., Li J.F. and Fan F.F. QTL mapping of forage yield and forage yield component traits in *Sorghum bicolor* x *S. sudanense*. *Genetic and Molecular Research*. 2015. Vol. 14(2). P. 3854–3861. DOI: 10.4238/2015.April.23.14

Lyubun Y.V., Kosterin P.V., Zakharova E.A., Shcherbakov A.A., Fedorov E.E. Arsenic-contaminated soils phytotoxicity studies with sunflower and sorghum. *Journal of Soils and Sediments*. 2003. Vol. 2(3). P. 143–147.

Mago L. The costs of sweet sorghum (*Sorghum vulgare saccharatum*) production, according to the level of the farm's mechanization. *Poljoprivedna Tehnika*. 2010. Vol. 4. P. 71–79.

Mahapatra A., Ekefre D., Pattanaik N., Jena U., Williams A., Latimore M. Thermal properties of sweet sorghum bagasse as a function of moisture content. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2017. Vol. 19. N 4. P. 108–113.

Mahtur S., Umakanth A., Tonapi V., Sharma R., Sharma M. Sweet sorghum as biofuel feedstock: recent advances and available resources. *Biotechnology for Biofuels*. 2017. Vol. 10. 146. DOI: 10.1186/s13068-017-0834-9

Marks-Bielska R., Bielski S., Novikova A., Romaneckas K. Straw stocks as a source of renewable energy. A case study of a district in Poland. *Sustainability*. 2019. Vol. 11(17). P. 4714. DOI: 10.3390/su11174714

Meramo-Hurtado S.I., González-Delgado Á.D., Rehmann L., Quiñones-Bolaños E., Mehrvar M. Comparison of biobutanol production pathways via acetone–butanol–ethanol fermentation using a sustainability exergy-based metric. *ACS Omega*. 2020. Vol. 5 (30). P. 18710–18730. DOI: 10.1021/acsomega.0c01656

Midilli A., Dincer I., Ay M. Green energy strategies for sustainable development. *Energy policy*. 2006. Vol. 34(18). P. 3623–3633. DOI: 10.1016/j.enpol.2005.08.003

Mitchell W. L. Physiology of carbohydrate to solvent conversion by clostridia. *Apply Microbiology and Physiology*. 1998. Vol. 39. P. 31–130.

Moon H.G., Jang Y.-S., Cho Ch., Lee J., Binkley R., Lee S.Y. One hundred years of clostridial butanol fermentation. *FEMS Microbiology Letters*. 2016. Vol. 363(3). P. 1–15. DOI: 10.1093/femsle/fnw001

Mossi I., Adjou E., Gbauidi B., Dossa P., Sohounhloue D. Valorization of extracts from sorghum stems (*Sorghum saccharatum* L.) by alcoholic bioconversion. *International Journal of Chemical Studies*. 2017. Vol. 5(6). P. 1231–1234.

Mossi I., Adjou E.S., Dossa P.A., Nonviho G., Conforte Adda M.M., Yehouenou B.B. and D. Sohounhloue D.C.K. Production of bioethanol from stems of *Sorghum saccharatum* monitoring kinetic parameters of fermentation. *Journal of Chemical Engineering and Materials Science*. 2018. Vol. 9(2). P. 9–16. DOI: 10.5897/JCEMS2018.0319.

Munteanu L., Tabără V. Production potential of raw juice mellitus of sorghum (*Sorghum bicolor* var. *saccharatum*) under the influence of hybrid and fertilization under the conditions of Carasseverin County Răcășdia. *Research Journal of Agricultural Science*. 2011. Vol. 43(4). P. 119–123.

Nawab S., Wang N., Ma X., Huo Y.-X. Genetic engineering of non-native hosts for 1-butanol production and its challenges: a review. *Microbial Cell Factories*. 2020. Vol. 19(79). P. 1–16. DOI: 10.1186/s12934-020-01337-w

Nenciu F., Vladut V. Studies on the perspectives of replacing the classic energy plants with Jerusalem artichoke and Sweet Sorghum, analyzing the impact on the conservation of ecosystems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 635(1). P. 102–120.

Oktem A., Oktem A.G, Avcioglu E. Determination of yield and biofuel potential of some early sweet sorghum (*Sorghum bicolor* var. *saccharatum* (L.) Mohlenbr.) genotypes. IX International Scientific Agriculture Symposium-Agrosym 2018, Jahorina, 04-07 October, Bosnia and Herzegovina. P.753–758.

Oktem A.G., Oktem A., Tas T., Yucel C. Bio-Fuel Potential of Some Sweet Sorghum Genotypes (*Sorghum bicolor* (L.) Moench ssp. *Saccharatum*). *Journal of Energy Research and Reviews*, 2020. Vol. 6(4). P. 15–23. DOI: 10.9734/jenrr/2020/v6i430174

Oktem A., Yucel C., Oktem A.G. Assessment of biochemical forage quality of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench ssp. *saccharatum*). *Asian Journal of Chemical Sciences*. 2021. Vol. 9(3). P. 1–9. DOI: 10.9734/AJOCS/2021/v9i319071

Petitdemange H., Desborders J., Berthelin J., Gay R. Conversion enzymatique du n-butanol chez *Clostridium acetobutylicum*. C.R. Acad. Sci. Ser. URL: [https://doi: 1968.266](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(00)00172-2). P. 1722–1774.

Podkowka Z., Podkowka L. Chemical composition and quality of sweet sorghum and maize silage. *Journal of Central European Agriculture*. 2011. Vol. 12(2). P. 294–303. DOI: 10.5513/JCEA01/13.3.915

Poehlein A., Solano J.D.M., Flitsch S.K., Kabben P., Winzer K., Reid S.J., Jones D.T., Green E., Minton N. P., Daniel R., Durre P. Microbial solvent formation revisited by comparative genome analysis. *Biotechnol Biofuels*. 2017. Vol. 10 (58). P. 1–15. DOI: 10.1186/s13068-017-0742-z

Popescu, A., Dinu, T.A., Stoian, E. Sorghum-an important cereal in the world, in the European Union and Romania. *Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development*. 2018. Vol. 18(4). P. 271–284.

Rakhmetov D.B., Vergun O.M., Blum Ya.B., Rakhmetova S.O., Fishchenko V.V. Biochemical composition of plant raw material of sweet sorghum (*Sorghum saccharatum* (L.) Moench). *Plant Introduction*. 2018. Vol. 79. P. 83–90. DOI:10.5281/zenodo.2278755

Rakhmetova S.O., Yemets A.I., Vergun O.M., Bondarchuk O.P., Shymanska O.V., Blume R.Ya., Tsygankov S.P., Blume Ya.B., Rakhmetov D.B. Ethanol production potential of sweet sorghum in North and Central Ukraine. *The Open Agriculture Journal*. 2020. Vol. 14. P. 321–338. DOI: 10.2174/1874331502014010321

Rio L.F.D., Chandra R.P., Saddler J.N. The ease of enzymatic hydrolysis of organosolv-pretreated softwoods. *Bioresource Technology*. 2013. 107. P. 235–242.

Rivera-Corona J.L., Rodríguez-González F., Rendón-Villalobos R., García-Hernández E., Solorza-Feria J. Thermal, structural and rheological properties of sorghum starch with cactus mucilage addition. *LWT – Food Science and Technology*. 2014. Vol. 59(2). P. 806–813. DOI: 10.1016/j.lwt.2014.06.011

Ross D. The acetone-butanol fermentation. *Progress in Industrial Microbiology*. 1961. Vol. 3. P. 73–85.

Sannigrahi P., Miller S., Ragauskas A.J. Effects of organosolv pretreatment and enzymatic hydrolysis on cellulose structure and crystallinity in Loblolly pine. *Carbohydrate Research*. 2010. Vol. 345. P. 965–970. DOI: 10.1016/j.carres.2010.03.010

Sapireddy V., Katuri K.P., Muhammad A., Saikaly P.E. Competition of two highly specialized and efficient acetoclastic electroactive bacteria for acetate in biofilm anode of microbial electrolysis cell. *Biofilms Microbiomes*. 2021. Vol. 7(47). DOI: 10.1038/s41522-021-00218-3

Sassner P., Galbe M., Zacchi G. Steam pretreatment of *Salix* with and without SO<sub>2</sub> impregnation for production of bioethanol. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2005. Vol. 124. P.1101–1117.

Sassner P., Maartensson C.-G., Galbe M., Zacchi G. Steam pretreatment of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-impregnated *Salix* for the production of bioethanol. *Bioresour. Technol.* 2008. Vol. 99. P.137–145.

Schmer M.R., Vogel K.P., Varvel G.E., Follett R.F., Mitchell R.B., Jin V.L. Energy potential and greenhouse gas emission from bioenergy cropping systems on marginally productive cropland. *PLoS One*. 2014. Vol. 9(3). P. 1–8.

Shaw D.R., Ali M., Katuri K.P., Gralnick J.A., Reimann J., Mesman R., van Niftrik L., Jetten M.S.M., Saikaly P.E. Extracellular electron transfer-dependent anaerobic oxidation of ammonium by anammox bacteria. *Nature Communications*. 2020. Vol. 11(2058). P. 1–13. DOI: 10.1038/s41467-020-16016-y

Shehzad T., Iwata H., Okuno K. Genome-wide association mapping of quantitative traits in sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) by using multiple models. *Breeding Science*. 2009. 59. P. 217–227.

Shehzad T. and Okuno K. Diversity assessment of sorghum germplasm and its utilization in genetic analysis of quantitative traits – a review. *Australian Journal of Crop Science*. 2014. Vol. 8(6). P. 937–944.

Stevens G., R. Holou D. Dunn, Wrathier A. Switchgrass and sweet sorghum fertilization for bioenergy feedstocks. Proc. Southern Plant Nutrition Management Conf. 6-7 Oct. 2009. P. 38–45.

Stolarski M.J., Niksa D., Krzyżaniak M., Tworkowski J., Szczukowski S. Willow productivity from small-and large-scale experimental plantations in Poland from 2000 to 2017. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 101. P. 461–475. DOI: 10.1016/j.rser.2018.11.034

Stolarski M.J., Śnieg M., Krzyżaniak M., Tworkowski J., Szczukowski S. Short rotation coppices, grasses and other herbaceous crops: Productivity and yield energy value versus 26 genotypes. *Biomass and Bioenergy*. 2018. Vol. 119. P. 109–120. DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.09.014

Sun Y., Cheng J. Dilute acid pretreatment of rye straw and bermudagrass for ethanol production. *Bioresour. Technol.* 2005. Vol. 96. P.1599–1606. DOI: 10.1016/j.biortech.2004.13.022.

Tang C., Li S., Li M. and Xie G. Bioethanol potential of energy sorghum grown on marginal and arable lands. *Plant Science*. 2018. Vol. 9. DOI: 10.3389/fpls.2018.00440

Therrien J.B., Artz J.H., Poudel S., Hamilton T.L., Liu Zh., Noone S.M., Adams M.W.W., King P.W., Bryant D.A., Boyd E.S., Peters J.W. The Physiological functions and structural determinants of catalytic bias in the [FeFe]-Hydrogenases CpI and CpII of *Clostridium pasteurianum* strain W5. *Frontiers in Microbiology*. 2017. Vol. 8. P. 1–11. DOI:10.3389/fmicb.2017.01305

Tigunova O., Shulga S., Blume Ya. Biobutanol as an alternative type of fuel. *Cytology and Genetic*. 2013. Vol. 47(6). P. 366–383. DOI: 10.3103/S0095452713060042

Tigunova O.O., Kamenskyh D.S., Tkachenko T.V. Biobutanol production from plant biomass. *The Open Agriculture Journal*. 2020. Vol. 14. P. 187–197. DOI: 10.2174/1874331502014010187

Varjani S., Upasani V.N. Pandey A. Bioremediation of oily sludge polluted soil employing a novel strain of *Pseudomonas aeruginosa* and phytotoxicity of petroleum hydrocarbons for seed germination. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 737. P. 139766. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139766

Vintilă T. Sugar production potentials of some sweet *Sorghum* hybrids cultivated in heavy metals polluted soils. *Journal of Advanced Agricultural Technologies*. 2017. Vol. 4 (1). P. 12–17. DOI: 10.18178/joaat.4.1.12-17

Viquez C.S. Assessment of biogas production of certain varieties of *Pennisetum purpureum*, *Zea mais* and *Sorghum saccharatum*. *AgroLife Scientific Journal*. 2015. Vol. 4(2). P. 98–105.

Volesky B., Mulchandani A., Williams J. Biochemical production of industrial solvents (acetone-butanol-ethanol) from renewable resources. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1981. Vol. 369. P. 205–218.

Voytovska V., Storozhuk L., Nedyk T. Introduction of base line and receiving sterile culture of sugar soghum (*Sorghum saccharatum* (L.) Pers.). *Селекція та насінництво. Сортовивчення та охорона прав на сорти*. 2013. № 3. С. 50–53.

Waliszewska H., Zborowska M., Waliszewska B., Borysiak S., Antczak A., Czekala W. Transformation of *Miscanthus* and *Sorghum* cellulose during methane fermentation. *Cellulose*. 2018. Vol. 25. P. 1207–1216. DOI: 10.1007/s10570-017-1622-1

Waliszewska H., Zborowska M., Waliszewska B. Transformation of *Miscanthus* and *Sorghum* cellulose during methane fermentation. *Cellulose*. 2018. Vol. 25. C. 1207–1216.

Wan N., Sathish A., You L., Tang Y.J., Wen Z. Deciphering *Clostridium* metabolism and its responses to bioreactor mass transfer during syngas fermentation. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 7. P. 10090. DOI: 10.1038/s41598-017-10312-2

Wang Z., Keshwani D., Redding A., Cheng J. Alkaline pretreatment of coastal bermudagrass for bioethanol production. ASABE Annual International Meeting; Rhode Island Convention Center Providence, Rhode Island. 2008. DOI: 10.13031/2013.24750

Xin F., Yan W., Zhou J., Wu H., Dong W., Ma J., Zhang W., Jiang M. Exploitation of novel wild type solventogenic strains for butanol production. *Biotechnol Biofuels*. 2018. Vol. 11(252). P. 1–8. DOI: 10.1186/s13068-018-1252-3

Xu Z., Jiang L. *Comprehensive Biotechnology (Second Edition)*. 2011,3. P. 207–215. DOI: 10.1016/B978-0-08-088504-9.00181-1

Yang Z., Li J., Liu L., Xie Q., Sui N. Photosynthetic regulation under salt stress and salt-tolerance mechanism of sweet sorghum. *Frontiers in plant science*. 2020. Vol. 10. P. 1723. DOI: 10.3389/fpls.2019.01722

Yücel D., Hizli H., Yücel C., Dweikat I. Genetic variability, heritability, and genetic advance for ethanol yield and yield components in sweet sorghum (*Sorghum bicolor* var. *saccharatum* L.). *International Journal of Innovative Approaches in Agricultural Research*. 2020. Vol. 4(1). P. 21–33. DOI: 10.29329/ijjaar.2020.238.3

Yucel C., Yucel D., Hatipoglu R. Nutritive value and fodder potential of different sweet sorghum genotypes under mediterranean conditions. *Turkish Journal of Field Crops*. 2021. Vol. 26(1). P. 1–7. DOI: 10.17557/tjfc.943445

Zhao H., Bak er G. A., Cowins J. V. Fast enzymatic saccharification of switchgrass after pretreatment with ionic liquids. *Biotechnol. Prog.* 2010. Vol. 26(1). P.127–133.

*Наукове видання*

**СОРГО ЦУКРОВЕ  
(*SORGHUM SACCHARATUM (L.) MOENCH*)  
В УКРАЇНІ: БІОЛОГІЯ, ПРОДУКТИВНІСТЬ  
ТА ВИКОРИСТАННЯ НА БІОПАЛИВО**

**Монографія**

**Авторський колектив:**

Д.Б. Рахметов, С.М. Шульга, Н.В. Заїменко,  
Я.Б. Блюм, О.М. Вергун, Г.С. Андріяш,  
О.О. Тігунова, С.О. Рахметова.

Відповідальний редактор – професор *Д.Б. Рахметов*  
Літературний редактор *В.А. Дерев'янка*  
Технічний редактор *С.О. Рахметова*

Керівник видавничого проекту *Віталій Зарицький*  
Комп'ютерний дизайн *Олена Щербина*

Підписано до друку 09.10.2024. Формат 70x100 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Папір офсетний. Друк офсетний. Гарнітура Times New Roman.  
Умовн. друк. аркушів – 9,1. Обл.-вид. аркушів – 7,84.  
Тираж 300

Видавець і виготовлювач: ТОВ «Видавництво Ліра-К»  
Свідоцтво № 3981, серія ДК.  
03142, м. Київ, вул. В. Стуса, 22/1  
тел.: (050) 462-95-48; (067) 820-84-77  
Сайт: [lira-k.com.ua](http://lira-k.com.ua), редакція: [zv\\_lira@ukr.net](mailto:zv_lira@ukr.net)