

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**ВОЛОДЬКО ОЛЕКСІЙ ІВАНОВИЧ**

УДК 661.722:663.15:664.788.2

**РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСНОВ ОТРИМАННЯ БІОЕТАНОЛУ  
ІЗ ЦУКРОВОГО СОРГО**

03.00.20 «Біотехнологія»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

Роботу виконано в Державній установі «Інститут харчової біотехнології та геноміки Національної академії наук України»

**Науковий керівник** доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Циганков Сергій Петрович**,  
Державна установа «Інститут харчової  
біотехнології та геноміки НАН України»,  
заступник директора з наукової роботи;  
завідувач відділу переробки поновлюваної  
сировини та альтернативних палив

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, доцент  
**Голуб Наталія Борисівна**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»,  
професор кафедри екобіотехнології  
та біоенергетики

кандидат технічних наук, доцент  
**Муштрук Михайло Михайлович**,  
Національний університет біоресурсів  
і природокористування України,  
доцент кафедри процесів і обладнання  
переробки продукції АПК

Захист відбудеться «14» травня 2021 року о 15<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.004.22 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розіслано «12» квітня 2021 року

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Н. М. Слободянюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Дослідження в галузі виробництва і використання альтернативних видів палива (біопалив) широко розвиваються в різних країнах світу. Основною метою досліджень є розширення сировинної бази виробництва, пошук енергоефективних технологій одержання моторних палив і методів їх раціонального використання, тобто створення необхідних технічних та економічних передумов для часткової заміни палива, яке виробляється сьогодні переважно з нафтової сировини.

Навіть частковий перехід на біопалива у межах України дасть змогу зменшити імпорт нафти на декілька мільйонів тонн у рік. Крім вирішення енергетичних проблем, виробництво та широкомасштабне використання біопалив значною мірою сприятиме вирішенню екологічних проблем, оскільки значно зменшить емісію CO<sub>2</sub> від нафтопродуктів, замінивши його на вуглець «зеленої» біомаси. Україна, маючи один з найбільших потенціалів аграрної сфери у Європі, не використовує повною мірою поновлювальні джерела енергії з фітомаси.

Основною сировиною для українського біоетанолу є бурякоцукрова меляса, запаси якої обмежені, що стримує розвиток біоетанольної індустрії. Саме тому виникає потреба у нових джерелах цукрів, одним із яких може бути цукрове сорго. Ця рослина має найбільший вихід легкозасвоюваних цукрів з гектара серед культур, що вирощуються в Україні, невибаглива до ґрунтів, посухостійка. Може успішно вирощуватися на всій території України.

Для виробництва біоетанолу важливим чинником є вартість тонни вуглеводів (цукрів або крохмалю) у сировині, оскільки у структурі собівартості її частка складає 70 %. Розрахункова вартість тонни вуглеводів з кукурудзяного зерна становить близько 230 дол. США, а для цукрового сорго – 135 дол. США. Останніми роками в Україні значна увага приділяється районуванню цієї культури та вивченню технологічних особливостей її використання як найбільш дешевої вуглеводної сировини для виробництва біоетанолу. Найбільшу економічну вигоду будуть мати виробництва з комплексним переробленням рослини (крім рідинного палива, отримують пелети та корм для худоби – силос, добрива, біогаз).

Цукрове сорго вважається перехідним між першим і другим поколіннями біопаливної сировини з таких причин: 1) воно містить прості цукри в сиропі та крохмаль у насінні, а також лігноцелюлозу у багасі та листі; рослина не вживається як традиційне джерело їжі для людей у багатьох країнах. Після вилучення з рослинної біомаси цукрів, придатних для рідинної ферментації, залишається жмих, так звана соргова багаса, яка є готовим твердим паливом для забезпечення промислової переробки сорго у біоетанол. З огляду на можливість енергетичного самозабезпечення заводу цукрове сорго економічно значно привабливіше цукрового буряку та кукурудзи.

Важливо, що соки та сиропи, отримані з стеблин сорго, можуть перероблятися у біоетанол на біотехнологічних заводах з переробки меляси бурякоцукрової. Для підвищення продуктивності ферментації цукрів сорго

в біоетанол перспективним є використовувати середовища підвищеної густини у поєднанні з вакуумуванням. З огляду на означене, пристосування технології переробки вирощеного в Україні цукрового сорго у біоетанол та її промислові випробування на вітчизняних заводах з виробництва біоетанолу з меляси бурякоцукрової є одним із важливих сьогодні завдань.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертацію виконано в лабораторії біотехнології біопалив та інновацій в зеленій енергетиці відділу геноміки та молекулярної біотехнології Державної установи «Інститут харчової біотехнології та геноміки Національної академії наук України» у межах тем «Розробити наукові основи використання цукрового сорго для виробництва біоетанолу» (номер державної реєстрації 0109U000470, 2009–2013 рр.) та «Розробити наукові основи ферментації рослинної сировини під вакуумом для отримання летких біопаливних компонентів» (номер державної реєстрації 0114U002171, 2014–2018 рр.).

**Мета та завдання дослідження.** Мета роботи – розроблення біотехнології переробки стебел цукрового сорго для забезпечення виробництва паливного біоетанолу із перспективної рослинної сировини вітчизняного виробництва.

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- отримати фітомасу цукрового сорго у північних регіонах України, визначити хімічний склад стебел, соку та сиропу цукрового сорго і запропонувати метод його підготовки для ферментації;
- охарактеризувати лігноцелюлозну складову стебел сорго для отримання біоетанолу другого покоління;
- оптимізувати процес ферментації соргоцукрового соку та сиропу (кінетика, вихідні концентрації живильного середовища, кількість додаткових джерел Нітрогену та Фосфору);
- визначити склад летких продуктів ферментації та дистиляту зрілої культуральної рідини соргоцукрового соку та сиропу;
- дослідити вплив температури та рН на кількісний склад летких продуктів ферментації культуральної рідини соргоцукрового сиропу;
- використовуючи вакуумування культуральної рідини у процесі ферментації соргоцукрового соку чи сиропу як метод зняття інгібування кінцевим продуктом – етанолом, розглянути можливість прискорення та здешевлення виробництва паливного біоетанолу;
- визначити хімічний склад залишків після дистиляції (барди) соргоцукрового соку та сиропу і розробити рекомендації щодо їх переробки;
- охарактеризувати соргоцукрову багасу, зокрема шляхи її використання, розрахувати енергозабезпеченість заводу та економічну доцільність біотехнології отримання біоетанолу із цукрового сорго;
- розробити апаратурно-технологічну схему технології переробки стебел цукрового сорго у біоетанол;
- здійснити апробацію розроблених технологічних рішень спиртового зброджування соргоцукрових соків і сиропів у виробничих умовах.

*Об'єкт дослідження* – біотехнологія отримання паливного етанолу із цукрового сорго.

*Предмет дослідження* – сік і сироп із цукрового сорго, процес їх ферментування дріжджами *Saccharomyces cerevisiae* для отримання біоетанолу, продукти ферментування, барда та багаса сорго.

**Методи дослідження:** фізико-хімічні, аналітичні методи контролю у спиртовому та крохмале-патоковому виробництві, мікробіологічні, газохроматографічні методи дослідження летких компонентів спиртових дистилятів, органолептичні, математичні методи для обробки експериментальних даних.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Науково обґрунтовано аспекти біотехнології приготування і спиртового зброджування поживного середовища із перспективної сировини – цукровмісних соків і сиропів, отриманих відтисканням зі стебел цукрового сорго.

Здійснено оцінку можливості використання лігноцелюлозної сировини сорго вітчизняного походження; вперше запропоновано й обґрунтовано використання кислотомісних відходів дистиляції етанолу для обробки лігноцелюлози сорго перед ферментативним гідролізом.

Запропоновано технологічні параметри процесу ферментації та дріжджогенерування за дозами додаткових поживних речовин, концентрацією сухих речовин, температур і початкового рН середовища.

Експериментально визначено кількісний і якісний склад продуктів ферментації в дозрілій культуральній рідині та дистиляті на основі соргоцукрового соку та сиропу.

Вперше науково обґрунтовано умови зброджування соргоцукрового соку та сиропу із вітчизняної сировини за зниженого тиску і з використанням поверхнево-активної речовини з метою вилучення спиртів у процесі їх утворення для уникнення інгібування процесу ферментації.

**Практичне значення одержаних результатів.** Адаптовано біотехнологію зброджування цукровмісного соку цукрового сорго до біоетанольних виробництв на території України, що працюють на бурякоцукровій мелясі. Розроблено технологічну схему для переробки соків цукрового сорго, отриманого методом відтискання. Запропоновано варіанти змішування соргоцукрового соку з бурякоцукровою мелясою. Розроблено розрахунок соргоцукрового кластера матеріальних потоків та енергетичних потреб з метою отримання вихідних даних для проєктування заводу, розраховано можливу собівартість біоетанолу із цукрового сорго (0,3 дол. США/л). Головні технологічні рішення апробовано на заводі з виробництва біоетанолу ТОВ «Компанія «Еко-Енергія» (Лебединський район Сумської області).

Сконструйовано та апробовано на ДП «Гайсинський спиртовий завод» ферментер для вакуумування частини культуральної рідини з рециркуляцією. Розроблено технологічну схему інтеграції ферментера для вакуумування в технологічну лінію виробництва біоетанолу.

Спосіб отримання біоетанолу у процесі ферментування соку цукрового сорго в умовах зниженого тиску захищено патентом України на корисну модель № 140723.

**Особистий внесок здобувача.** Розробка є самостійним дослідженням здобувача, який провів експериментальні лабораторні дослідження та в заводських умовах сконструював лабораторні установки для досліджень і лабораторний вальцевий прес для відтискання соку сорго, здійснив аналіз і узагальнення отриманих даних, проаналізував наукову літературу, а також оформив наукові роботи за темою дисертації.

Визначення плану та загальної методології дисертації, планування лабораторних досліджень, експериментів на виробництві та розроблення технологічних схем здійснено спільно з науковим керівником доктором технічних наук С. П. Циганковим, який є співавтором публікацій; оформлення патенту та статей здійснено спільно з колегами, які є співавторами у цих роботах. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, використано матеріали результатів досліджень, одержаних особисто автором у процесі проведення досліджень.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації представлено на: Первой конференції молодих учених (с міжнародним участием) «Биология растений и биотехнология» (м. Біла Церква, 2011 р.); IV Всеукраїнській науково-практичній конференції «Біотехнологія XXI століття» (м. Київ, 2012 р.); 8<sup>th</sup> International Green Energy «NAU» (м. Київ, 2013 р.); 2<sup>nd</sup> конференції молодого вченого «Plant Biology and Biotechnology» (м. Київ, 2013 р.); науковій конференції «Біологічні ресурси і новітні біотехнології виробництва біопалив» (м. Київ, 2014 р.); Міжнародній конференції молодих вчених «Actual Problems of Microbiology and Biotechnology» (м. Одеса, 2015 р.); XI Всеукраїнській науково-практичній конференції «Біотехнологія XXI століття» (м. Київ, 2017 р.); Третій конференції молодих учених «Біологія рослин і біотехнологія» (м. Київ, 2017 р.); VII Міжнародній науково-практичній конференції Національного університету біоресурсів і природокористування України «Біотехнологія: звершення та надії» (м. Київ, 2018 р.); XIV Всеукраїнській науково-практичній конференції, присвяченій 135-річчю від дня народження Олександра Володимировича Палладіна (для студентів, аспірантів і молодих учених) «Біотехнологія XXI століття» (м. Київ, 2020 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології» (м. Одеса, 2020 р.).

**Публікації.** За результатами дисертації опубліковано 7 наукових праць, з яких 5 статей у наукових фахових виданнях України, у тому числі включених до міжнародних наукометричних баз даних, стаття у науковому виданні іншої держави, включеному до міжнародної наукометричної бази даних Scopus, патент України на корисну модель, 11 тез наукових доповідей.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертацію викладено на 215 сторінках. Робота складається з анотацій, вступу, огляду літератури, матеріалів і методів досліджень, результатів досліджень, їх аналізу та обговорення, висновків,

списку використаних джерел, який містить 197 посилань і додатків. Дисертація містить 42 рисунки та 43 таблиці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

### ЦУКРОВЕ СОРГО – СИРОВИНА ДЛЯ СПИРТОВОГО ЗБРОДЖУВАННЯ У ПАЛИВНИЙ БІОЕТАНОЛ

(огляд літератури)

Проаналізовано перспективи цукрового сорго як енергетичної культури, що вирощується в Україні, для переробки на біоетанол. З метою отримання якісних показників вихідної сировини – соргоцукрового соку – наведено дані про розподіл цукрів у стеблах рослини, методи очистки стебел та соку, а також методи отримання соків із рослини. Для ефективного зброджування цукровмістної сировини проаналізовано можливість використання технології ферментування дріжджами *S. cerevisiae* середовищ підвищеної густини та вакуумне видалення етанолу із суміші, що зброджується. Визначено можливі особливості зброджування соку цукрового сорго через гетерогенний склад цукрів. З метою оптимізації поживного середовища розглянуто й обрано додаткові джерела азотного та фосфорного живлення, проаналізовано вплив температури і рН середовища на накопичення побічних продуктів спиртового зброджування.

### МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Штам дріжджів і бродіння – *S. cerevisiae* Meyen ex E.C. Hansen, Medd. Carlsberg Lab.: 29 (1883) Y-M-05 – отримано з Національної колекції штамів мікроорганізмів та рослинних ліній для харчової та сільськогосподарської біотехнології Інституту харчової біотехнології та геноміки НАН України. Штам *S. cerevisiae* Y-M-05 було виділено з поверхні зерна проса, він придатний для виробництва біомаси дріжджів і виробництва етанолу.

Насіння цукрового сорго (*Sorghum saccharatum* (L.) Moench) сорту Ботанічний було отримано з Національного ботанічного саду імені М. М. Гришка НАН України. Рослини вирощувалися у Шосткінському районі Сумської області, у географічній зоні Полісся, на дерново-підзолистому ґрунті. Сік цукрового сорго отримували таким способом: очищені від листя та волоті стебла цукрового сорго відтискали на вальцевому пресі. Для отримання і зберігання соргоцукрового сиропу сік після очищення концентрували під вакуумом у роторному випарнику за  $60 \pm 2$  °С. Сироп із соку сорго зберігали за 4 °С.

Субстрати для культивування готували з соків і сиропів цукрового сорго розведенням водопровідною водою до необхідного значення сухої речовини. Ферментування та дріжджогенерування здійснювали на колбах Ерленмейера та у 5 л ферментері. На заводі культивували в апараті чистої культури дріжджів.

Вміст редукуючих цукрів аналізували методом Лейна та Ейнона (ISO 5377:1981) шляхом титрування зразка з розчином Фелінга з метиленовим

синім, як індикатором. Загальний вміст цукрів (редуючі цукри + сахароза) аналізували методом Лейна та Ейнана після гідролізу сахарози соляною кислотою за  $69 \pm 1$  °С. Як альтернативу, вміст засвоєваних вуглеводів перевіряли методом бродильної проби (ГОСТ 31683-2012). Леткі компоненти культуральної рідини визначали на хроматографі «Цвет-100» методом повного випаровування (ГХ/ПВ) конденсованого зразка та парофазного газохроматографічного аналізу (ПФ/ГХ).

Статистичну обробку результатів виконували з використанням програмного забезпечення MathCad 14 M035 і MS Office Excel 2010, креслення – в AutoCad 2016.

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

**Результати вирощування цукрового сорго в Україні.** Ряд господарств, як в Україні, так і в сусідніх країнах, вже набули позитивного досвіду вирощування цієї культури як потенційної сировини для виробництва біоетанолу. Врожайність фітомаси цукрового сорго, що вирощувалось протягом 10 років у Шосткинському районі Сумської області наведено в табл. 1. Сорго за врожайності 78–106 т/га очищених від листя та волоті стебел забезпечить вихід 5,3 м<sup>3</sup>/га біоетанолу. Цукристість і врожай біомаси стебел залежить від кількості сонячних днів у літній період і може суттєво знизитися за дощового літа. Вміст сухої речовини у соку становив 9,2–14,1 %.

*Таблиця 1*

**Врожайність цукрового сорго сорту Ботанічний  
у Шосткинському районі Сумської області  
(n=3, ± стандартне відхилення)**

Рік	Врожайність, т/га	Вихід соку, %	Вологість стебла, %	Вміст сухої речовини у соку, %
2011	104±1,5	40,0±1,2	70,0±2,1	13,0±0,6
2012	106±1,5	42,6±1,1	80,1±2,2	12,5±0,7
2013	86±1,4	42,4±1,1	75,2±2,1	12,2±0,5
2014	98±1,4	38,2±1,2	67±2,1	10,5±0,5
2015	89,6±1,4	41,2±1,1	75,6±2,2	14,1±0,5
2016	96,4±1,3	38,6±1,1	74,1±2,1	13,2±0,6
2017	89,5±1,5	44,1±1,1	80±2,1	12,6±0,5
2018	84,5±1,4	38,2±1,3	72,6±2,3	13,1±0,6
2019	82,1±1,3	41,3±1,1	74,8±2,1	10,8±0,5
2020	78,1±1,4	36,4±1,1	66,4±2,1	9,2±0,5

**Використання лігноцелюлози цукрового сорго у технологічному процесі отримання біоетанолу.** Результати аналізу складу клітинної стінки стебел цукрового сорго, здійсненого за допомогою хімічних методів і газорідинної хроматографії з використанням методик гідролізу полісахаридів та подальшим синтезом летких похідних цукрів, показали, що вміст структурних компонентів в абсолютно сухій багасі цукрового сорго складає:



44 % – целюлози, 28 % – геміцелюлози та 20 % – лігніну, а із моноцукрів у багасі цукрового сорго містяться: арабіноза – 6,98 %, галактоза – 1,76 %, глюкоза – 62,2 %, ксилоза – 21,22 %.

Лігноцелюлоза стебла цукрового сорго у процесі відтискання з неї цукровмісного соку піддається гідротермічному впливу, який полегшує подальший ферментативний гідроліз полісахаридів. Тому саме завдяки такій обробці можна отримати частково підготовлену для подальшої переробки сировину другого покоління.

Лігноцелюлозна сировина вимагає попереднього оброблення для полегшення доступу ферментів до целюлозних волокон. Сучасні технології, найбільш наближені до комерційного використання, передбачають оброблення подрібненої сировини слабкими розчинами мінеральних кислот і тепловим впливом. Розроблено та апробовано спосіб термообробки для м'якого гідролізу за атмосферного тиску в суміші 0,1 %  $H_2SO_4$  в лютерній воді, що проводиться 60 хв за температури 90–95 °С; після обробки в розчині міститься 30 % сухої речовини. За м'якого гідролізу не накопичується фурфурол (із пентоз) і оксиметилфурфурол (із гексоз), які негативно впливають на стан мікроорганізмів у процесі бродіння.

**Отримання та очистка соку зі стебел цукрового сорго.** Для отримання високої якості соку стебла цукрового сорго треба очищати від волоті та листя. Результати порівняння соків сорго, отриманих з очищених і неочищених стебел, наведено в табл. 2. Показник «якість» – це відношення вмісту цукрів, що зброджуються, до загальної кількості сухої речовини у розчині.

*Таблиця 2*

**Порівняння якості соку, отриманого з очищених і неочищених стебел цукрового сорго**  
( $n=3$ ,  $\pm$  стандартне відхилення)

Показник	Сік з очищених стебел	Сік з неочищених стебел
Суша речовина (за цукрометром), %	11,6 $\pm$ 0,6	13,4 $\pm$ 0,6
pH	5,7 $\pm$ 0,5	5,8 $\pm$ 0,5
Кислотність, град	0,05	0,05
Редукуючі речовини, %	5,1 $\pm$ 0,46	4,3 $\pm$ 0,37
Сахароза, %	4,9 $\pm$ 0,45	4,2 $\pm$ 0,36
Доброякісність, %	86,2 $\pm$ 12,3	63,4 $\pm$ 8,3

Сік із неочищених стебел містить у 2–3 рази більше жмиху, який після відстоювання осідає у вигляді сіро-зеленого осаду. Одержані мікробіологічні показники забрудненості соргоцукрових соків показали, що в соку, отриманому з неочищених стебел, зростає контамінація мікроорганізмами майже у 5 разів. Для консервування цукрів соку сорго його випарюють на вакуумних випарних апаратах до вмісту сухої речовини на рівні 65–75 %.

Оскільки у жмиху міститься багато білків хлорофілу, а білок має здатність швидко закупорювати фільтри, цей процес на виробництві

не застосовують (окрім грубого фільтра після витікання соку з-під пресу). Найпростішим методом відділення осаду соку сорго є декантація у процесі його відстоювання. Теплова обробка прискорює осідання осаду через коагуляцію та агломерацію білків. У разі нагрівання до кипіння нативний сік цукрового сорго може значною мірою пінитися. Через 1–2 хв кипіння піна «згасає» та майже зникає. Проте на стінках ємності, де відбувається кипіння нативного соку, відкладається наліт, який треба періодично змивати. Щоб не відбувалося пригорання білкового осаду, нагрівання рекомендується здійснювати гострою парою. Очищений таким методом сік набуває коричневого забарвлення.

**Хімічний склад соку та сиропу цукрового сорго. Порівняння з мелясою.** У табл. 3 наведено отримані у процесі дослідження дані для порівняльної характеристики соргового сиропу та бурякоцукрової меляси. Сироп одержано з соку цукрового сорго шляхом концентрування на роторному випарнику.

Таблиця 3

**Хімічний склад соргового сиропу,  
порівнюючи з бурякоцукровою мелясою  
(n=3, ± стандартне відхилення)**

Назва показника	Меляса	Сорговий сироп
Суша речовина (за рефрактометром), %	81,45±2,55	72,05±3,2
pH (активна кислотність)	8,1±1,4	5,31±1,2
Лужність, град	3,0±1,0	немає
Кислотність, град	0,15±0,08	0,25±0,02
Якість, %	63,0±2,6	78,4±7,9
Кольоровість (за фотоелектроколориметром), % до світлопроходження води	50±5,0	60±6,0
Нітроген, %, зокрема:		
- загальний	1,81±0,25	0,3±0,05
- засвоюваний	0,4±0,05	0,012±0,002
Фосфор (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ), %	0,047±0,008	0,022±0,001
SO <sub>2</sub> , %	0,036±0,024	0,076±0,009
Солі кальцію (CaO), %, загальний зміст	0,5±0,08	0,16±0,01
Сахароза, %:	50,15±2,1	38,4±2,1
Інвертний цукор, %:	1,2±0,2	18,3±1,1
Зола (сульфатна), %	11,2±1,0	3,7±0,2
Леткі кислоти (у перерахунку на оцтову), %	0,7±0,27	1,72±0,09
Нітрати, %	0,16±0,1	0,15±0,01

Якість сиропу сорго майже співпадає з якістю вихідного соку, який випарювався в сироп. Сорговий сироп, як і сік, має кислу реакцію завдяки органічним кислотам циклу Кребса, які містяться у вакуолях клітин цукрового сорго. Кислий pH соків дає змогу піддавати їх тепловій обробці без окислення редуруючих цукрів (переважно глюкози).

**Дріжджогенерування та встановлення додаткового живлення за Нітрогеном і Фосфором.** Вплив додавання карбаміду на швидкість споживання цукру за динамікою падіння Вгіх показано на рис. 1 та у табл. 4.

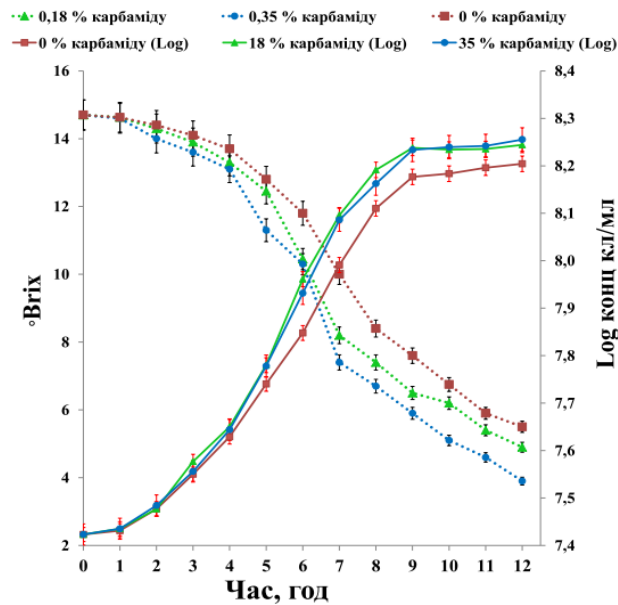


Рис. 1. Вгіх і швидкість росту клітин за культивування дріжджів у середовищі соргоцукрового сиропу з додаванням карбаміду в обсягах 0,18 і 0,35 г/кг (тестові значення) та без додавання карбаміду (контроль)

Таблиця 4

**Значення максимальних швидкостей росту  
та зниження вмісту сухої речовини**

Показник Концентрація карбаміду	Максимальна швидкість росту, $\mu(\text{год}^{-1})$	Максимальна швидкість зниження Вгіх, $f(\text{год}^{-1})$
0 %	$0,29 \pm 0,04^a$	$1,74 \pm 0,07^a$
0,18 %	$0,33 \pm 0,05^b$	$2,04 \pm 0,08^b$
0,35 %	$0,32 \pm 0,05^b$	$2,02 \pm 0,08^b$

Примітка. \*Значення з однаковою буквою в колонці суттєво не відрізняються ( $p < 0,05$ )

Рис. 1 відображає результати експерименту з більш точним наближенням концентрацій карбаміду. Перший діапазон досліджували у проміжку 0–0,65 % карбаміду. За концентрації карбаміду 0,18 % швидкість росту не збільшувалася.

Також визначено нітрогенне живлення для соргоцукрового соку та сиропу за карбамідом за формулою (Маринченко В. О. и др., 2003):

$$GN = (F \cdot N1 + 0,07F \cdot N1 - M \cdot N2) \cdot 2,25, \quad (1)$$

де  $GN$  – витрати карбаміду (кг на 1000 дал спирту);  $F$  – вміст у зрілій культуральній рідині дріжджів вологістю 75 %, т;  $0,07$  – коефіцієнт, що враховує витрати Нітрогену на обмінні реакції;  $N1$  – вміст Нітрогену в дріжджах вологістю 75 %;  $2,25$  – коефіцієнт перерахунку Нітрогену на карбамід;  $M$  – витрати цукровмісної сировини на утворення 1000 дал спирту, т;  $N2$  – вміст засвоюваного Нітрогену в карбаміді, %;  $M$  – витрати цукровмісної сировини на утворення 1000 дал спирту, т.

Для соку сорго розрахункова кількість становить 0,12 % карбаміду до маси соку. Зроблено відповідні розрахунки щодо фосфорного живлення за 70 % ортофосфорною кислотою.

Для визначення максимальної концентрації суслу із соргоцукрового сиропу якістю 72 % здійснювали зброджування за 24 год з концентраціями сухої речовини від 5 до 30 %, як показано на рис. 2.

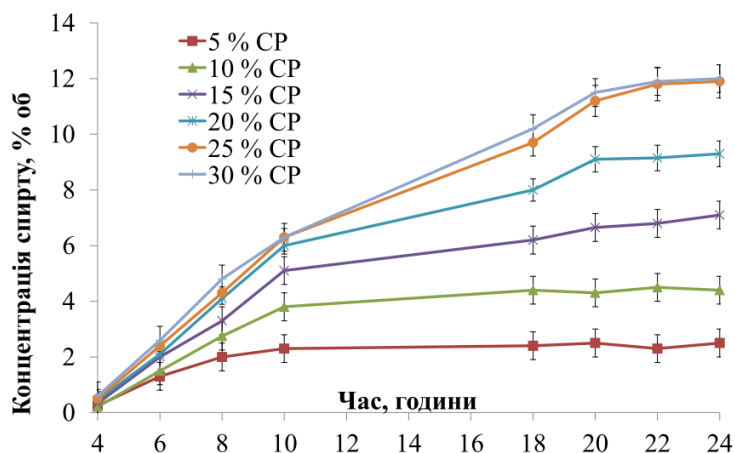


Рис. 2. Визначення максимальної концентрації середивища соргового сиропу для зброджування за 24 год

Примітка. \*СР – суха речовина

Максимальна концентрація сухої речовини становить 25 %. За концентрації дріжджових клітин 27 г/л. Максимальна продуктивність дріжджової біомаси становить  $0,35 \text{ мл} \times \text{г}^{-1} \times \text{год}^{-1}$ . Рахували з 8 по 6 год.

**Дослідження зброджування соргоцукрових соків і сиропів, порівнюючи з мелясою.** Показники сферментованого соргоцукрового соку наведено в табл. 5.

Таблиця 5

#### Показники сферментованого соргоцукрового соку

Показник	Вихідна культуральна рідина	Зріла культуральна рідина
Біомаса дріжджів, кл/мл	$6,3 \times 10^7 \pm 4,3 \times 10^6$	$0,9 \times 10^8 \pm 8,5 \times 10^6$
Видима густина при 30 °С, % сухої речовини	$8,7 \pm 0,3$	$1,6 \pm 0,1$
Концентрація етилового спирту, % об.	$0,8 \pm 0,01$	$5,0 \pm 0,02$
Істинна суха речовина культуральної рідини, %	$10,8 \pm 0,4$	$4,0 \pm 0,3$
Початкова концентрація сухої речовини, %	$12,8 \pm 0,4$	$12,9 \pm 0,4$
рН	$4,35 \pm 0,05$	$4,0 \pm 0,05$
Кислотність, град	$0,9 \pm 0,05$	$1,2 \pm 0,05$
Залишковий цукор, $\text{г} \times \text{л}^{-1}$	$85,2 \pm 4,51$	$6,1 \pm 0,3$
Продуктивність спирту, $Q_p (\text{г} \times \text{л}^{-1} \times \text{год}^{-1})$	$2,63 \pm 0,03$	
Вихід етанолу, $Y_{p/s} (\text{г} \times \text{г}^{-1})$	$0,46 \pm 0,01$	
Вихід етанолу від теоретичного, $E_y (\%)$	$91,3 \pm 1,2$	

На рис. 3 показано характерну криву зброджування соку сорго та меляси в колбах. Через гетерогенний склад цукрів сорго в анаеробній фазі

ферментування може відбуватися затримка через другу лаг-фазу. Явище другої лаг-фази не характерне для спиртового бродіння меляси бурякоцукрової.

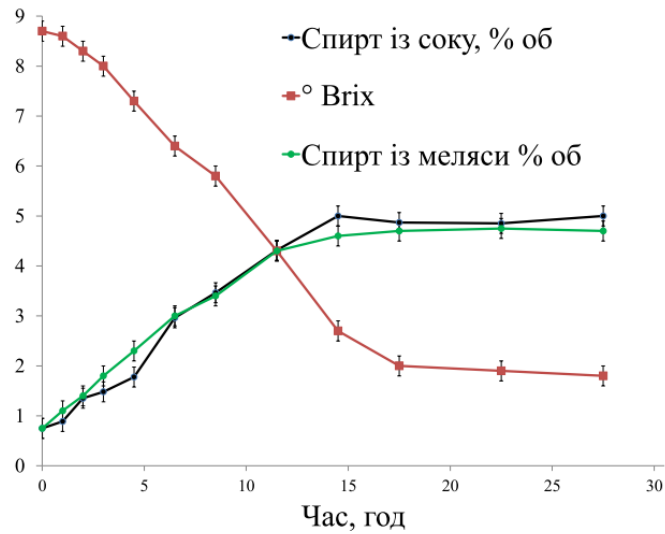


Рис. 3. Зброджування соку сорго та розведеної меляси. Параметри майже ідентичні, але для соку є лаг-фаза

За порівняння складу вторинних метаболітів зброджування соргоцукрового середовища та меляси бурякоцукрової спостерігається майже двократне збільшення їх кількості у соргоцукрових сулах (переважно внаслідок вищих спиртів – ізопентанолу та ізобутанолу) (рис. 4).

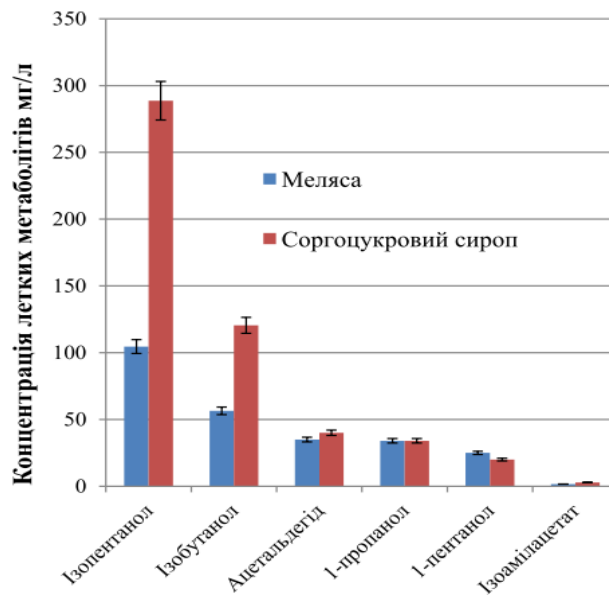


Рис. 4. Відмінність вмісту легких сполук у барді за зброджування меляси та соргоцукрового сиропу з 20 % сухої речовини методом бродильної проби

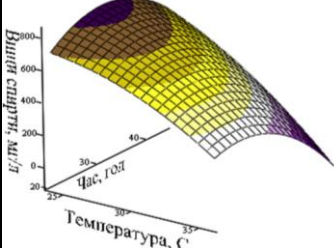
Побічні продукти метаболізму спиртового бродіння позитивно впливають на якість біоетанолу як палива.

**Вивчення впливу температури та рН середовища на накопичення вторинних метаболітів за зброджування середовищ на основі соку цукрового сорго.** Найбільша масова частка вторинних метаболітів

у культуральному середовищі на основі цукрів сорго є вищі спирти. Тому за їх зміною досліджували вплив температури в діапазоні від 24 до 36 °С. Для математичного моделювання та побудови функції поліному другого порядку задавали отримані експериментальні величини у вигляді матриці табл. 6. Тривимірне зображення функції представлено на рис. 5.

Таблиця 6

**Вихідні дані для побудови матриць та апроксимації функції  
від двох аргументів – температури і часу культивування –  
та результат моделювання**

Температура, °С	24	26	28	30	32	34	36
Час культивування, год	44	38	35	24	22	22,0	21
Вміст вищих спиртів, мг/л	618	705	681	639	524	441	309
 <p>Рис. 5. Поверхня функції <math>f(t, \tau)</math></p>	$(X^T \cdot X)^{-1} \cdot (X^T \cdot Y) = \begin{pmatrix} -1.801 \times 10^3 \\ 111.821 \\ 101.941 \\ -1.109 \\ -2.06 \\ -1.236 \end{pmatrix}$ <p>Коефіцієнти</p>		<p>Рівняння регресії задали таким виглядом:  <math>y = b_0 \cdot x_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_5 \cdot x_5</math>.</p> <p>Після перетворень та розрахунків отримали коефіцієнти рівняння.            Функція має вигляд:  <math>f(t, \tau) := -1.801 \times 10^3 + 111.821t + 101.941\tau - 1.109t \cdot \tau - 2.06t^2 - 1.236\tau^2</math></p> <p>Функція <math>f(t, \tau)</math> в заданому діапазоні дає змогу отримати розрахунки з точністю 0,7 %</p>				

Аналіз результатів показує, що максимальна кількість вищих спиртів утворюється при температурах близьких до 25 °С проте це може гальмувати загальну швидкість бродіння та призведе до необґрунтованого охолодження реактора. Кількість спиртів в діапазоні температур 30–31 °С може задовольнити даний процес. Більш швидке зменшення кількості вищих спиртів спостерігається при температурах 34 °С і вище.

Вплив значення рН на динаміку утворення побічних продуктів бродіння вивчали за утворенням ізопентанолу та етилацетату. Значення рН брали 4,2, далі 4,5, 4,9 і 5,7. Результати щодо утворення ізопентанолу, як найбільш концентрованого метаболіту, відображено на графіку рис. 6.

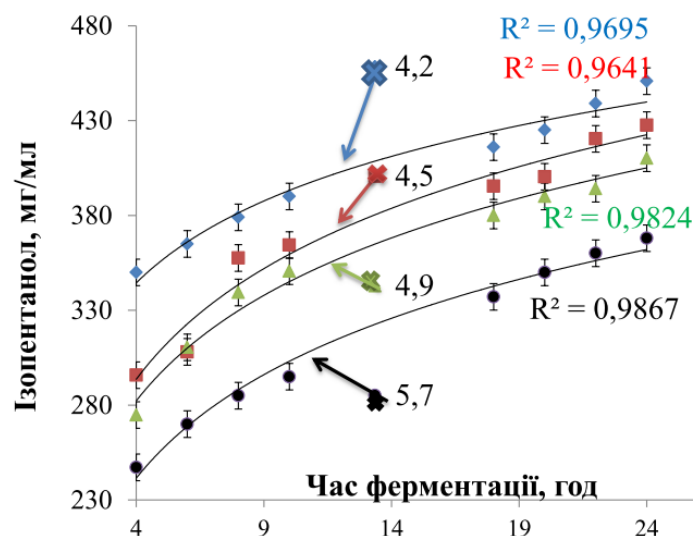


Рис. 6. Накопичення ізопентанолу за рН 4,2; 4,5; 4,9; 5,7

Встановлено залежність: зі зниженням кислотності культивування кількість ізопентанолу збільшується. Найбільший вихід за рН 4,2. Така кислотність не знижує вихід етанолу і є наближеною до природної кислотності соргоцукрового соку. рН 4,2 можна рекомендувати для культивування на соку сорго. За кутами нахилу кривих рН бачимо, що подальше зниження рН не призведе до суттєвого накопичення ізопентанолу, але зумовить потребу підкислення соргоцукрових соків, що є недоцільним.

**Ферментування соргоцукрових сиропів із застосуванням вакуумування для зняття етанольного інгібування.** Вилучення частини етанолу з культуральної рідини у період експоненційної чи стаціонарної фази бродіння призводить до зменшення інгібування кінцевим продуктом на клітини дріжджів. Із табл. 7 бачимо, що найвища продуктивність дріжджової популяції у колбі, яка піддавалася вакуумуванню, достатньому для закипання культурального середовища, і в якій рівень біоетанолу був у межах 3–5,5 % об. Колба з постійним вакуумуванням, але без кипіння культурального середовища займає посереднє значення.

Таблиця 7

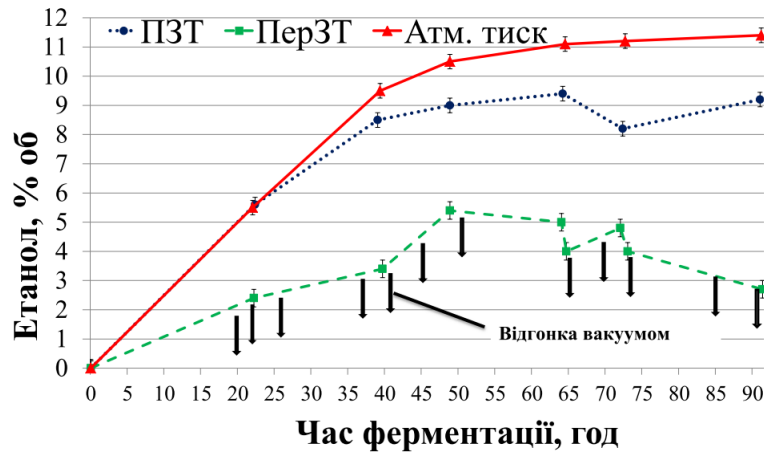
**Параметри отримання біоетанолу з розведеного соргоцукрового сиропу з використанням зниженого тиску**

Метод ферментування під тиском, мм рт. ст.*	Концентрація дріжджів, $\times 10^8$ кл/мл	Незброджений цукор у зрілій культуральній рідині, г/л	Вихід біоетанолу ( $Y_{p/s}$ , г/г)	Ефективність виходу біоетанолу ( $E_y$ , %)	Продуктивність біоетанолу ( $Q_p$ , г $\times$ л $^{-1}$ $\times$ год $^{-1}$ )
ПЗТ 80 $\pm$ 5	3,3 $\pm$ 0,1a	2.52 $\pm$ 0,07a	0,50a	92,60a	1,18a
Пер. ЗТ 20 $\pm$ 5	3,6 $\pm$ 0,1b	1.83 $\pm$ 0,04b	0,53b	98,78b	1,50b
Атм. 0	3,8 $\pm$ 0,1b	3.02 $\pm$ 0,08c	0/49a	91,37c	0,97c

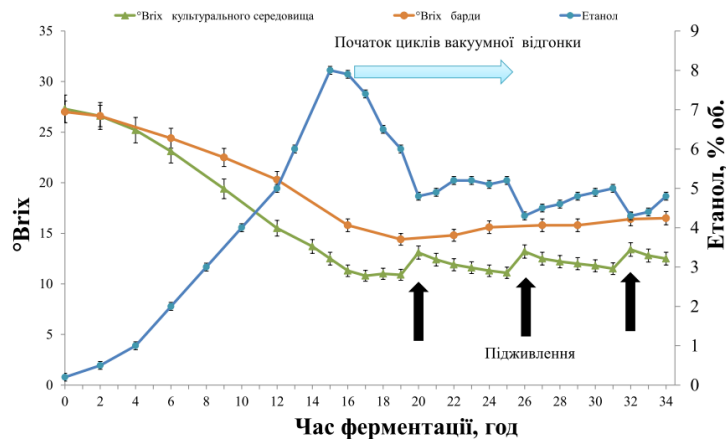
Примітка. \*Значення з однаковою буквою в колонці суттєво не відрізняються ( $p < 0,05$ ): ПЗТ 80 $\pm$ 5 – це (постійно знижений тиск) експеримент із колбою, яка бродить і постійно піддається дії пониженого тиску (80 $\pm$ 5 мм рт. ст.); Пер. ЗТ 20 $\pm$ 5 – це (періодично знижений тиск) експеримент із колбою, яка зброджується і піддається дії пониженого тиску (20 $\pm$ 5 мм рт. ст.) у короткі проміжки часу (5 хв кипіння під вакуумом і далі бродіння під атмосферним тиском, і цикл повторюється); Атм. 0 – це колба, що зброджується за атмосферного тиску

У цій колбі помітне влучення спиртових парів відбулось на 37 год культивування за вмісту спиртів близько 9 % об. (рис. 7 А). За переходу на культивування з підживленням продуктивність дріжджів через 3 цикли знижується, накопичуються нелеткі продукти життєдіяльності дріжджів, зростає крива Вгіх барди (рис. 7 Б).

Для раціонального використання ємностей і зменшення енергозатрат доцільно використовувати короткочасне вакуумування, достатнє для закипання не всього об'єму ферментера, а тільки окремої його частини (25 %).



А



Б

Рис. 7. Культивування соргоцукрових сиропів з використанням вакуумування: А – в колбах Ерленмейера; Б – у ферметері з підживленням і вакуумуванням частини рідини (25 % від об'єму культуральної рідини)

Встановлено, що додавання відповідних ПАВ Triton X-100 та Tween 20 у концентраціях 0,005–0,01 та 0,03–0,06 % до культурального середовища у процесі вакуумування соку сорго знижує ступінь вакуумування, достатній для кипіння середовища, що приводить до економії енергоресурсів та інтенсифікації (до 50 %) виділення етанолу (табл. 8).

Таблиця 8

### Параметри одержання біоетанолу з використання ПАВ у процесі вакуумування соргоцукрових соків

Зразок	Концентрація ПАВ, %	Необхідний для кипіння тиск за 30 °С, мм рт. ст.	Вихід біоетанолу в дистилаті, мл
Контроль	Без додавання ПАВ	30,2	117,1
Tween 20	0,005	33,0	136,8
	0,010	36,8	163,0
	0,100	36,9	163,1
Triton X-100	0,030	33,4	137,3
	0,060	37,8	175,2
	0,100	38,1	175,5



Дослідження утвореної барди за ферментування соків і сиропів на соргоцукровому суслі. Хімічний склад барди безпосередньо залежить від вихідного складу соргоцукрового суслу. Аналіз барди під час зброджування соргоцукрового суслу, порівнюючи з мелясною, наведено в табл. 9.

Таблиця 9

**Результати аналізу соргоцукрової барди під час зброджування соргоцукрового суслу, порівнюючи з мелясною бардою**

Показник	Соргоцукрова барда	Мелясна барда
Істинна суха речовина, %	9,2±0,46	10,4±0,5
pH	4,47±0,22	5,0±0,3
Кислотність титрована, град	1,6±0,2	0,6±0,1
Незброджені цукри, г/100 мл	1,2±0,06	0,4±0,03
Зольність, % до сухої речовини	12,2±0,7	20,0±1,2
Нітроген, % до сухої речовини	2,35±0,13	4±0,3
Білок, % до сухої речовини	15,7±1,0	25±1,6
Фосфор, % до сухої речовини	0,6±0,35	1,5±0,1
Хімічне споживання кисню, мг O <sub>2</sub> /л	(140±10)×10 <sup>3</sup>	(150±12)×10 <sup>3</sup>

Соргоцукрова барда містила приблизно у 2 рази менше золи, ніж мелясна – відповідно 12,2 та 20,0 %. У соргоцукровій барді міститься значна кількість слабких органічних кислот, на що вказує її висока титрована кислотність 1,6 °, порівнюючи з мелясною – 0,6 °. Менша зольність може дати змогу використовувати цей продукт як кормову добавку для худоби.

**Аналіз можливих шляхів використання соргоцукрової багаси. Розрахунок економічної доцільності.** Проаналізовано шляхи використання компонентів фітомаси цукрового сорго (матеріальний та енергетичний баланс). Показано, що витрати енергії на переробку 1 т стебел сорго в етанол із цукрів соку сорго складають 1,12 ГДж, а за спалювання соргової багаси, отриманої з 1 т початкової сировини отримуємо 2,06 ГДж енергії, що в 1,8 рази більше.

За допомогою моделювання соргоцукрового підприємства отримано вихідні дані для розрахунку об'ємів обладнання та їх кількості відповідно до потужностей заводу. Під час випарювання утвореної барди до концентрації 60 % сухої речовини енергетичний баланс наближається до нуля (вся багаса буде вичерпана).

У процесі розрахунку собівартості виробництва біоетанолу враховували, що його собівартість на 70 % складається з собівартості сировини (стебел сорго). Собівартість стебел сорго вираховували із приблизної собівартості стебел за ціною вирощування 1 га кукурудзи в Україні, з огляду на високу подібність кукурудзи та сорго щодо внесення добрив, кількості прополювань і густини посіву. Зниження собівартості біоетанолу із легкодоступних цукрів цукрового сорго, порівнюючи із зерном кукурудзи, обумовлене трьома основними факторами: 1) більшою врожайністю цукрів з га; 2) відсутністю потреби у гідролітичних ферментах; 3) самозабезпеченням заводу тепловою енергією. Розрахункова вартість біоетанолу з сорго за врожайності останнього 100 т/га та цукристості стебла 10 % становить 0,30 дол. США/л, із кукурудзи – 0,45 дол. США/л, із меляси – 0,56 дол. США/л за ціни 3600 грн/т (зараз

продається і по 6300 грн/т із меляси). Є проблема у нестабільності цін на бурякоцукрову мелясу в Україні через її дефіцит. Раніше меляса вважалася найвигіднішою сировиною для виробництва біоетанолу в Україні.

Проаналізована енергетична поживність корму багаси в кормових одиницях склала 0,24, якість корму за показниками перетравлюваності сухої речовини – 72,8 %, відносна кормова цінність – 93.

**Апаратурно-технологічну схему переробки стебел цукрового сорго окремо та в суміші з мелясою бурякоцукровою** зображено на рис. 8. Розроблена схема передбачає надходження на територію заводу очищених від волоті та листя стебел цукрового сорго автотранспортом (1). Стебла вивантажують на вальцевий багатокорпусний прес (3) із вбудованим подрібнювачем стебел (2) перед вальцями (або стебла надходять вже подрібнені). Вичавлений сік через фільтр грубої очистки потрапляє самоплином у приймальні резервуари (4, 5), далі насосом (6) перекачується у приймальні ємності для нативного соку (7). На наступній стадії нативний сік сорго для температурної коагуляції надходить до підігрівачів (8), де нагрівається гострою парою до температури кипіння. У подальшому для охолодження сік надходить до теплообмінника (9) і перекачується на стадію декантації в апарати відстоювання (10).

Відстояні (очищені) верхні шари соку можуть направлятися безпосередньо на дріжджогенерування в апараті чистої культури дріжджів (після стерилізації) або в дріжджанки чи на головну ферментаційну батарею. Для зберігання соку інша його частина може потрапляти на трикорпусну вакуум-випарну установку (12), де очищений сік випаровується до потрібного вмісту сухої речовини, надходить у ємність для зберігання (14) та використовується після розведення чи як головна розсиропка підвищеної густини. Для того, щоб у теплий період не доводилося концентрувати соргоцукровий сік для підвищення густини середовища, що зброджується, завод може мати відповідний запас бурякоцукрової меляси та використовувати її для підвищення густини культурального середовища відповідно до заданої технологічної норми. На апаратурно-технологічній схемі лінія переробки меляси збережена та інтегрована із соргоцукровою.

Осад, який утворюється у декантаторах (10), може надходити на центрифугу (15), де швидко відокремлюється від соку. Сік надходить у збірник для очищеного соку (11) та на переробку, а осад (макуха) на корм худобі чи як добриво. Також осад із декантаторів можна спрямовувати зворотно до вальцевого пресу (3) та повторно відтискати сік.

**Апробація окремих технологічних рішень на заводах з виробництва біоетанолу.** Переробка стебел сорго здійснювалася на заводі ТОВ «Компанія «Еко Енергія». Засіяна площа під цукрове сорго становила 40 га. Збирали сорго силосозбиральним комбайном, який перемелював неочищені стебла, та автотранспортом привозили фітомасу на завод. Прес потужністю 50 т/год відтискав стебла з виходом соку до 55 % від маси стебла. Сік відразу спрямовувався у три головні ферментери бродильної батареї.

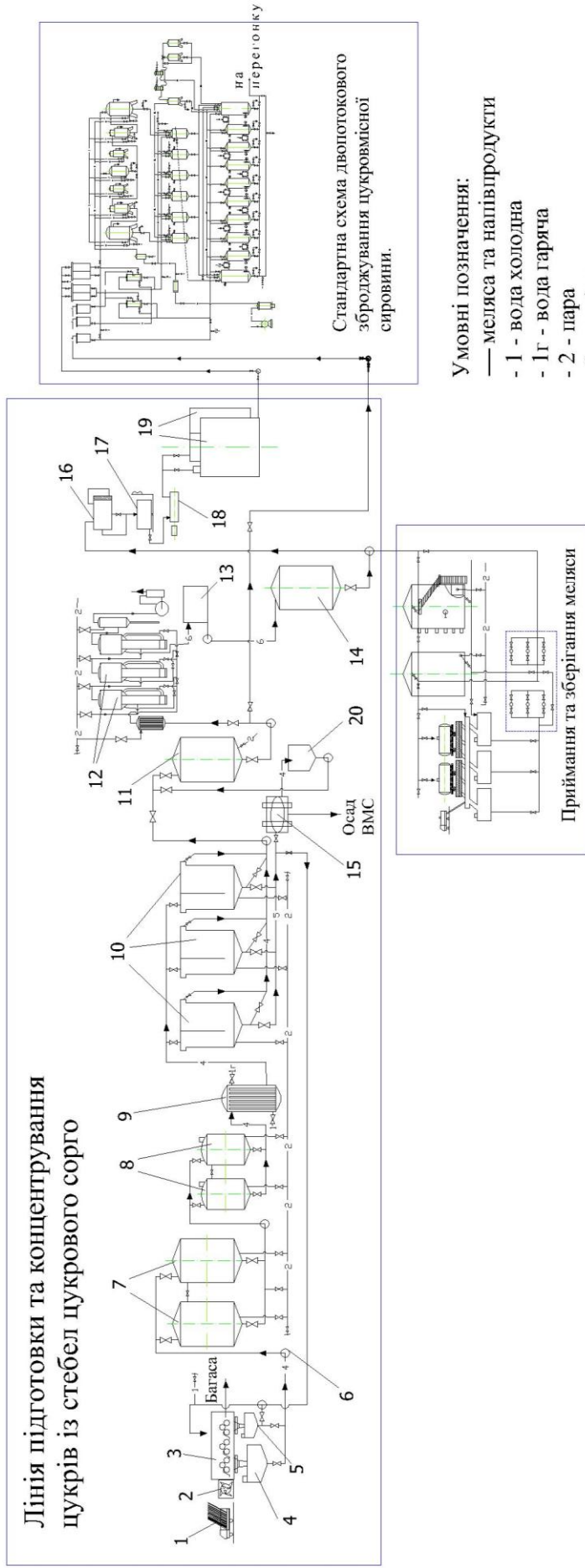


Рис. 8. Апаратурно-технологічна схема переробки стебел цукрового сорго окремо та в суміші з мелясою бурякоцукровою у біостанол: 1 – стебла з автотранспорту; 2 – подрібнювач стебел; 3 – багатопальцевий прес; 4 – передаточний збірник нативного соку; 5 – збірник соку для рециркуляції промивного розчину стебел; 6 – насос; 7 – збірники нативного соку; 8 – нагрівач для температурної коагуляції високомолекулярних сполук; 9 – теплообмінник; 10 – батарея декантаторів; 11 – збірник очищеного соку; 12 – трикорпусна випарна установка; 13 – передаточний збірник упареного соку (сиропу); 14 – збірник сиропу; 15 – центрифуга; 16 – напірний збірник; 17 – ваги; 18 – змішувач; 19 – збірник добового запасу цукровмісної сировини; 20 – передаточний збірник центрифуги

Також у заводських умовах на соку цукрового сорго та суміші соку з мелясою бурякоцукровою було проведено дріжджогенерування та ферментування в апараті чистої культури дріжджів з визначенням характерних точок контролю за видимою густиною середовища, вмісту етилового спирту та початкової концентрації вихідних речовин. Встановлено максимальну концентрацію сухої речовини в суміші соку з мелясою (до 30 % сухої речовини) за умови дріжджогенерації на соку сорго, а меляса додається як основна розсиропка, розроблено технологічну карту процесу.

Апробацію вакуумування здійснювали у ДП «Гайсинський спиртовий завод», де було сконструйовано ферментер, розрахований на вакуумування з ребрами жорсткості по всьому периметру апарату. Розроблено схему інтеграції вакуумного ферментера у загальну апаратурно-технологічну схему заводу. Через підвищені вимоги до конструювання апаратів, що працюють під зниженим тиском, та контролю протікання процесу за вакуумування його використання стає переважно виправдано за порівняно невеликих об'ємів ферментаційного обладнання.

Акти впровадження на цих заводах свідчать про зацікавленість підприємств у таких розробках.

## ВИСНОВКИ

У дисертації розроблено та науково обґрунтовано біотехнологію спиртового зброджування сусла з вітчизняної сировини – цукровмісних соків і сиропів, отриманих внаслідок відтискання стебел цукрового сорго. З одержаних результатів можна зробити такі висновки і пропозиції:

1. Вперше отримано та проаналізовано результати вирощування цукрового сорго (сорт Ботанічний) на півночі України, в Шосткинському районі Сумської області (2011–2020 рр.). Врожайність становила близько 91,4 т/га очищених стебел, в середньому вміст сухої речовини в соку 12,1 %. З метою отримання більш якісних соків встановлено необхідність вилучення цукрів із очищених від листя та волоті стебел сорго за допомогою відтискання на пресах, а не екстракцією. Для очистки соку від високомолекулярних сполук запропоновано температурну коагуляцію та відстоювання соку. Показник рН соків і сиропів (4,13–6,00) забезпечує хімічну стійкість глюкози під час нагрівання соку сорго і, відповідно, зменшує потребу у підкисленні сусла для оптимального процесу ферментації.

2. Внаслідок відтискання багаси цукрового сорго на вальцевих пресах відбувається механічна руйнація лігноцелюлозних волокон, що полегшує розчинення лігніну та наступний гідроліз целюлози сорго з метою отримання біоетанолу другого покоління. Вміст структурних компонентів у сухій речовині багаси цукрового сорго складає: 44 % – целюлози, 28 % – геміцелюлози та 20 % – лігніну. Запропоновано й обґрунтовано використання кислотомісних відходів дистиляції етанолу із сірчаною кислотою без надлишкового тиску для обробки лігноцелюлози сорго перед ферментативним гідролізом. Здійснено оцінку реального потенційного виходу біоетанолу із сорговоцукрової багаси,

який становить 13 м<sup>3</sup>/т сухої речовини, із розчинних цукрів – 26 м<sup>3</sup>/т сухої речовини.

3. Для приготування середовища для дріжджогенерування до соргоцукрового соку необхідно додавати (відповідно до маси соку) 0,06 % ортофосфорної кислоти та 0,12 % карбаміду; для соргоцукрового сиропу (якістю 72,0 % і вмістом сухої речовини 76,0 %) – 0,15 % ортофосфорної кислоти і 0,34 % карбаміду. Максимальна концентрація культурального середовища із сиропу якістю 72 % є 25 % за сухою речовиною; за 24 год ферментації за максимальної відносної швидкості утворення дріжджами спирту – 0,35 мл×г<sup>-1</sup>×год<sup>-1</sup>.

4. Кількісне співвідношення продуктів перегону культуральних рідин на основі цукрів сорго та меляси має суттєві відмінності, а саме: ізопентанолу в дистилатах, одержаних з продуктів бродіння соргового сиропу, у 3 рази більше, ніж з меляси; ізобутанолу – приблизно у 2 рази більше, що є перевагою соргового сиропу над мелясою як сировини для отримання паливного етанолу.

5. Враховуючи результати вивчення змін у складі продуктів дистиляції культуральної рідини в досліджуваному діапазоні температур та рН ферментації, рекомендовано температура культивування осмофільних дріжджів *S. cerevisiae* Y-M-05 – 30–31 °С, а рН – 4,2.

6. У процесі ферментації з використанням зниженого тиску оптимальним є вакуумування до залишкового тиску 20±5 мм рт. ст. окремого об'єму ферментатора (близько 25 %). Періодичним вакуумуванням, достатнім для кипіння середовища, вдається тримати концентрацію спирту в культуральній рідині у межах 3,5–5,0 % об., що підвищує продуктивність за етанолом на 54,6 %, порівнюючи з ферментацією під атмосферним тиском. У процесі зброджування під зниженим тиском може бути отриманий дистилат із вмістом етанолу 30–35 % об., що значно зменшує енерговитратність дистиляції.

7. Соргоцукрова барда після відгонки бражного дистилату містить золи приблизно у два рази менше, ніж мелясна барда, що дає змогу використовувати соргоцукрову барду як кормову добавку.

8. З розрахунків встановлено, що багаса, яка утворюється під час переробки стебел сорго у біоетанол, може повністю задовольнити потреби заводу в тепловій енергії за її раціонального спалювання, навіть на згущення утвореної барди до 60 % сухої речовини. Завод може працювати цілий рік, використовуючи сконцентрований соргоцукровий сироп. Водночас собівартість безводного біоетанолу із цукрів сорго може становити близько 0,3 дол. США/л.

9. Запропонована на основі отриманих експериментальних даних апаратурно-технологічна схема може бути покладена в основу технологічного регламенту переробки стебел цукрового сорго у біоетанол.

10. Основні технологічні рішення із перероблення цукрового сорго підтверджено на заводі з виробництва біоетанолу ТОВ «Компанія «Еко Енергія», технологію зброджування цукрів сорго із застосуванням зниженого тиску – на ДП «Гайсинський спиртовий завод».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

## Статті у наукових фахових виданнях України,

## у тому числі включених до міжнародних наукометричних баз даних

1. Цыганков С. П., Новак А. Г., Лукашевич К. М., Володько А. И. Использование биоэтанола в составе автомобильных топлив. Відновлювальна енергетика. 2010. Т. 22 (3). С. 85–89. *(Здобувачем взято участь в аналізуванні даних, узагальненні результатів та підготовці статті).*

2. Володько А. И., Новак А. Г., Цыганков С. П. Сахарное сорго – энергетическая культура для производства биоэтанола в Украине. Відновлювальна енергетика. 2012. Т. 29 (2). С. 88–92. *(Здобувачем проведено збір та аналіз даних, узагальнення результатів і написання статті).*

3. Володько А. И., Новак А. Г., Цыганков С. П. Изучение возможности использования сахарного сорго в качестве источника сырья для производства биоэтанола. Відновлювальна енергетика. 2013. Т. 33 (2). С. 85–91. *(Здобувачем проведено вирощування та підготовку біомаси сорго, проведено дослідження, узагальнення результатів та написання статті).*

4. Цыганков С. П., Володько О. І., Ємець А. І., Лантух Г. В., Литвин Д. І., Лукашевич К. М., Новак А. Г., Ожерєдов С. П., Рахметов Д. Б., Співак С. І., Блюм Я. Б. Розробка та випробування технології комплексного трансформування вуглеводного складу рослинної сировини у біоетанол. Наука та інновації. 2013. Т. 9 (4). С. 47–61. *(Здобувачем взято участь у плануванні експериментів, узагальненні результатів та підготовці статті).*

5. Володько О. І., Цыганков С. П. Вирощування *Saccharomyces cerevisiae* M5 на основі соку цукрового сорго в умовах діючого підприємства з виробництва біоетанолу. Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2015. Т. 57 (8). URL: [http://nd.nubip.edu.ua/2015\\_8/33.pdf](http://nd.nubip.edu.ua/2015_8/33.pdf). *(Здобувачем проведено експерименти, аналіз даних, узагальнення результатів та написання статті).*

6. Володько О. І., Лантух Г. В., Лукашевич К. М., Новак А. Г., Цыганков С. П. Ферментування соргоцукрового соку *Saccharomyces cerevisiae* для отримання та аналізування летких біопаливних компонентів. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2016. Вип. 251. С. 382–400. *(Здобувачем взято участь у плануванні та проведенні експериментів, узагальненні результатів та підготовці статті).*

## Стаття у науковому виданні іншої держави,

## включеному до міжнародної наукометричної бази даних Scopus

7. Volodko O. I., Ivanova T. S., Kulichkova G. I., Lukashevych K. M., Blume Ya. B., Tsygankov S. P. Fermentation of sweet sorghum syrup under reduced pressure for bioethanol production. The Open Agriculture Journal. 2020. Vol. 14. P. 235–245. *(Здобувачем проведено експерименти, аналіз даних, узагальнення результатів та взято участь у написанні статті).*

### Патент України на корисну модель

8. **Володько О. І.**, Іванова Т. С., Лукашевич К. М., Лантух Г. В., Блюм Р. Я., Кулічкова Г. І., Циганков С. П., Блюм Я. Б. Патент України № 140723, МПК C10L1/10, C12P7/06. Спосіб отримання біоетанолу при ферментуванні соку цукрового сорго в умовах зниженого тиску. № у 201908505; заявлено 17.07.19; опубліковано 10.03.2020. Бюл. № 5. *(Здобувачем взято участь у плануванні дослідження, проведенні експериментів і написанні опису та формули винаходу).*

### Тези наукових доповідей

9. **Володько А. І.**, Лантух Г. В., Цыганков С. П. Сироп из сока сахарного сорго как сырье для производства биоэтанола в Украине. Біологія рослин і біотехнологія: I Конференція молодих учених, м. Біла Церква, 5–7 жовтня 2011 року. Біла Церква, 2011. С. 106. *(Здобувачем вивчено питання виробництва біоетанолу з сиропу із цукрового сорго, узагальнено, систематизовано результати та підготовлено матеріали для публікації).*

10. **Володько О. І.**, Циганков С. П. Розробка біотехнології отримання паливного етанолу із цукрового сорго. Біотехнологія XXI століття: IV Всеукраїнська науково-практична конференція, м. Київ, 5 квітня 2012 року: тези доповіді. Київ, 2012. С. 27–28. *(Здобувачем вивчено питання розроблення біотехнології отримання паливного етанолу із цукрового сорго, узагальнено та систематизовано результати).*

11. Блюм Я., Цыганков С., **Володько А.** Новое сырье для производства биоэтанола в Украине. 8<sup>th</sup> International Green Energy Conference, Kyiv, June 17–19, 2013: abstracts. Kyiv, 2013. P. 374–376. *(Здобувачем проведено літературний пошук, узагальнено та систематизовано результати, підготовлено матеріали до публікації).*

12. **Volodko A. I.**, Tsygankov S. P. Processing of sweet sorghum into bioethanol. Plant Biology and Biotechnology: 2-nd Conference of Young Scientists, Kyiv, 23–24 December 2013: abstracts. Kyiv, 2013. P. 71. *(Здобувачем розглянуто сировину для виробництва біоетанолу, узагальнено та систематизовано результати).*

13. **Володько О. І.**, Рахметов Д. Б., Циганков С. П., Блюм Я. Б. Технологічні аспекти перероблення сорго цукрового в біоетанол. Біологічні ресурси і новітні біотехнології виробництва біопалив: наукова конференція, м. Київ, 9–11 вересня 2014 року: тези доповіді. Київ, 2014. С. 162–166. *(Здобувачем розглянуто технологію перероблення сорго цукрового в біоетанол, систематизовано результати, сформульовано основні висновки, підготовлено матеріали до публікації).*

14. **Volodko O.**, Tsygankov S. The main differences between biotechnologies of fuel alcohol obtaining from sweet sorghum and molasses. Actual Problems of Microbiology and Biotechnology: International conference of young scientists, Odesa, June 1<sup>st</sup> – 4<sup>th</sup>, 2015: abstracts. P. 34. *(Здобувачем вивчено питання виробництва біоетанолу при спиртовому зброджуванні цукровмістної сировини, узагальнено та систематизовано результати).*

15. **Володько О. І.**, Циганков С. П. Встановлення режимів вакуумування при спиртовому зброджуванні цукровмісної сировини дріжджами. Біотехнологія XXI століття: XI Всеукраїнська науково-практична конференція, м. Київ, 21 квітня 2017 року: тези доповіді. Київ, 2017. С. 17. *(Здобувачем встановлено режими вакуумування при спиртовому зброджуванні цукровмісної сировини дріжджами, узагальнено отримані аналітичні результати, сформульовано висновки, підготовлено матеріали до публікації).*

16. **Володько О. І.**, Іванова Т. С., Циганков С. П. Шляхи використання сорго цукрової багаси при виробництві біоетанолу. Біологія рослин та біотехнологія: Третя конференція молодих учених, м. Київ, 16–18 травня 2017 року: тези доповіді. Київ, 2017. С. 57. *(Здобувачем розглянуто шляхи використання сорго цукрової багаси при виробництві біоетанолу, узагальнено та систематизовано результати).*

17. **Володько О. І.**, Кулічкова Г. І., Лантух Г. В., Лукашевич К. М., Циганков С. П. Застосування вакуумування при спиртовій ферментації цукровмісної сировини дріжджами *Saccharomyces cerevisiae*. Біотехнологія: звершення та надії: VII Міжнародна науково-практична конференція Національного університету біоресурсів і природокористування України, м. Київ, 29–30 листопада 2018 року: тези доповіді. Київ, 2018. С. 39–40. *(Здобувачем вивчено застосування вакуумування при спиртовій ферментації цукровмісної сировини дріжджами, узагальнено та систематизовано результати).*

18. **Володько О. І.**, Іванова Т. С., Лукашевич К. М., Циганков С. П. Перероблення багаси і вінаси цукрового сорго при виробництві біоетанолу. Біотехнологія XXI століття: XIV Всеукраїнська науково-практична конференція, м. Київ, 20 травня 2020 року: тези доповіді. Київ, 2020. С. 143. *(Здобувачем вивчено результати перероблення багаси і вінаси цукрового сорго при виробництві біоетанолу, узагальнено результати, оформлено висновки).*

19. **Володько О. І.**, Циганков С. П. Технологічні рішення з виділення, очищення та зберігання соку цукрового сорго для подальшої ферментації з метою отримання біоетанолу. Актуальні проблеми енергетики та екології: Всеукраїнська науково-технічна конференція, м. Одеса, 29–30 вересня 2020 року: тези доповіді. Одеса, 2020. С. 241–245. *(Здобувачем розглянуто технологічні рішення з виділення, очищення та зберігання соку цукрового сорго для подальшої ферментації з метою отримання біоетанолу, узагальнено та систематизовано результати, підготовлено матеріали до публікації).*

## АНОТАЦІЯ

**Володько О. І. Розробка технологічних основ отримання біоетанолу із цукрового сорго.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 03.00.20 «Біотехнологія». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2021.



Дисертацію присвячено вивченню особливостей підготовки та спиртового зброджування цукрів соку та сиропу цукрового сорго дріжджами *Saccharomyces cerevisiae*, аналізу дозрілої культуральної рідини, барди та багаси цукрового сорго.

Науково обґрунтовано технологічні рішення з отримання, очистки соку, підготовки ферментаційного сусла, оптимізовано умови спиртового зброджування цукровмісного соку та сиропу цукрового сорго. Розроблено технологічну схему виробництва біоетанолу з цукрового сорго з дотриманням сучасних техніко-економічних вимог. Адаптовано біотехнологію зброджування цукровмісного соку цукрового сорго до виробництва біоетанолу в Україні з бурякоцукрової меляси.

Для підвищення ефективності та продуктивності зброджування цукрів сорго рекомендовано використовувати двопотокове збродження з підживленням середовища більш густим суслим. Показано, що використання вакуумування підвищує інтенсивність зброджування, проте має і суттєві вимоги до ферментаційного обладнання та контролю процесу.

Розроблено розрахунок соргоцукрового кластера матеріальних потоків та енергетичних потреб для отримання вихідних даних для проектування заводу, розраховано собівартість виробництва біоетанолу із цукрового сорго (0,3 дол. США/л). Встановлено можливість повного самозабезпечення заводу тепловою енергією завдяки спалюванню багаси стебел сорго.

Вивчено хімічний склад і методи переробки побічних продуктів переробки стебел цукрового сорго у біоетанол. Встановлено кормову цінність багаси сорго.

**Ключові слова:** біоетанол, цукрове сорго, соргоцукровий сік, соргоцукровий сироп, лігноцелюлоза, дріжджогенерування, ферментація, знижений тиск, барда, багаса.

## АННОТАЦИЯ

**Володько А. И. Разработка технологических основ получения биоэтанола из сахарного сорго.** – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 03.00.20 «Биотехнология». Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Киев, 2021.

Диссертация посвящена изучению особенностей подготовки и спиртового сбраживания сахаров сока и сиропа сахарного сорго дрожжами *Saccharomyces cerevisiae*, анализу зрелой культуральной жидкости, барды и багассы сахарного сорго.

Научно обоснованы технологические решения по получению, очистки сока, подготовке ферментационного сусла, оптимизированы условия спиртового сбраживания сахаросодержащего сока и сиропа сахарного сорго. При приготовлении среды для дрожжегенерации к соку сахарного сорго рекомендовано добавлять (к массе) 0,06 % ортофосфорной кислоты

и 0,12 % карбамида; для сиропа сахарного сорго (качеством 72,0 % и содержанием сухого вещества 76,0 %) – 0,15 % ортофосфорной кислоты и 0,34 % карбамида. Максимальная концентрация культуральной среды из сиропа качеством 72 %, составляет 25 % по сухому веществу; за 24 часа ферментации максимальная относительная скорость образования дрожжами спирта составляет  $0,35 \text{ мл} \times \text{г}^{-1} \times \text{ч}^{-1}$ . Сухое вещество сиропов может содержать значительно большую долю сбраживаемых сахаров, чем сухое вещество мелассы, произведен расчет таблицы для снижения исходной концентрации сухого вещества.

Разработана технологическая схема производства биоэтанола из сахарного сорго с учетом современных технико-экономических требований. Адаптирована биотехнологию сбраживания сахаросодержащего сока сахарного сорго к уже существующему производству биоэтанола в Украине из свеклосахарной мелассы.

Для повышения эффективности и производительности сбраживания сахаров сорго рекомендуется использовать двухпоточное сбраживание с подпиткой среды более густым суслем. Показано, что использование вакуумирования повышает интенсивность брожения, однако имеет и существенные требования к ферментационному оборудованию и к контролю процесса. При ферментации с использованием пониженного давления оптимальным является вакуумирование до остаточного давления 25 мм рт. ст. отдельного объема ферментера (около 25 %), при условии постоянного прохождения через него культуральной среды и его подогрева до 36 °С, что упрощает аппаратное обеспечение процесса. Периодическим вакуумированием, достаточным для кипения среды, удастся держать концентрацию спирта в культуральной жидкости в пределах 3,5–5,0 % об., что повышает производительность по этанолу на 54,6 %, по сравнению с ферментацией под атмосферным давлением. В процессе сбраживания под пониженным давлением может быть получен дистиллят с содержанием этанола 30–35 % об., что значительно уменьшает энергозатратность дистилляции.

Сделан расчет для кластера по переработке сахарного сорго материальных потоков и энергетических потребностей с целью получения исходных данных при проектировании завода, рассчитана себестоимость биоэтанола из сахаров сахарного сорго (0,3 дол. США/л). Установлена возможность полного самообеспечения завода тепловой энергией за счет сжигания багассы стеблей сорго даже при условии упаривания всей барды до 60 % сухого вещества. При этом энергетический баланс находится на нуле – вся багасса будет израсходована.

Изучены химический состав и методы переработки побочных продуктов переработки стеблей сахарного сорго в биоэтанол. Установлена кормовая ценность багассы сорго.

**Ключевые слова:** биоэтанол, сахарное сорго, сок сахарного сорго, сироп сахарного сорго, лигноцеллюлоза, дрожжегенерирование, ферментация, пониженное давление, барда, багасса.

## ANNOTATION

**Volodko O. I. Development of Technological Bases for Bioethanol Obtaining from Sweet Sorghum.** – The qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for Scientific degree in Technology, specialty 03.00.20 «Biotechnology». National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the study of the peculiarities of preparation and alcoholic fermentation of sugars of sweet sorghum juice and syrup by yeast *Saccharomyces cerevisiae*, analysis of mature culture liquid, bard and bagasse of sweet sorghum.

Technological solutions for obtaining, purifying juice, preparation of fermentation wort are scientifically substantiated, conditions of alcohol fermentation of sugar-containing juice and sweet sorghum syrup are optimized. The technological scheme of bioethanol production from sweet sorghum is developed taking into account modern technical and economic requirements. The biotechnology of fermentation of sugar-containing sweet sorghum juice has been adapted to the already existing bioethanol productions on the territory of Ukraine which are working on sugar beet molasses.

It was recommended to use two-stream fermentation with feeding the medium with a thicker wort for the increasing the efficiency and productivity of sorghum sugar fermentation. It was shown that the use of vacuum increases the intensity of fermentation, but also has significant requirements for fermentation equipment and process control.

The calculation of the sweet sorghum cluster of material flows and energy needs to obtain initial data in the design of the plant was performed, the possible production cost of bioethanol from sweet sorghum was calculated (\$ 0.3/l). The possibility of full self-sufficiency of the plant with thermal energy due to the burning of sorghum stalks was established.

The chemical composition and methods of processing by-products of sweet sorghum stalks into bioethanol have been studied. The fodder value of sorghum bagasse was established.

**Key words:** bioethanol, sweet sorghum, sweet sorghum juice, sweet sorghum syrup, lignocellulose, yeast generation, fermentation, reduced pressure, bard, bagasse.

Підписано до друку 12.04.2021 року.      Формат 60x84\16  
Ум. друк. арк. 0,9                                      Обл.-вид.арк. 0,9  
Наклад 100 прим.                                      Зам. № 210288

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі НУБіП України  
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041, тел.: 527-81-55, e-mail: nubip\_druk@ukr.net  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4097 від 17.06.2011







