

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
“__” _____ 2023р.
Зав. кафедри к.т.н., доцент
(науковий ступінь, вчене звання)
А.В. Войтік
(підпис) (ініціали, прізвище)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА (дипломний проект)
магістр
(назва освітнього ступеня)

тема роботи **«Розробка технологічних основ отримання біоетанолу
із цукрового сорго»**

Виконав: студент 2 курсу, групи 21м-ім
освітньої програми магістр
спеціальності _____
208 «Агроінженерія»
Осадчий О.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник к.т.н. доцент Шевчук В.В.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

м. Умань – 2023 рік

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 ЦУКРОВЕ СОРГО – СИРОВИНА ДЛЯ СПИРТОВОГО ЗБРОДЖУВАННЯ ВПАЛИВНИЙ БІОЕТАНОЛ.....	6
1.1 Перспективи заміни цукровим сорго традиційної сировини для виробництва біоетанолу в Україні	6
1.2 Використання середовищ для зброджування	13
РОЗДІЛ 2 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	15
2.1 Апаратурно-технологічна схема переробки стебел цукрового сорго	15
2.2 Стебла, сік та багаса цукрового сорго	19
2.3 Приготування живильних середовищ цукровмісних субстратів	21
2.4 Опис установок для вакуумної ферментації.....	22
2.5 Газохроматографічні методи аналізу етанолу.....	25
2.6 Хімічний склад соку та сиропу цукрового сорго. Порівняння з мелясою	26
2.7 Оброблювання результатів дослідів.....	30
РОЗДІЛ 3 ОХОРОНА ПРАЦІ	31
3.1 Організація заходів щодо захисту працівників на підприємстві	31
3.2 Заходи охорони праці при роботі з установкою по виготовленню біоетанолу.....	32
3.3 Висновки по розділу.....	32
РОЗДІЛ 4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ...	33
4.1 Дослідження утворення біоетанолу	33
4.2 Аналіз можливих шляхів використання біоетанолу.	37
4.3 Розрахунок економічної доцільності виробництва біоетанолу із цукрового сорго	42
ВИСНОВКИ	48
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	49

РЕФЕРАТ

Осадчий О.О. Розробка технологічних основ отримання біоетанолу із цукрового сорго (Кваліфікаційна робота, Уманський національний університет садівництва, 2023: пояснювальна записка на 53 сторінках, у т.ч. 4 розділів, 19 рисунки, 6 таблиць, 46 джерела літератури).

Кваліфікаційна робота присвячена розробці біотехнології комплексного перероблення стебел цукрового сорго в паливний біоетанол, обґрунтуванню технологічних рішень, оптимізації умов метаболізму, створенню технологічної схеми виробництва з урахуванням сучасних техніко-економічних вимог.

Мета роботи розроблення технології переробки стебел цукрового сорго для забезпечення виробництва паливного біоетанолу із перспективної рослинної сировини.

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

Предмет дослідження – сік і сироп із цукрового сорго, процес їх ферментування для отримання біоетанолу.

Ключові слова: БІОЕТАНОЛ, ЦУКРОВЕ СОРГО, СОРГОЦУКРОВИЙ СІК, СОРГОЦУКРОВИЙ СИРОП, ЗНИЖЕНИЙ ТИСК.

ВСТУП

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 CO₂ 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).

РОЗДІЛ 1

ЦУКРОВЕ СОРГО – СИРОВИНА ДЛЯ СПИРТОВОГО ЗБРОДЖУВАННЯ В ПАЛИВНИЙ БІОЕТАНОЛ

1.3 Перспективи заміни цукровим сорго традиційної сировини для виробництва біоетанолу в Україні

Основною сировиною для рентабельного виробництва паливного біоетанолу в світі є крохмальовмісні (зерно) або цукровмісні (цукрова тростина, цукровий буряк) сільськогосподарські культури [18]. Для їх обробітку необхідні відповідні земельні ресурси і кліматичні умови. На території України культивуються як традиційні крохмало- і цукровмісні культури (кукурудза, пшениця, ячмінь, цукровий буряк) так і альтернативні, наприклад, цукрове сорго, топінамбур, цикорій [19, 20]. Найбільш дешевий біоетанол в світі виробляється із цукрової тростини. Ця культура дає найбільший вихід цукрів з гектара посівів – 10,5 т/га [21], а при комплексному внесенні добрив вихід може досягати 18 т/га і вище [22]. Його вуглеводи не вимагають гідролізу перед спиртним бродінням, а отримання теплової енергії для забезпечення технологічних процесів досягається шляхом спалювання цукровотростинної багаси.

Цукрова тростина – теплолюбива культура, яку неможливо культивувати північніше від 30-ої паралелі. По врожайності і технологічним властивостям до нього наближається цукрове сорго, яке можна вирощувати в помірному кліматі, – аж до 55-ої паралелі (широта Мінська). У табл. 1.1 приведено порівняння цукрового сорго і цукрової тростини за основними технологічними показниками [23].

Цукрове сорго не нова культура для України і країн СНД, його здавна обробляли в посушливих регіонах СРСР як кормову культуру [24–27]. Зараз ведуться роботи по виведенню нових високоцукристих і скоростиглих сортів цукрового сорго, придатних для вирощування практично на всій території помірного кліматичного поясу [28, 29], а також вивчаються можливі варіанти

переробки цукрів сорго [30, 31]. Ізвнесених до державного реєстру сортів рослин України високими виходами цукрів з одиниці площі характеризуються такі сорти як Ювілейний, гібрид Медовий, Некратний, Силосне 42 та інші [32–35]. Очищені цукровмісні сиропи, отримані із соку цукрового сорго, можуть використовуватися в харчовій промисловості (для отримання солодких напоїв, підсолоджувачів кондитерських і хлібобулочних виробів і т. п.) [31, 36, 37].

Таблиця 1.1

Порівняння цукрового сорго і цукрової тростини за основними технологічними показниками (Індія)

Параметри	Цукрова тростина	Цукрове сорго
Потреба в добривах %	100	35 – 40
Продуктивність біомаси т/га за сезон	65 – 80	42 – 55 (один урожай в рік) 84 – 110 (два урожаї в рік)
Концентрація зброджуваних цукрів в стеблі % мас.	10,0 – 14,0	9,2 – 12,0
Вихід зброджуваних цукрів, т/га за сезон	6,0 – 10,5	3,6 – 6,2 (один урожай в рік) 7,2 – 12,4 (два урожаї в рік)
Багаса вологістю 50 % мас., т/га за сезон	19 – 24 (30 % від маси стебла)	10 – 14 (один урожай в рік 25 % від маси стебла) 20 – 28 (два урожаї в рік)

Порівняння потенціалу різних видів сировини для виробництва біоетанолу представлено в табл. 1.2.

Використання зерна (кукурудзи, пшениці) і цукрового буряка як сировини для виробництва паливного етанолу обмежується двома важливими моментами – високою потребою цих культур у воді і високими затратами на внесення добрив і обробку посівних площ. До того ж цукри і крохмаль, що містяться в традиційних сільськогосподарських культурах, розглядаються насамперед як продукти харчового призначення. Тому виробництво рідких біопалив із цих культур викликає обґрунтований опір в суспільстві, викликаний побоюванням конкуренції між продовольством і паливом. Таким чином, необхідні культури, які не загрожували б продовольчій безпеці, могли швидко розвиватися при відносно низькому споживанні

води і продукувати значну кількість вуглеводів, що легко піддаються зброджуванню [38].

Таблиця 1.2

Порівняння потенціалів деяких рослин як сировини для отримання біоетанолу [39]

Вид рослини	Вуглеводи сировини	Гідроліз	Мікроорганізми	Потенціал виробництва біоетанолу, м3 /га в рік
Цукровий буряк	Сахароза	немає	<i>Saccharomyces</i>	4,1 – 5
Пшениця	Крохмаль	так	<i>Saccharomyces</i>	1,75 – 2
Кукурудза	Крохмаль	так	<i>Saccharomyces</i>	2 – 2,5
Картопля	Крохмаль	так	<i>Saccharomyces</i>	3 – 5
Топінамбур	Інулін	так/ні	<i>Kluyveromyces</i> <i>Saccharomyces</i>	2,5 – 3
Цукрова тростина	Сахароза	немає	<i>Saccharomyces</i>	5,3
Цукрове сорго	Сахароза, глюкоза, фруктоза	немає	<i>Saccharomyces</i>	6*

Цукрове сорго може зростати на засолених ґрунтах, добре адаптовано до напівпосушливих регіонів і використовує воду ефективніше – 310 кг води/кг сухого матеріалу, в порівнянні, наприклад, із кукурудзою – 370 кг води/кг сухого матеріалу [18, 27]. За іншими джерелами, потреба сорго у воді вдвічі менше ніж у кукурудзи [40]. Споживання води цукровим буряком майже не відрізняється від сорго (табл. 1.3), але по обробітку цукрове сорго менш трудомістке в порівнянні з цукровим буряком [41–44].

При сильній засусі цукрове сорго входить в стан анабіозу. Його листя скручується, сповільнюється ріст, але після випадання опадів культура поновлює свій розвиток і гарантовано дає урожай 40 – 60 т фітомаси з гектара. Кукурудза ж в умовах засухи зупиняє свій ріст і вихід зеленої фітомаси знижується до 11 – 15 т/га [28, 45, 46].

Як видно із табл. 1.3, сорго економніше витрачає воду на ріст біомаси і на утворення цукрів в стеблі, воно більш посухостійке. Головною перевагою є

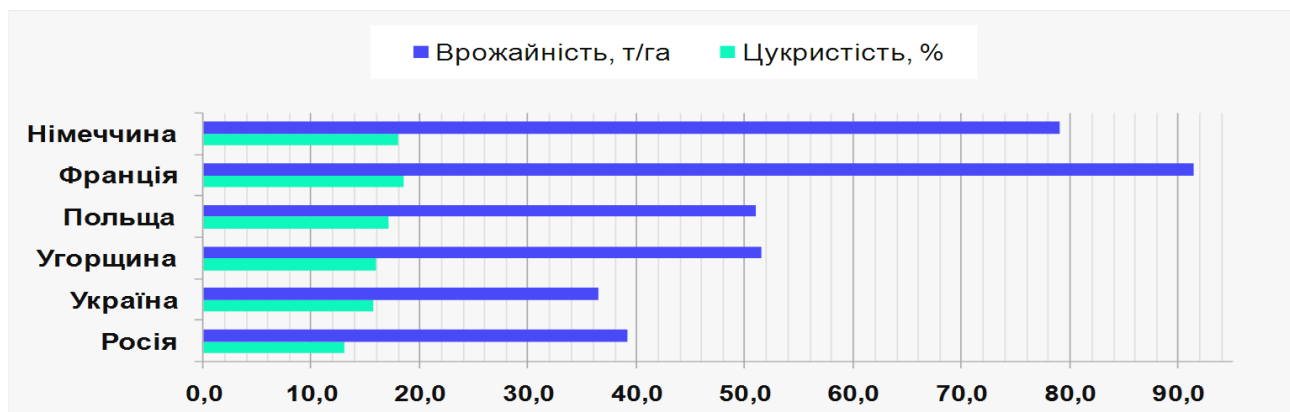
можливість отримати майже в 3 рази більше етанолу з гектара посівів сорго, ніж з гектара кукурудзи (табл. 1.2).

Таблиця 1.3

**Коефіцієнти використання води деякими сільськогосподарськими
рослинами**

Культура	Коефіцієнт використання води (кг води/кг сухої речовини)
Цукрове сорго [47]	310
Кукурудза [48]	370
Цукровий буряк [49]	~ 325
Пшениця [27]	513

Потенціал цукрового буряка, як сировини для виробництва етанолу, близький до цукрового сорго (табл. 1.2). Але в посушливих регіонах сіяти цукровий буряк на богарі недоцільно. Врожайність і технологічні показники цукрового буряка дуже сильно залежать від культури землеробства, кліматичних умов, застосування селекційних сортів і істотно відрізняються в різних країнах (рис. 1.1). Отримання високих урожаїв вимагає великих витрат праці (2 або 3 прополки, боротьба з комахами-шкідниками) і внесення добрив [41].



Примітка: джерело даних по Україні і Росії – державні служби статистики [<http://www.ukrstat.gov.ua/>, <http://www.gks.ru/>], джерело даних по європейських країнах – статистична служба Європейського союзу [<http://epp.eurostat.ec.europa.eu>] і зарубіжна сільськогосподарська служба сільськогосподарського департаменту США [50].

Рис. 1.1. Характеристики врожайності цукрового буряка в деяких країнах Європи (т/га).

В Україні в сприятливий для цукрового буряка 2011 рік врожайність цієї культури склала 36,5 т/га при цукристості 15,7 %. З гектара площі вихід цукрів склав в середньому 5,73 т. Теоретично з 1 т цукру можна отримати 0,682 м³ етанолу, стосовно гектара цукрового буряка складе 3,9 м³. З цукрового ж сорго в умовах України можна отримати до 6 м³ етанолу з гектара (табл. 1.2).

В Україні посівні площі під цукровий буряк в період 1990 – 2011р.р. знизилися на 1070 тис. га (на 66,6 %) і складали 537 тис. га. Також зросли витрати праці як на 1 га так і на 1 т коренеплодів – з 1996 р. в порівнянні з 1990 р. затрати праці зросли, відповідно, в 1,12 і 1,86 разів [51]. Відповідно в Україні скорочується кількість доступної м'яси – рис. 1.2. Для подальшого розвитку галузі необхідні пошуки іншого доступного джерела вуглеводів.

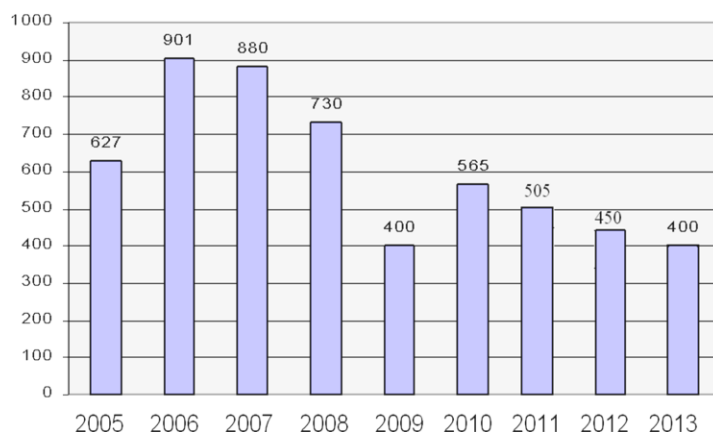


Рис. 1.2. Скорочення виробництва м'яси із цукрового буряку в Україні (дані з виробництва цукру на сайті державної статистики України).

Таким чином, на сьогодні, цукровий буряк в Україні програє цукровому сорго як джерелу сировини для виробництва біоетанолу. До того ж при переробці стебел цукрового сорго отримана багаса може використовуватися як паливо для самозабезпечення енергетичних потреб заводу, а у разі переробки цукрового буряка така можливість відсутня.

У структурі собівартості біоетанолу близько 70 % займає сировина, а 20 % – енергоносії [3]. Тому, враховуючи можливість енергетичного самозабезпечення підприємства, цукрове сорго економічно істотно привабливіше за цукровий буряк і кукурудзу для вирішення проблем виробництва альтернативного палива і збільшення зайнятості в сільському господарстві [13].

До недоліків цукрового сорго як цукровмісної сировини можна віднести обмеженість термінів зберігання стебел і підвищена чутливість до заморожувань в ґрунті ($-2...-4\text{ }^{\circ}\text{C}$), що для цукрового буряка не є критичними моментами. Заморожування і розморожування зелених стебел цукрового сорго призводить до швидкого розкладання цукрів. Теж саме спостерігається і при зберіганні зрізаних стебел без заморожування. При нетривалому зберіганні зрізаних стебел сорго (2 дні) в закритих приміщеннях втрат цукрів не спостерігається [31, 52]. В той же час Востоков [27] вказує, що очищені від листя і волоті стебла, при правильному укладанні в скирти (щоб не було самонагрівання) і укритті зберігаються протягом 4 – 5 місяців без скільки-небудь помітної втрати соку і цукристості.

Для економії коштів та енергії при транспортуванні сорго-сировини на завод і для інтенсифікації процесу збирання врожаю з поля можливе використання пересувних вальцевих пресів і випарників [27, 53], або гвинтових пресів [54], які працюють безпосередньо в полі біля плантації сорго. У роботі [53] вказується про позитивний результат зброджування сухими дріжджами, що вносились безпосередньо до нативного соку цукрового сорго, середовища в пластикових бутлях (3,8 л) в польових неконтрольованих умовах. Досягнута концентрації етанолу 79,6 г/л за 120 годин, ступінь перетворення цукрів склав 90 – 95,6 % від теоретичного виходу. Подібний підхід дозволяє перевести цукри сорго в спирт безпосередньо в полі, без особливих виробничих витрат, і тим самим убезпечити втрати цукрів при їх споживанні сторонніми мікроорганізмами – отриману зрілу культуральну рідину (бражку) поступово можна перевозити у відділ дистиляції на завод.

Також розробляються методи так званої твердофазної ферментації стебел цукрового сорго, які дозволяють ферментувати безпосередньо подрібнені вологі стебла або висушивши стебла до стану сіна, пакувати їх і зберігати протягом тривалого часу. Для переробки в етанол сухі стебла зволожують, подрібнюють, вносять необхідні солі, дріжджі і проводять анаеробну ферментацію (бродіння). Після завершення процесу бродіння стебла віджимаються на пресах, віджата зріла культуральна рідина прямує на дистиляцію спирту [55–57]. На нашу думку, цей

метод досить енергозатратний і потребує великих капітальних витрат на устаткування.

Вміст сахарози в зрізаних стеблах швидко зменшується за рахунок власної (ендогенної) інвертазної активності. Відповідно нарастає кількість глюкози і фруктози. Через добу після зрізання стебел зниження кількості сахарози може складати 25...35 %. Зниження виходу соку може відбуватися за рахунок випаровування вологи з поверхні стебел (висихання) при зберіганні. Подібні процеси можуть відбуватися і в полі, коли рослина повністю дозріла і «простоє». Для досягнення максимального виходу соку із стебел і збереження урожаю цукрів цукрове сорго необхідно прибирати з поля вчасно; частину отриманого соку відразу ж переробляти в етанол, а решту згущувати до сиропів і спрямовувати на зберігання. У північних регіонах України для забезпечення збирання врожаю до заморозків доцільно вирощувати скоростиглі сорти цукрового сорго.

До недоліків біомаси як сировини для одержання моторних палив відноситься розпорошеність її запасів і необхідність підтримки екологічної рівноваги. Внаслідок розпорошеності і високої вологості біомаси, затрати на її збір і транспортування можуть складати 50 % від вартості кінцевого продукту [3, 54]. Тому вдосконалення технології переробки біомаси не завжди в змозі значно знизити собівартість палива. Тут необхідні заходи з інтенсифікації та здешевлення вирощування і збору врожаю сировини.

Отже, для організації виробництва біоетанолу на тривалий виробничий сезон необхідно організувати раціональне та правильне зберігання сировини цукрового сорго. Для цього доцільно: 1) на початковому етапі планувати виробництво на термін збиральних робіт стебел сорго; 2) висівати сорго в різні періоди або вирощувати сорти сорго з різним вегетаційним періодом дозрівання.

1.4 Використання середовищ для зброджування

Одним з технологічних прийомів здешевлення виробництва біоетанолу вважається використання технології зброджування середовища підвищеної густини (VHG), таким чином знижується вартість виробництва [65]. Термін «густина» (фактично відносна маса) зазвичай використовується у промисловості бродіння, щоб вказати вміст розчинних речовин в середовищі [65, 66, 67]. Стандартно, етанольне бродіння проводиться при нормальній густині – ферментаційне середовище містить 20–24 % розчинних речовин.

Так при ферментації соку цукрового сорго в умовах VHG 28 % СР в культуральному середовищі отримали концентрацію етанолу 15,28 % об [68]. Для підвищення густини використовували сахарозу, яку додавали до соку сорго.

З іншого боку, ферментації з високим вмістом цукрів у культуральному середовищі вважаються непрактичними через проблеми із життєздатністю дріжджів та можливістю неповного зброджування чи взагалі припинення процесу бродіння. [69–72]. Фактор інгібування змінюється від глюкози (сахарози) до етанолу в ході протікання процесу спиртового бродіння. Амоге та ін. [73] зазначають, що збільшення осмотичного тиску в середовищі з глюкозою чи сорбітом знижує ріст дріжджів та ступінь ферментації. Lin та ін. [74] вказує на те, що на кінцеве споживання або ступінь перетворення в значній мірі впливає висока доза глюкози (осмотичний тиск); інгібування етанолом має глибокий вплив на продуктивність дріжджових клітин

На рис. 1.4 показані стресові умови оточуючого середовища, що діють на клітини *S. cerevisiae* при спиртовому бродінні.

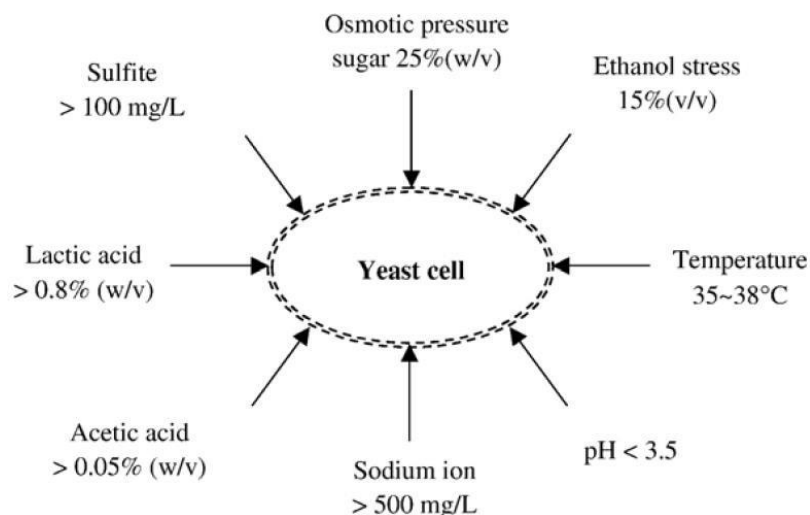


Рис. 1.4. Стресові умови на *S. cerevisiae* при спиртовому бродінні [75].

У роботі [6] проводилось порівняння ефективності зброджування соку цукрового сорго при нормальних умовах (NG) 24 % СР та умовах з високою густиною середовища (VHG) 28 % СР. Автори повідомляють, що продуктивність і вихід етанолу при VHG були значно нижчими від ферментації при NG. Кінцева концентрація етанолу в обох випадках виявлялася однакою. В інших роботах також повідомляється про зупинення процесу бродіння цукровмісної сировини при підвищених концентраціях СР (28 % та 30 %) [63, 64, 68].

У роботі [7] показано позитивний ефект зброджування соків цукрового сорго підвищеної густини при використанні іммобілізації.

Аналізуючи літературу за темою використання технологій VHG [6] можна зробити висновок, що ця технологія є більш надійною та ефективною для застосування щодо крохмалевмісної сировини. Нормальні кінетичні та економічні параметри при бродінні цукровмісної сировини зберігаються приблизно до концентрації СР 24 % (це не є VHG) [6].

Серед існуючих моделей ферментації для досліджень нами обраний періодичний спосіб, тому що він є найпростіший у технологічному (прикладному) плані ніж безперервний процес. Для переходу на культивування з підживленням необхідне вилучення етанолу як головного інгібітора, що утворюється в результаті спиртового бродіння. Одним із способів зняття етанольного інгібування є використання вакууму для відгонки спиртових парів при температурі толерантній для дріжджів.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

2.1 Апаратурно-технологічна схема переробки стебел цукрового сорго

Розроблена схема рис. 2.1 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 (рис. 8) 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.

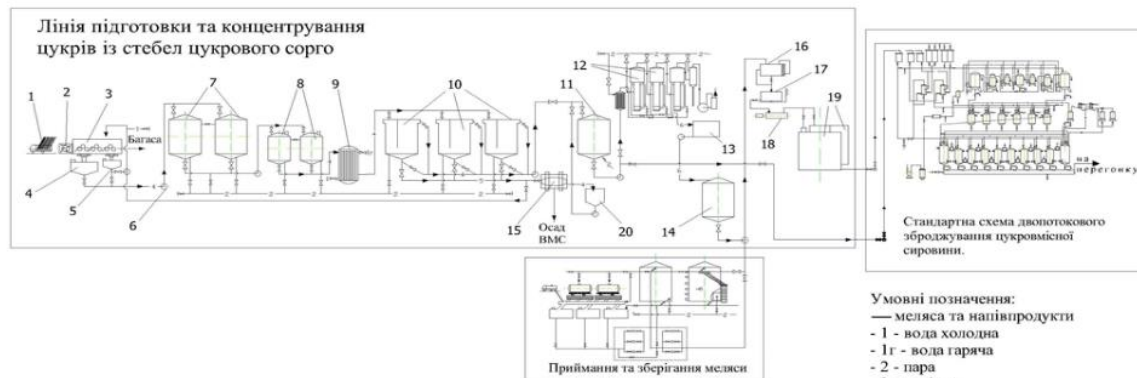


Рис. 2.1. Апаратурно-технологічна схема переробки стебел цукрового сорго окремо та в суміші з мелясою бурякоцукровою у біоетанол:
 1 - стебла з автотранспорту, 2 - подрібнювач стебел, 3 - багатовальцевий прес, 4 - передаточний збірник нативного соку, 5 - збірник соку для рециркуляції промивного розчину стебел, 6 - насоси, 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.

Загальна схема досліджень зображена на рис. 2.2. Та включає отримання фітомаси цукрового сорго, дослідження впливу очищення стебел на якість соку, та підбір методу очистки соку. Після відтискання соку проведено його всебічний аналіз, утворена багаса проаналізована як сировина 2го покоління для отримання етанолу, та оцінено енергетичний вихід при її спалюванні. Проведено дослідження процесів дріжджогенерування та ферментування отриманих соків сорго, здійснено підбір оптимальних параметрів цих процесів. Барда сорго як побічний продукт виробництва аналізувалась на хімічний склад, та методи утилізації.

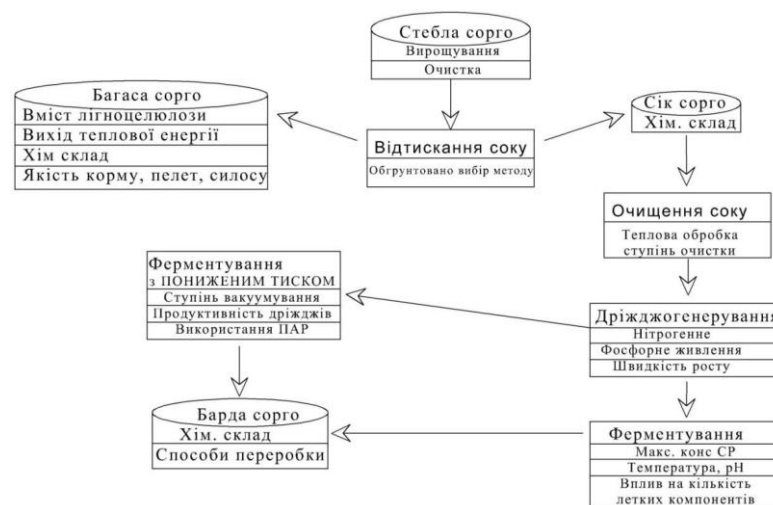


Рис. 2.2. Загальна схема досліджень

Для створення ємності, в якій буде застосовуватись понижений тиск, проводились роботи з нанесення додаткових ребер жорсткості для з метою запобігання зхлопування апарату під вакуумом. Вакуумний чан з меншим діаметром виготовити більш дешевише та простіше. Варіанти з кресленнями вакуумних чанів наведено на рисунку 2.3. На практиці був реалізований варіант із симетричним циліндричним реактором, посиленем від зминання ребрами жорсткості – рис. 2.3 А.

На рис. 2.4 наведена детальна схема включення вакуумного ферментатора в бродильну батарею. Вакуумний чан (1) розміщували біля головного чану з дозрілою культуральною рідиною (2). Порція культуральної рідини по трубопроводам надходить у вакуумний реактор (1), де відбувається закипання з наступним конденсаування водноспиртових парів в конденсаторі (3). Отриманий дистилят має концентрацію близько 40 % об. спиртів.

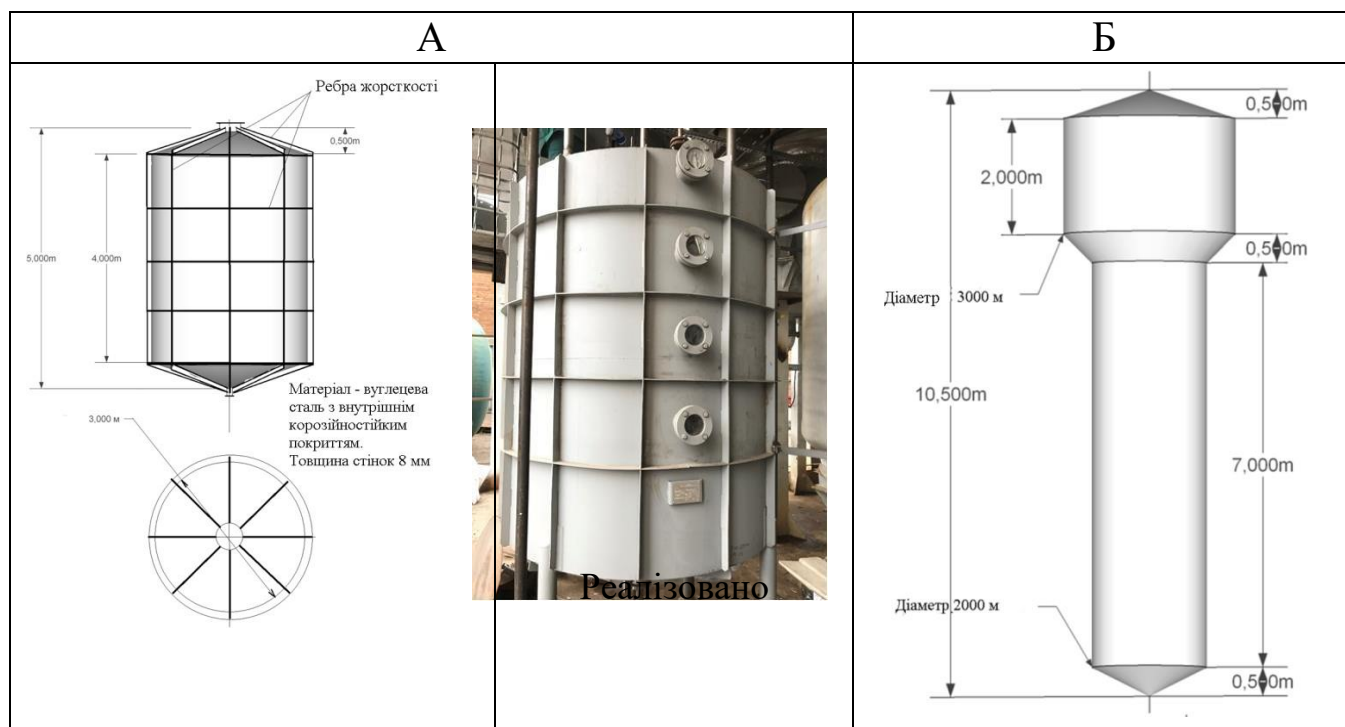


Рис. 2.3. Проекти ємності для вакуумування зрілої культуральної рідини в промислових умовах. А – стандартний чан з навареними ребрами жорсткості, Б – видовжена циліндричноподібна ємність із розширенням.

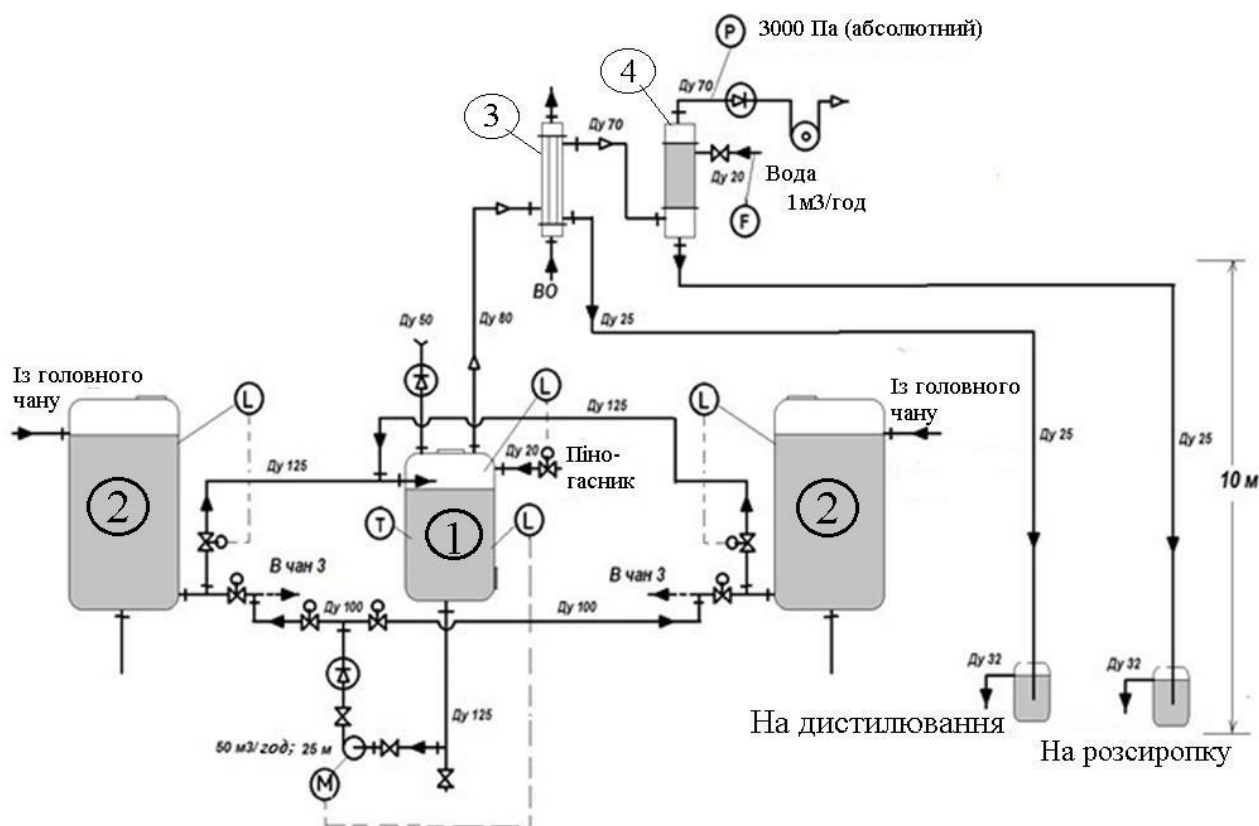


Рис. 2.4. Схема включення вакуумного ферментатора в бродильну батарею. Позначення: ВО – вода охолоджена, ДУ – діаметр умовний.

Після конденсації рідина з 40 % за спиртами надходить далі в передаточний чан та на ректифікацію. Для повного вловлювання парів під час вакуумування застосовували додатковий вловлювач (4). Але для повного вловлювання холодоносії потрібно охолоджувати в холодильних установках до більш низьких температур.

Узагальнення результатів дослідження та розроблення основних положень для створення біотехнології ферментації рослинної сировини під вакуумом для отримання летких біопаливних компонентів: 1) ферментація під зниженим тиском має переваги при необхідності знизити інгібування продуцента леткими продуктами метаболізму; 2) основними достатньо відомими ферментаційними процесами, для яких виправдане використання зниженого тиску, є продукування ацетону, пропанолу, бутанолу та тому подібних летких метаболітів і, з деякими застереженнями, етанолу, так як концентрація цих метаболітів в дозрілій культуральній рідині низька, їх вакуумне вилучення більш економічно вигідне; Переважно використання зниженого

тиску виправдано при порівняно невеликих об'ємах ферментаційного обладнання для спрощення та здешевлення товстостінних конструкцій у вакуумній системі.

Рішення щодо використання зниженого тиску при ферментації має бути прийнято після детального техніко-економічного аналізу з урахуванням вартості виділення і очищення кінцевого продукту.

З екологічної точки зору показана економія водних ресурсів за рахунок провадження більш насичених за цурками середовищ, що ферментуються. При активній фазі бродіння вакуумування середовища, додатково, до вилучення інгібіторів дріжджів (спиртів), відіграє роль термоохолодження, що зменшує витрати на відведення тепла в результаті метаболізму продуцентів.

2.8 Стебла, сік та багаса цукрового сорго

Цукрове сорго (використовували сорти Ботанічний (в лабораторних дослідах) та Мамонт (в умовах заводу) було вирощено на сільгоспугіддях Сумської обл.

Насіння цукрового сорго культивованого сорту (cv.) Рослини *S. saccharatum* сорту

Ботанічний вирощували в помірному континентальному кліматичному поясі, розташованого в північно-східній частині країни, в межах географічного поясу під назвою Полісся. Насіння було висаджено на початку травня в дерново- опідзолений ґрунт з міжряддям 45 см та відстанню між рослинами в ряду 10 см. Посіви збирали у вересні після дозрівання зерна (рис. 2.5 А, Б).

Для оцінки врожайності фітомаси цукрового сорго використовували метод підрахунку маси стебел на квадратах 1м² по діагоналях площі 1 сотка (20 квадратів 1м² по 10 на кожен діагональ) з перерахуванням результатів на 1 га.

Очищені від листя та волоті стебла цукрового сорго віджимали на вальцевому пресі, отримуючи 1,2 кг соку з 3 кг біомаси рис. 2.5 В [12]. Мікробіологічних показники в соках визначили при культивуванні рідю послідовних розведень на відповідних селективних агаризованих середовищах [12] Після віджимання також утворювалась знецукрена соргоцукрова багаса рис. 2.2В. Потім сорговий сік фільтрували і концентрували під вакуумом у роторному випарнику при 60±5 °С (рис. 2.5Г). Концентрований сік (сироп) зберігали при 4 °С.

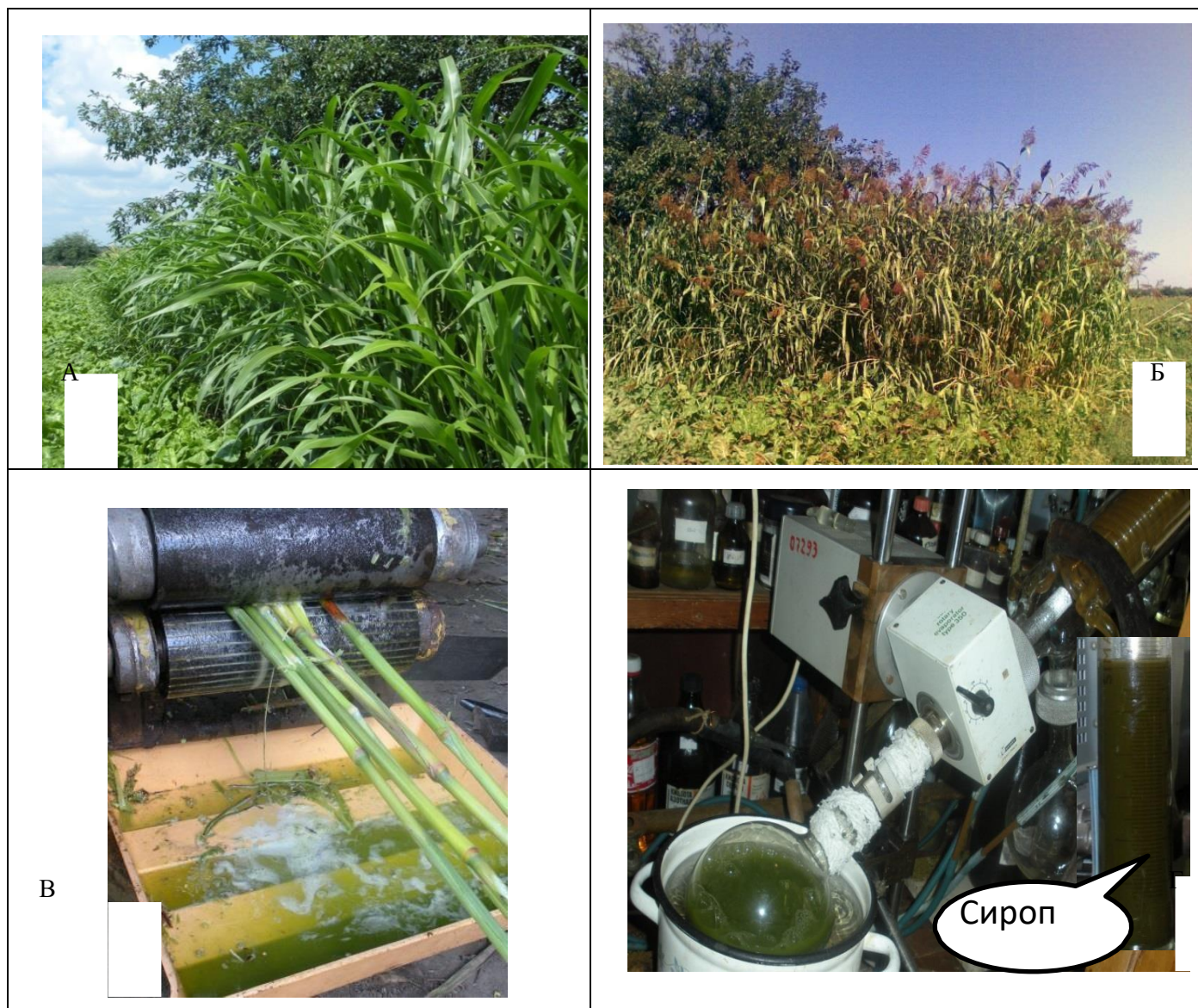


Рис. 2.5. Цукрове сорго, сорт. Ботанічний: А – вирощування в полі (стадія викидання волоті); В – вирощування в полі (стадія фізіологічної стиглості); В – відтискання соку на вальцевому пресі; Г – отримання сиропу сорго на ротаційному випарнику.

Барда сорго цукрове

При отриманні зразків барди після відгонки спирту із зрілої культуральної рідини на основі концентратів соку цукрового сорго ставили мету максимально наблизити якісний та кількісний склад барди до умов біоетанольного заводу. Для цього виходили з наступних міркувань: при одержанні на сирцевих ректифікаційних установках слабоградусні (неміцні) спиртовмісні рідини можуть містити 35 – 65 % об. спирту. При відгонці спирту із зрілої культуральної рідини відганяється 20 % об. рідини (дистиляту), тобто із 1 м³ культуральної рідини утворюється 200 літрів спирту-сирцю та 800 літрів нативної барди (80 % від культуральної рідини) [3, 9].

Для отримання барди, що складала б 80 % об. від зрілої культуральної рідини після перегонки спирту було розраховано очікуваний об'єм дистиляту з урахуванням промивної рідини (додатково вносились в перегонну колбу при перенесенні в неї зрілої культуральної рідини), який контролювався при відгонці спирту.

2.9 Приготування живильних середовищ цукровмісних субстратів

При використанні соргоцукрових сиропів їх розбавляли стерильною водопровідною водою. Різні початкова концентрації соргоцукрового сусла, що піддавались зброджуванню, розраховували на відповідний вміст СР за формулою з ДСТУ 5072:2008 (Сировина цукровмісна для спиртового виробництва. Біологічний метод визначання цукру):

$$a = W \times V \times 1,083 / C_{\text{СР}} ; \quad (2.1)$$

де: а – маса соргоцукрового сиропу чи меляси, яку потрібно розвести водою до відповідного об'єму;

W – вміст СР, що необхідно отримати у вихідній культуральній рідині. Наприклад 20 %;

C_{СР} – вміст СР в сиропі (чи меляси), %. Наприклад, 74 % в соргоцукровому сиропі та 75 % в мелясі;

Засівний матеріал дріжджів вносили в кількостях необхідних для утворення біомаси дріжджів у культуральній рідині 22 – 27 г/л.

2.10 Опис установок для вакуумної ферментації

Засівну культуру для утворення біоетанолу готували у п'яти 3-літрових колбах Ерленмейера з 1,5 л стерильного сиропу сорго 140 г/кг СР та 300 мл посівного матеріалу, культивованого аеробно при 30 ± 1 ° С на роторному шейкері при 150 об / хв. Коли V_{rix} бродильного бульйону зменшився вдвічі на фазі експоненціального росту дріжджів, 15 мл посівного матеріалу переносили в 1-літрову колбу Ерленмейера з робочим об'ємом 600 мл, що включала: розведений сироп сорго 250 г/кг СР з 15 краплями піногасника FD20PK для анаеробної фази спиртового бродіння.

Загальна схема проведення ферментації із зниженим тиском розведеного сиропу сорго в колбах наведена на рис. 2.3. Контрольне бродіння проводили при атмосферному тиску, тоді як дві інші колби піддали вакуумуванню через 18 годин ферментації, щоб дати можливість етанолу накопичитися в культивованому середовищі. Колби №2 та №3 міняли місцями при необхідності проведення вакуумної дистиляції колби №2, що проходила у 10-хвилинний період при зниженому тиску 20 ± 5 мм рт. ст.. У колбі №3 проводилося ферментування при постійному тиску 80 ± 5 мм рт.ст. за виключенням періоду, коли до вакуумної системи підключали колбу №2.

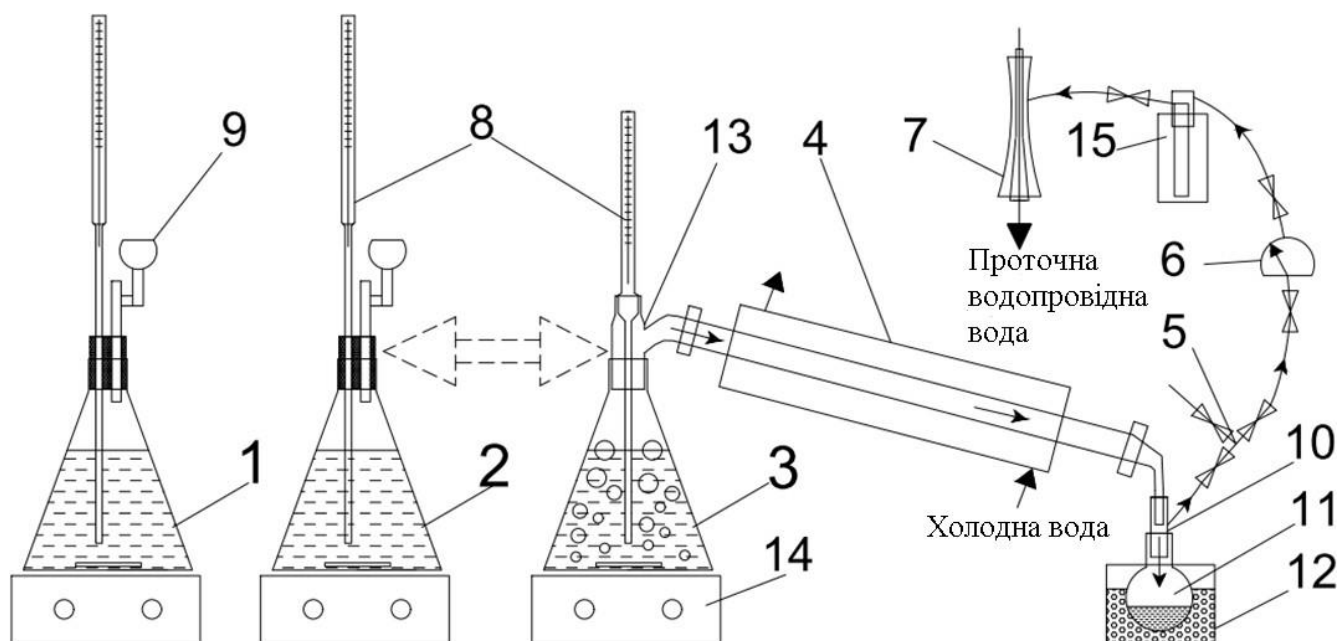


Рис. 2.3. Загальна схема бродіння сиропу, розведеного сорго (всі досліди проводились у трьох повторях): 1 - колба при атмосферному тиску; 2 - колба при атмосферному тиску з повторним (10 хв) підключенням до вакуумного насосу для кипіння середовища та підтримання кипіння (20 ± 5 мм рт.ст.); 3 - колба при постійному зниженому тиску без кипіння (80 ± 5 мм рт.ст.); 4 - холодильник Лібіха; 5 - трійник; 6 - вакуумметр; 7 - водострумний насос; 8 - термометр; 9 - гідравлічний замок; 10 - алонж для збору фракцій під вакуумом; 11 - приймальна колба; 12 – охолоджуюча колба з льодом; 13 - насадка Вюрца; 14 - магнітна мішалка з підігрівом; 15 – склянка-ресивер для запобігання всмоктування води при зміні напрямку тиску.

Для проведення частини експерименту при зниженому тиску (рис. 2.3) колби з'єднували через насадку Вюрца (13) з термометром (8) та холодильником Лібіха (4) (довжина 500 мм). З іншого боку, холодильник приєднували до приймальної колби (11) через алонж для вакуумної екстракції (10). Круглодонну приймальну колбу (11) занурювали в ємність з льодом (12). Знижений тиск підтримували за допомогою водяного струменевого насоса (7), що може генерувати максимальний тиск 10-20 мм рт.ст., швидкість відкачування 0,15 л/с. Водоструминний насос був приєднаний через склянку-ресивер (15), вакуумметр (6) та трійник (5) до алонжу для вакуумної

екстракції (10). Трійник використовувався для контролю тиску та для тривалої стабілізації системи від коливань тиску (залежить від напору вод в мережі та температури в колбі). Рівень вакууму вимірювали за допомогою лабораторного ртутного вакуумметра [131].

Для масштабування процесу використовували ферментатор на 5 л (рис. 2.4).

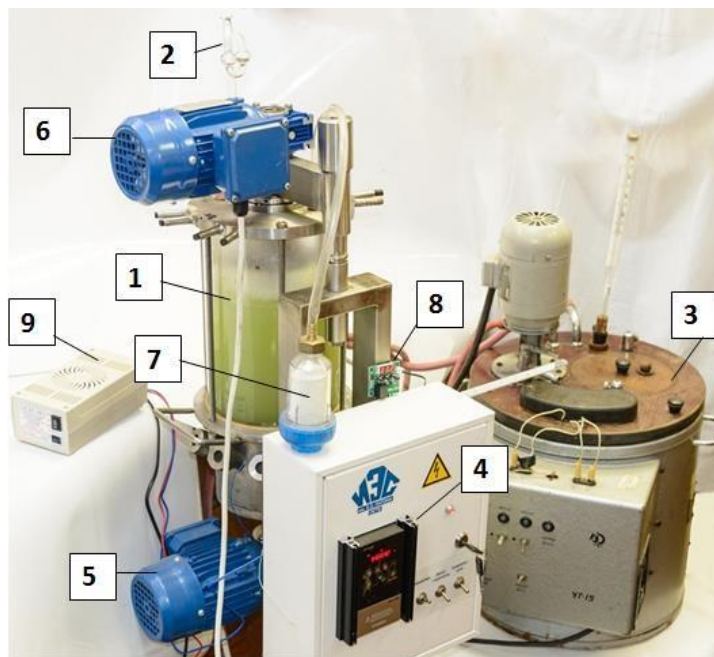


Рис. 2.4. Загальний вигляд реактора ферментації для отримання біоетанолу: 1 - робоча камера біореактора; 2 - гідравлічний замок; 3 - термостат з контурною системою; 4 - блок управління ферментом з повітряним компресором; 5 – електропривід мішалки; 6 - електропривід механічного піногасника; 7 - повітряний фільтр; 8 - блок терморегуляції; 9 - джерело живлення блоку терморегуляції.

Підготовка посівного матеріалу до ферментації в біореакторі була такою ж, як і для експерименту зі зниженим тиском на колбах. Адаптацію посівного матеріалу проводили у ферментері протягом 2 год при 30 ± 1 °C. Інокуляційні дріжджів (22 г/л) з сиропом сорго 140 г/кг СР з додаванням 0,12 % карбаміду та 0,06 % 70% ортофосфорної кислоти вносили в об'єм середовища 2 л. Адаптація та ріст дріжджів відбувався в аеробних умовах шляхом барботування компресором в блоці управління 4 через паперовий фільтр очистки повітря 7 при 3 л/л. Для росту дріжджів в атмосферних умовах використовували гідравлічний замок.

Спиртове зброджування проводили в 5-літровому ферментері з 250 г/кг СР сиропу сорго, рН 4,7 регулювали 1 N сірчаною кислотою в анаеробних умовах при 30 ± 1 °C. Вакуумну екстракцію проводили при 20 ± 5 мм рт.ст. для окремих фракцій середовища 1,25 л у 2-літрових колбах Ерленмейера протягом 10 хв. Після екстракції вміст колби повертали в біореактор для подальшого бродіння.

2.11 Газохроматографічні методи аналізу етанолу

Газохроматографічне визначення етанолу і супровідних летких речовин. Для визначення етанолу у ферментаційній рідині використовують як традиційні методи, а саме ензімометрію [13], діхроматне окиснення [13], колориметрію [14], так і більш сучасні – високоефективну рідинну [14] і газову хроматографію [14]. Усі ці процедури не тільки потребують додаткового часу, а й знижують точність вимірів. Найбільш зручним, точним і швидким методом визначення летких сполук в рідинах зі складною матрицею (а також полімерах) є парофазний (head space) газохроматографічний аналіз (ПФ/ГХ) [14].

Метод заснований на законі Генрі, а саме:

$$H = \frac{C_g}{C_l} ; ; \text{ або } C_g = \frac{H}{I + H} C_o \quad (2.4)$$

$$\text{при } C_l = C_o - C_g \quad (2.5)$$

де, H є константа в законі Генрі;

C_g , C_l і C_o представляють врівноважені концентрації речовин у паровій, рідинній і вихідній речовині відповідно.

У відповідності з (2.4) концентрація речовини у зразку (C_o) може бути отримана вимірюванням C_g у паровій фазі. При цьому необхідно враховувати деякі обставини, що можуть впливати на константу Генрі. Такими можуть бути: висолювання [14], слабка подібність аналіту рідинній матриці, сильна взаємодія летких речовин, підвищена густина матриці, велика концентрація аналіту. Останнє нівелюється розбавленням. Крім того, великий об'єм зразка збільшує час досягнення рівноваги.

Хроматографічне визначення важкодоступних для гідролізу поліцукрів целюлози, проводили у вигляді ацетильованих поліолів [19]. До 25 мл розчину моноцукрів, отриманих внаслідок гідролізу, додаємо 0,07-0,05 г NaBH_4 і витримуємо 1,5-2 год при 20 °С. Надлишок боргідриду натрію розкладаємо оцтовою кислотою до припинення виділення газу, далі розчин концентруємо в ротаційному випарнику при 60 °С. До осаду додаємо 10 мл метанолу, сушимо досуха, повторюємо цю обробку і сушимо поліоли 10-15 хв при 105 °С під вакуумом. Щоб отримати трифторацетильні похідні до висушеного осаду поліолів, що отримані в результаті відновлення моноцукрів додаємо 0,1 мл етилацетату і 0,1 мл ангідриду трифторуксусної кислоти, витримуємо 30 хв при кімнатній температурі і хроматографуємо 2 мкл отриманого розчину.

2.12 Хімічний склад соку та сиропу цукрового сорго. Порівняння з мелясою

У таблиці 2.1 приведені дані по складу соку і сиропу цукрового сорго отримані [18].

Склад продуктів, отриманих із сорго, вирощеного в різних ґрунтово-кліматичних умовах, може істотно відрізнятись. Наприклад, з табл. 2.1 видно, що відмінність в основному полягає в відсотковому співвідношенні сахарози до моносахаридів, а також у вмісті макроелементів (фосфор). Висока очистка соку, здійснена агрофірмою, обумовлює відповідну якість 92 %.

При переробці сиропів, отриманих із соку цукрового сорго або цукрового буряка, культуральне середовище готується так само, як і з меляси [3]. Але слід враховувати, що суха речовина соргоцукрових сиропів може містити значно більшу

частку зброджуваних цукрів, ніж суха речовина меляси. Якщо якість (чистота)

меляси складає близько 60 %, то соків і сиропів 65–85 %. Отже, необхідно знижувати концентрацію СР дріжджового середовища для культивування до 9-11 %.

У табл. 2.2 наведені отримані нами дані для порівняльної характеристики бурякоцукрової меляси та соргового сиропу [17].

На основі порівняльного аналізу встановлено, що за такими показниками, як вміст СР, кількості фосфору, нітратів, а також багатьох макро- та мікроелементів

меляса та сироп цукрового сорго (СЦС) є подібними. Подібно до меляси, у сорговому сиропі найбільше міститься таких елементів як К, Mg, Са. Загальна зольність меляси в 3 рази більша ніж у СЦС – 11,2 % проти 3,7 % відповідно.

Виявлено, що вміст засвоюваного нітрогену в сиропі сорго в 33 разів менший, ніж у мелясі. Отже, для нормальної його ферментації потрібно вносити більше нітрогенного живлення в зброджуване середовище.

Таблиця 2.1

Склад соку і сиропу цукрового сорго

Найменування показника	Одиниця вимірювання	Сік		Сироп	
		Дані ІХБГ	Дані агрофірми «Слов'янський»	Дані ІХБГ	Дані агрофірми «Слов'янський»
Вода	% мас.	86,7±1,0	82,8±1,2	23,8±4,3	30,6±5,2
Сира зола	% у сухій р-ні.	1,2±0,1	0,59±0,08	3,9±0,1	4,1±0,5
Загальний цукор	%	9,7±0,6	16,5±1,0	51,1±3,1	63,7±4,2
Якість	%	73,1±10,0	95,9±12,5	67,1±7,9	91,8±12,9
Моносахариди	%	2,4±0,2	9,42±0,5	16,2±1,0	26,2±1,5
Кальцій (Са)	грам/кг	0,32±0,02	0,56±0,03	1,63±0,08	2,37±0,12
Нітрати	грам/кг	0,30±0,01	0,18±0,01	1,51±0,05	1,48±0,06
Нітроген загальний (N ₂)	грам/кг	0,8±0,01	—	3,5±0,1	—
Фосфор (P ₂ O ₅)	міліграм/кг	38,1±2,2	29,0±1,5	220,2±11,2	128,0±7,1
СР		13,3±1,0	17,2±1,2	76,2±4,3	69,4±5,2

Склад продуктів, отриманих із сорго, вирощеного в різних ґрунтово-кліматичних умовах, може істотно відрізнятися. Наприклад, з табл. 3.14 видно, що відмінність в основному полягає в відсотковому співвідношенні сахарози до моносахаридів, а також у вмісті макроелементів (фосфор). Висока очистка соку, здійснена агрофірмою, обумовлює відповідну якість 92 %.

При переробці сиропів, отриманих із соку цукрового сорго або цукрового буряка, культуральне середовище готується так само, як і з меляси [3]. Але слід враховувати, що суха речовина соргоцукрових сиропів може містити значно більшу частку зброджуваних цукрів, ніж суха речовина меляси. Якщо якість (чистота) меляси складає близько 60 %, то соків і сиропів 65–85 %. Отже, необхідно знижувати концентрацію СР дріжджового середовища для культивування до 9-11 %.

У табл. 3.15 наведені отримані нами дані для порівняльної характеристики бурякоцукрової меляси та соргового сиропу [167].

На основі порівняльного аналізу встановлено, що за такими показниками, як вміст СР, кількості фосфору, нітратів, а також багатьох макро- та мікроелементів меляси та сироп цукрового сорго (СЦС) є подібними. Подібно до меляси, у сорговому сиропі найбільше міститься таких елементів як К, Mg, Са. Загальна зольність меляси в 3 рази більша ніж у СЦС – 11,2 % проти 3,7 % відповідно.

Виявлено, що вміст засвоюваного нітрогену в сиропі сорго в 33 разів менший, ніж у мелясі. Отже, для нормальної його ферментації потрібно вносити більше нітрогенного живлення в зброджуване середовище.

У СЦС виявилось в два рази більше діоксиду сірки 0,076 % проти 0,036 % у мелясі.

Також, у порівнянні з мелясою СЦС має вищу якість 78,0 % у мелясі – 63 %. Крім того, в сиропі цукрового сорго міститься багато інвертного цукру (до 25 %) у мелясі – 1,2 %, що може впливати на перебіг спиртового зброджування, як середовища з гетерогенними цурками [9]. Якість сиропу сорго практично співпадає з якістю вихідного соку, який упарювався в сироп.

Сорговий сироп як і сік має кислу реакцію завдяки органічним кислотам циклу Кребса, які містяться в вакуолях клітин цукрового сорго. При віджиманні соку ці кислоти відповідно обумовлюють його кислу реакцію, зберігаються при випарюванні та переходять в сироп.

Таблиця 2.2

Хімічний склад соргового сиропу, порівнюючи з бурякоцукровою мелясою

Назва показника	Меляса	Сорговий сироп
Суша речовина (за рефрактометром), %	81,45±2,55	72,05±3,21
pH (активна кислотність)	8,1±1,4	5,3±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 ₂ O ₅), %	0,047±0,008	0,022±0,001
SO ₂ , %	0,036±0,004	0,076±0,009
Солі кальцію (CaO), %, загальний зміст	0,5±0,08	0,16±0,01
Сахароза, %:	50,2±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±0,07	1,72±0,09
Нітрати, %	0,16±0,01	0,15±0,01

*n=3, ± стандартне відхилення

Кисле pH соків та сиропів не потребує проведення кислотного антисептування, що є стандартною операцією при переробці меляси. Також відсутність або незначна потреба в підкисленні суслу для оптимального процесу ферментації є економічно вигідною. Кисле pH соків дає змогу піддавати їх тепловій обробці без окислення редукуючи цукрів.

2.13 Оброблювання результатів дослідів

Виміри фізико-хімічних показників та аналізів здійснювали в 3 повторях, на основі яких одержували усередненні значення.

Оброблювання цифрових даних і графічне оформлення результатів дослідів здійснювали за допомогою програмного забезпечення MathCad 14 M035 і MS Office Excel 2010, креслення – в AutoCad 2016..

РОЗДІЛ 3

ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1 Організація заходів щодо захисту працівників на підприємстві

На підприємствах із виробництва продукції тваринництва повинні бути передбачені заходи щодо захисту працюючих від дії небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

У виробничих приміщеннях, де неможливо встановити допустимі нормативні показники мікроклімату через технологічні вимоги до виробничого процесу, повинен бути забезпечений колективний або індивідуальний захист працівників.

У разі відсутності технічної можливості зниження шуму на робочих місцях до гранично допустимих величин (не більше 80 дБА відповідно до ГОСТ 12.1.003-83) працівники допускаються до роботи лише при наявності ЗІЗ.

Небезпечні місця та зони на фермах необхідно позначати попереджувальними знаками згідно з ГОСТ 12.4.026-76. Знаки безпеки повинні бути розміщені на видному місці.

Для виробничих процесів, пов'язаних з виділенням і накопиченням шкідливих речовин та хвороботворних мікроорганізмів потрібно передбачати устаткування для механічного очищення місць їх накопичення (доїльна апаратура, трубопроводи, виробничі приміщення, транспорт тощо) з подальшим їх знешкодженням та знезараженням.

3.2 Заходи охорони праці при роботі з установкою по виготовленню біоетанолу

Під час процесу виробництва біоетанолу утворюються багато токсичних, пожежонебезпечних та вибухонебезпечних речовин. Саме тому важливим є чітко дотримуватись правил по техніці безпеки, проводити інструктажі для персоналу перед початком процесу виробництва, дотримуватись технологічних режимів та вимог інструкцій, забезпечувати комфортні умови праці.

Для створення безпечних умов праці необхідним є попередження виникнення небезпеки та профілактика причин її виникнення. Персонал проходить навчання, а також атестацію з охорони праці не рідше, ніж 1 раз на рік.

Для того, щоб забезпечити безпечність на підприємстві необхідно вирішити ряд завдань, такі як: попередження впливу негативних факторів на людину, оцінити негативний вплив на довкілля, усунути негативні наслідки впливу небезпечних факторів. Параметри мікроклімату, а також концентрація небезпечних речовин у повітрі робочої зони не мають перевищувати норм, які встановлені у нормативному документі: «Чисті приміщення та пов'язані з ними контрольовані середовища. Частина 1. Класифікація чистоти повітря».

Рівень шуму та вібрації не мають перевищувати значень, які прописані у нормативному документі: «ДСН 3.3.6.037 – 99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку». Освітлення на робочій зоні має бути відповідним нормам, які вказану у нормативному документі «ДБН В.2.5-28-2006 Природне та штучне освітлення»

3.3 Висновки по розділу

Для того, щоб забезпечити безпеку проведення технологічних процесів, а також безпеки обслуговування обладнання застосовують герметизацію обладнання, комплексну автоматизацію, механізацію та дистанційне управління технологічним процесом. Для того, щоб не виникали аварійні ситуації впроваджують автоматичні системи захисту. Виробництво біоетанолу виконується згідно вимог нормативної документації. Параметри технологічного процесу, такі як рівень рідини у апаратах, тиск у трубопроводах, швидкість подачі рідини та інші, виконуються згідно вимог технологічного регламенту.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ

4.4 Дослідження утворення біоетанолу

Хімічний склад біоетанолу безпосередньо залежить від вихідного складу соргоцукрового сусла. Досліджувалось сорго цукрового сиропу з вмістом СР 25 %, при якості 74,0 % та концентрацією СР 72 % та на основі меляси (якість 60 % та концентрацією СР 75 %). Кількості цукровмісних субстратів розраховано за формулою (2.1).

Аналіз зрілої культуральної рідини та отриманої з неї барди при зброджуванні соргоцукрового сусла за головними фізико-хімічними показниками наведено в табл. 4.1 та 4.2.

Отримана зріла соргоцукрова культуральна рідина з вмістом СР 25 % містила в середньому на 1,6 % об. спирту більше у порівнянні з мелясною (табл. 4.1), відповідно і густина соргоцукрової культуральної рідини була дещо нижча від мелясної, так як саме етиловий спирт головним чином знижує густину культуральної рідини. Проте наявність підвищеної кількості незброджених цукрів у сорговій культуральній рідині 1,03 г/100 мл є негативним чинником. Можливо це є наслідком більш високого вмісту цукрів у вихідному суслі через більшу якість сиропу сорго, та необхідністю збільшення тривалості бродіння.

Таблиця. 4.1

**Аналіз зрілої сорго цукрової культуральної рідини у порівнянні із
мелясною***

Показник	Соргова бражка, 25 % СР	Мелясна бражка, 25 % СР
Густина, г/мл	1,013±0,005 a	1,032±0,006 b
Незброджені цукри, г/100 мл	1,03±0,05 a	0,45±0,05 b
Кислотність титрована, град	1,1±0,05 a	0,6±0,05 b
рН, од.	4,6±0,1 a	4,8±0,1 a
Вміст спирту, % об.	10,6±0,2 a	9,0±0,2 b
Біомаса на 75 % вол., г/дм ³	27,0±3,4 a	26,5±1,2 a

Примітка. *Значення з однаковою літерою в рядках суттєво не відрізняються (р < 0,05)

У порівнянні з мелясною бражкою соргоцукрова характеризується підвищеним вмістом речовин (органічних кислот), що надають кислу реакцію, на це вказує досить висока титрована кислотність 1,1 °, та 0,6 ° у мелясній. Це слабкі органічні кислоти, показник рН цих культуральних рідин відрізняється не суттєво – соргова культуральна рідина дещо кисліша рН має 4,6, а мелясна 4,8. Це наслідок присутності у соргоцукровому соку, з якого отримуємо концентрат – сироп, великої кількості органічних кислот, які знаходяться у складі рослинного соку та безпосередньо з цукрами при відтисканні стебел потрапляють у сік. Дріжджові клітини не засвоюють цей комплекс органічних кислот, а тому вони переходять у зрілу культуральну рідину та барду, викликаючи їх кислотність. На противагу, меляса має дуже низьку титровану кислотність, або взагалі має лужну реакцію.

Таблиця 4.2

Результати аналізу соргоцукрової барди під час зброджування соргоцукрового суслу, порівнюючи з м'ясною бардою

Показник	Соргоцукрова барда	М'ясна 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 ₂ /л	(140±10)×10 ³	(150±12)×10 ³

* n=3, ± стандартне відхилення.

Промисловими скидами (відходами) для біотехнологічних заводів, що виробляють біоетанол, є в першу чергу барда. Також сюди відносяться стічні води та вуглекислота з дріжджового та ферментаційних відділень заводу.

Звільнена від спирту, частини води і супутніх летких домішок культуральна рідина – барда, містить всі сухі речовини культуральної рідини та частину води, що залишилася. Склад та якість барди обумовлюється складом вихідного суслу (культуральної рідини), а склад суслу залежить від якості цукровмісної сировини-субстрату, тому ніяких певних умов відносно її складу не існує, за винятком максимального допустимого вмісту етилового спирту – не вище 0,015 % об. (0,012 % мас. або 0,0047 % мол.) [3].

У барді залишаються сухі речовини культуральної рідини і нелеткі продукти спиртного бродіння: гліцерин, піровиноградна кислота і ін. Вміст сухих речовин в барді коливається в широких межах (4 – 12 %) залежно від виду сировини, з якої отримана культуральна рідина.

Предметом наших досліджень була барда, отримана із культуральних рідин на основі нативного соку цукрового сорго, упареного соку сорго, та суміші нативного соку сорго з мелясою із цукрових буряків. Нами визначено, що при переробці в біоетанол упареного соку цукрового сорго (сиропу) вміст нецукрів та загальна кількість сухих речовин в барді менша ніж у мелясі: 9,2 % та 10,4 % відповідно. При переробці нативного соку сорго, концентрація сухих речовин в барді невисока – 3 ...5 % при вихідному вмісті СР соку 11 – 12 %.

Ми вивчили та апробували в заводських умовах два можливі варіанти змішування соку сорго з мелясою при зброджуванні методом двопоточного ферментування концентрованого цукровмісного сусла:

1) якщо сік сорго використовувати замість води тільки для розведення густої меляси з метою отримання головної розсиропки (45–55 % СР), а дріжджогенерування проводити класичним методом на мелясі, то співвідношення СР соку сорго до СР меляси в зрілій культуральній рідині складає приблизно 1:17. Таке співвідношення практично не впливає на вихід цільового продукту (біоетанолу), а отримана барда не відрізняється від мелясної;

2) якщо дріжджогенерування проводити на соці сорго, а мелясу використовувати тільки для приготування головної розсиропки (аналогічно першому варіанту) для підвищення відповідної концентрації вихідних СР культуральної рідини на рівні 27–28 %, то співвідношення СР соку сорго до СР меляси в зрілій культуральній рідині складе приблизно 1:1. При високій якості соку (80 %) цей варіант дає можливість підвищити вихід біоетанолу, зменшити вихід культуральної рідини та знизити в ній вміст золи на 25–35 %.

4.5 Аналіз можливих шляхів використання біоетанолу.

Новим побічним продуктом при переробці стебел цукрового сорго в біоетанол є соргоцукрова багаса – знецукрена маса технічних стебел цукрового сорго, з якої механічним пресуванням видалений цукровмісний сік.

Нами були проаналізовані шляхи використання рослини цукрового сорго (матеріальний та енергетичний баланс) [128]. На підприємстві по переробці цукрового сорго в етанол можливе використання двох варіантів технологічних схем переробки поновлюваної рослинної сировини:

варіант А – віджимання соку, використання багаси як паливо, зокрема для згущування соку, переробки сиропу і соку в біоетанол. Така технологія з використанням сировини першого покоління (цукрів сорго) для рідких біопалив і твердого біопалива (багаси сорго) для енергозабезпечення виробництва на сьогоднішній день представляється найбільш простою та рентабельною;

варіант Б – віджимання соку, частина багаси використовується як паливо, частина на гідроліз і подальшу ферментацію. В даному випадку використовується сировина першого і другого поколінь (лігноцелюлоза) для отримання рідких біопалив. За рахунок спалювання частини багаси виробляється теплова енергія. Цей варіант технології рентабельний в частині переробки соку, але затратний в частині переробки лігноцелюлози в етанол. Проте він дасть можливість відпрацювати процес гідролізу і ферментації біомаси в рамках підприємства, яке в цілому має бути рентабельним.

На рис. 7.1 показаний теоретичний матеріальний і енергетичний баланс при переробці цукрів стебел сорго в етанол (при використанні варіанту А).

При розрахунку балансу виходили з наступних даних:

- вихідний матеріал 1 т очищених стебел сорго;
- кількість цукрів в стеблі 10 % по масі; вологість стебел – 77 %;
- вихід соку після віджимання на вальцевих пресах – 75 % від маси стебел;
- втрати цукру при віджиманні соку із стебел – 5 %;
- якість соку і сиропу – 86 %;

- випаровування соку в сироп проводиться на 3-х корпусній випарній установці (витрачається 0,4 кг технологічної пари на 1 кг вологи, що випарилася);
- випаровування соку сорго ведеться до отримання сиропу із концентрацією СР 74 %.

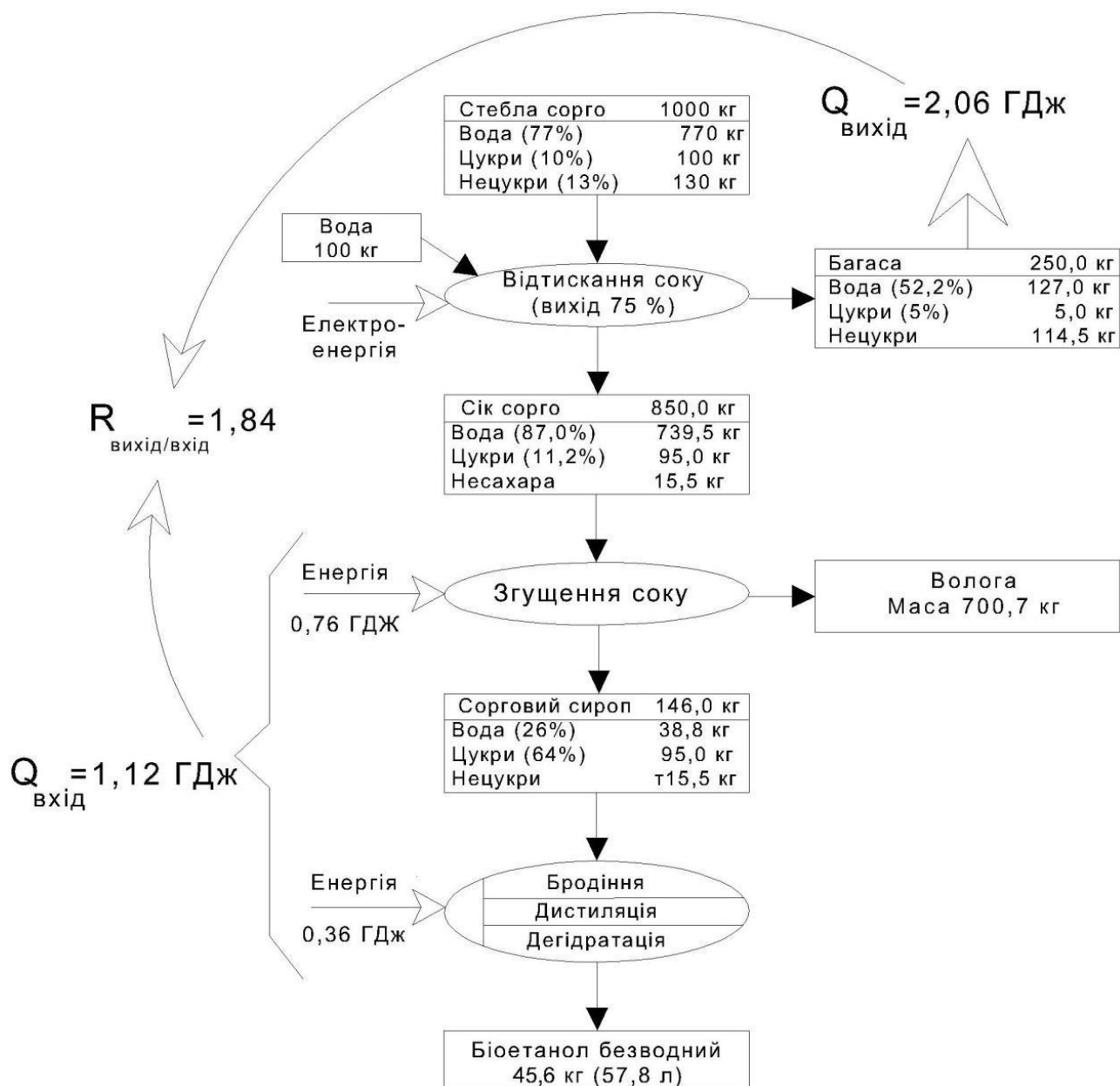


Рис. 4.1 – Матеріальний і енергетичний баланс переробки цукрів очищених стебел цукрового сорго в біоетанол.

Для розрахунку прийняли вміст цукрів, як вміст сахарози. В цьому випадку теоретично із 100 кг сахарози можна отримати 53,82 кг етанолу. При розрахунку

енергетичного виходу процесу вважали, що на сучасних заводах на виробництво тонни біоетанолу використовується 8 ГДж теплової енергії [3]. Це енергія витрачається на процеси бродіння, перегонки і абсолютизацію етанолу (без урахування енергії на згущування і сушку барди).

Для порівняння різних видів палива, що відрізняється вологістю, приводять теплотворну здатність до абсолютно сухої речовини. Для цього використовували наступне співвідношення:

$$Q = Q_c(1 - W/100) - 25,14W \text{ (кДж/кг)}, \quad (4.1)$$

де Q – теплотворна здатність вологого палива, кДж/кг;

Q_c – теплотворна здатність абсолютно сухої речовини палива, кДж/кг. Для абсолютно сухої багаси 18,6...20,9 МДж/кг (у розрахунку прийнято 20 МДж/кг);

W – вологість палива % мас. Розрахована за початковими даними і матеріальним балансом. У нашому прикладі вологість склала 52,2 %. У даному розрахунку $Q = 8,25$ МДж/кг.

Із рис. 4.1 видно, що витрати енергії на переробку 1 тонни стебел сорго в етанол складають 1,12 ГДж, а при спалюванні вторинних продуктів виробництва – соргової багаси, з 1 тонни початкової сировини отримуємо 2,06 ГДж енергії, що в 1,84 разу більше (вихід теплової енергії $R=1,8$). Цю енергію можна спрямовувати на згущування і сушку барди і/або на гідроліз лігноцелюлозного матеріалу соргової багаси.

У нашому прикладі весь сік згущувався в сироп з 74 % СР. На біоетанольному заводі приблизно 25 % нативного соку можна безпосередньо збродити в етанол в осінній період роботи без будь-якого згущування або із додаванням сиропу для досягнення необхідної густини сусла. До того ж сироп, який перероблятиметься в найближчі зимові місяці, може згущуватися до 50 – 60 % СР.

У енергетичному балансі слід врахувати і затрати на вирощування вихідної сировини сорго. За даними [60] на вирощування сорго (посадка, добрива, пестициди, транспорт і так далі) витрачається 20,3 ГДж/га. Застосовуючи цю цифру до наших розрахунків, отримаємо – при середній врожайності сорго 80 т/га, на обробіток однієї тонни очищених стебел сорго витрачається 0,34 ГДж/т енергії. При переробці

однієї тонни стебел сорго на біоетанольному заводі витрачається 1,12 ГДж. Спалювання багаси із 1 т стебел сорго дає 2,06 ГДж енергії (рис. 7.1). Енергетична ефективність на гектарі цукрового сорго – вирощування, прибирання, транспорт, переробка цукрів сорго в етанол складе 1,41. При цьому не враховується енергія, яка міститься в отриманому біоетанолі.

У роботі [5] приведений докладний енергетичний аналіз (баланс) виробництва біоетанолу з цукрового сорго. Витрачена енергія включає: витрата на посів і збирання врожаю, отримання соку в полі на гвинтовому пресі; витрати на перевезення соку до пункту упарювання (16 км) і до заводу (відстань 48 км); енергію на упарювання всього соку в сироп (60 % СР, 3-х корпусна випарна установка); на процеси ферментації і дистиляції. За даними [5], відношення витраченої енергії до отриманої, що міститься в етанолі, складає 0,91. Вся багаса стебел сорго використовувалася на силосування і корм худобі (ефект від її переробки не враховувався). Про велику цінність силосу та інших кормів для тваринництва зазначається в роботах вчених [25].

Багаса може приносити додатковий дохід підприємству. Надлишок соргової багаси може бути реалізований як паливні гранули (пелети) чи на корм худобі – як силос або як сіно (висушені гранули багаси). Для якісного силосу достатньо, щоб залишковий цукор в багасі сорго становив 6...7 % [31]. Як зазначалось в огляді літератури при відтисканні на вальцевих пресах залишається приблизно 5 % цукрів у багасі [3].

Зразки нативної багаси після віджимання соку та пелети з соргової багаси (рис. 4.2), отримані завдяки керівництву заводу «Еко-Енергія», були відправлені на аналіз на повний хімічний склад та оцінку кормової якості. Результати показали незначні відмінності в хімічному складі пелет в порівнянні з багасою. Енергетична поживність корму багаси в кормових одиницях склала 0,24, якість корму за показниками перетравлюваності СР 72,8 %, відносна кормова цінність 93.



а) – із очищених стебел, вичавлених на лабораторному пальцевому пресі, б) – із неочищених стебел, подрібнених силосувальним комбайном та вичавлених промисловим вальцевим пресом; в) пелети отримані із багаси з під промислового преса.

Рис. 4.2. Багаса цукрового сорго

Вихід чистої енергії при виробництві біоетанолу із рослинної сировини може бути дискусійним (залежить від умов логістики, кліматичних умов, раціональності ухвалених технологічних рішень). Якщо багасу використовувати для отримання енергії для згущування (упарювання) соку, енергетичний баланс істотно покращується. Але головна перевага виробництва етанолу із біомаси в можливості перевести енергію твердого палива (біомаси стебел або вугілля) в рідке паливо для автомобілів.

Таблиця 4.3

Аналіз хімічного складу корму - багаси цукрового сорго для молочної худоби (Лабораторія АОЗТ "Агро-союз").

Показники	Абсолютно сухий корм	Корм натур. вологості
Загальна волога, г/кг	0	80
Суша речовина, г/кг	1000	920
Сирий протеїн, г/кг	94	86
Сирий жир, г/кг	12	11
Сира клітковина, г/кг	281	259
Сира зола, г/кг	43	40
Безазотисті екстракт. р-ни, г/кг	122	524
Кислотодетергентна клітковина, г/кг	206	190
Нейтральнотетергентна клітковина, г/кг	729	671
Енергетична поживність корму		
Кормові одиниці	0,24	0,22
Обмінна енергія, МДж	9,2	8,4
Чиста енергія підтримки, МДж	5,6	5,1
Чиста енергія лактації, МДж	5,6	5,2
Чиста енергія приросту, МДж	3,2	2,9
Якість корму		
Перетравлюваність СР корму %	72,8	-
Споживання СР корму, %маси тіла	1,6	-
Відносна кормова цінність	93	-

4.6 Розрахунок економічної доцільності виробництва біоетанолу із цукрового сорго

Головні параметри розрахунку вихідних показників для проектування заводу та енергетичні витрати наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Основні параметри з розрахунку соргоцукрового кластера

Назва операції-показника	Значення	Одиниці
Площа посівів	100,00	га
Врожайність зеленої маси	100,00	т/га
Вихід соку	52,50	% мас.
Вміст цукру в соку	11,18	% мас.
Кількість фітомаси в рік	10000,00	т
Кількість цукрів в рік	586,76	т
Період збирання врожаю в рік	60,00	доб.
Вихід соку на добу	87,50	т/доб.
Сік на концентрування	72,92	т/доб.
Період роботи заводу в рік	360,00	доб.
Кількість вологої багаси в рік	4750,00	т
Кількість теплоти від вологої багаси в рік	39176,54	ГДж
Необхідна теплота на виробництво біоетанолу в рік	2253,18	ГДж
Необхідна теплота на концентрування соку в рік	22171,15	ГДж
Необхідна теплота на згущення барди (60% СР)	5,00	ГДж/т
Необхідна теплота на концентрування барди в рік	14669,12	ГДж
Надлишок/ нехватка багаси сорго	83,09	ГДж
Надлишок/ нехватка багаси сорго	10,07	т

Детальний розрахунок соргоцукрового кластера з формулами в MS Office Excel 2010 наведено.

При розробці концепції нових підприємств для виробництва біоетанолу і їх проектуванні доцільно вирішувати питання їх енергозабезпечення за рахунок спалювання побічних продуктів і відходів, враховуючи при цьому необхідність відповідного очищення димових газів, а також можливість співпраці із агропромисловими комплексами.

За допомогою моделювання соргоцукрового підприємства отримано вихідні дані для розрахунку об'ємів обладнання та їх кількості відповідно до потужностей заводу.

В табл. 7.4 представлений концепт соргоцукрового кластера при роботі заводу цілий рік. З періодом збирання врожаю 60 діб потрібно законсервувати 83 % соку, що отримується; з періодом збирання врожаю 90 діб потрібно законсервувати 75 % соку, що отримується. При розрахунку енергетичного балансу витрати енергії склали суму теплоти на консервування соку, на виробництво біоетанолу та теплота на згущення барди сорго до 60 % СР. Баланс енергії від спалювання багаси, отриманої в процесі відтискання стебел сорго та затраченої коливається на нульовому значенні. Якщо період збирання врожаю триватиме три місяці, баланс суттєво покращується, тому рекомендовано сіяти різностиглі сорти цукрового сорго.

При розрахунку **економічної доцільності** дотримувались наступних міркувань: кукурудза схожа культура з цукровим сорго по технології вирощування та морфологічно, тому в розрахунку вартості тони біомаси та в порівняльному розрахунку опираємося на собівартість біоетанолу із кукурудзи. Кукурудза повинна відповідати вимогам ДСТУ 4525:2006. Існує декілька літературних джерел про собівартість виробництва із кукурудзи, і навіть згадується можливість використання стебел кукурудзи для спалювання в ТЕЦ по аналогії з багатою сорго [2].

У процесі розрахунку собівартості виробництва біоетанолу враховували, що його собівартість на 71 % складається з собівартості сировини (стебел сорго), аналогічно кукурудзі [3, 4], цукрової тростини [5], сиропу із цукрового буряку [6]. Собівартість стебел сорго визначали із приблизної собівартості стебел кукурудзи за ціною вирощування 1 га кукурудзи в Україні, з огляду на високу подібність кукурудзи та сорго щодо внесення добрив, кількості прополювань і густини посіву.

Спосіб розрахунку наступних ключових даних для розрахунку наведені в Додатку В (рис. 1): вартість зерна кукурудзи (з елеватора) і без ПДВ 6450 грн/т (дані з Української зернової біржі <https://graintrade.com.ua/ru/birzha>); собівартість 1 га стебел кукурудзи (по ціні зерна отриманого з га) 27233,33 грн, що прирівняли до вартості вирощування 1 га стебел сорго цукрового; частка в ціні етанолу з кукурудзи

від собівартості зерна 11,32 грн/кг; частка ціни етанолу від собівартості цукрів сорго 8,18 грн/кг.

В табл. 4.5 наведений подальший розрахунок на основі собівартості біоетанола із зерна кукурудзи по [3].

Таблиця 4.5

Структура собівартості біоетанола із кукурудзи та цукрів сорго

№ п/п	Структура собівартості біоетанола із кукурудзи, %	Структура собівартості біоетанола із сорго, %
1	<i>Сировина та матеріали</i>	
2	Зерно	71
3	α-амілаза, глюकोамілаза, сірчана к-та	3,74
4	Дезінфікуючи, миючі засоби	0,24
5	Всього, сировина та матеріали	74,98
6	Економія	3,74
7	<i>Витрати на енергоносії</i>	
8	Електроенергія (розмелювання зерна, робота насосів)	3,7
9	Газ природний	9,85
10	Економія	9,85
11	Всього, експлуатаційна складова	88,53
12	Техобслуговування	2,93
13	Оплата труда	0,7
14	Амортизаційні відрахування	7,84
15	Загалом собівартість	100
16	Повна собівартість біоетанола	15,95 грн/кг
		10,64 грн/кг

З табл. 4.5, отримавши структуру по % собівартості від сировини та економію в порівнянні з переробкою цукрів сорго, розраховуємо повну собівартість біоетанолу. Так, для кукурудзи 11,32 грн/кг складає 71 % ціна, а повна ціна відповідно 15,95 грн/кг. Для цукрів сорго рахуємо собівартість від вирощування стебел 8,18 грн/кг з додаванням витрат табл. 7.5. з урахуванням економії на технологічності сорго (13,59 %). Розрахунок буде наступний:

$$8,18 + (15,95 - 11,32 - 15,95 \times 13,59 / 100) = 10,64 \text{ грн/кг.}$$

В результаті розрахунків отримуємо наступну собівартість біоетанолу в залежності від технологічних показників вихідної сировини (табл. 4. 6)

Таблиця 4.6

Собівартість біоетанолу в залежності від показників врожайності сорго

Врожайність фітомаси сорго, т/га	100,00	100	60
Цукристість стебла, %	12,00	10	9
Собівартість біоетанолу, дол. США/кг	0,33	0,38	0,63

Табл. 4.6. показує наскільки є важливим врожайність з гектару та цукристість стебел сорго, так як собівартість біоетанолу може відрізнятись в рази. Велике значення ще буде мати логістика.

Питому вагу в структурі витрат на виробництво енергетичних культур займають прямі матеріальні затрати, в основному на насіння, мінеральні добрива та нафтопродукти. Оскільки ціна на вироблене біопальне прямо пропорційно співвідноситься з виробничою собівартістю сировини, серед шляхів зменшення ціни біологічних видів пального є скорочення витрат на мінеральні добрива за рахунок внесення побічної продукції рослинництва та заміщення частини мінерального палива біологічним, виробленого з власної продукції [19].

Зниження собівартості біоетанолу із легкодоступних цукрів цукрового сорго, порівнюючи із зерном кукурудзи, обумовлене 3-ма 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. Для приблизного розрахунку собівартості меляси використовували подібну до кукурудзи схему розрахунку із статті [6]. Собівартість біоетанолу із меляси склала 0,56 дол. США/л за ціною меляси 3600 грн/т (зараз меляса продається і по 6300 грн/т). Є проблема у нестабільності цін на бурякоцукрову мелясу в Україні через її дефіцит. Раніше меляса вважалася найвигіднішою сировиною для виробництва біоетанолу в Україні [2, 5, 6].

ВИСНОВКИ

У роботі розроблено та науково обґрунтовано цукрове зброджування з вітчизняної сировини – цукровмісних соків та сиропів, отриманих при відтисканні стебел цукрового сорго.

1. Проаналізовані результати вирощування цукрового сорго (сорт Ботанічний) на півночі України. Врожайність становила біля 91,4 т/га очищених стебел, в середньому вміст СР в соку 12,1 %. З метою отримання більш якісних соків встановлена 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 та сиропів (4,13–6,00) забезпечує хімічну стійкість глюкози при нагрівання соку сорго і відповідно зменшує потребу в підкисленні сусле для оптимального процесу ферментації.

2. Відтискання цукрового сорго на вальцевих пресах здійснює механічну руйнацією волокон, що полегшує розчинення лігніну та наступний гідроліз целюлози сорго з метою отримання біоетанолу 2-го покоління. Вміст структурних компонентів в СР цукрового сорго складає: 44 % целюлоза, 28 % геміцелюлоза та 20 % лігнін.. Проведена оцінка реального потенційного виходу біоетанолу із соргоцукрової багаси 13 м³/т СР, із розчинних цукрів 26 м³/т СР.

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

4. З розрахунків встановлено, що багаса, яка утворюється при переробці стебел сорго в біоетанол, може повністю задовольнити потреби заводу в тепловій енергії при її раціональному спалюванні, навіть на згущення утвореної барди до 60 % СР. Завод може працювати повний рік використовуючи сконцентрований соргоцукровий сироп. При цьому собівартість безводного біоетанолу із цукрів сорго може становити біля 0,3 \$/л.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Пришляк В.М., Пришляк Н. В. Техніко-економічні та екологічні аспекти виробництва біоетанолу в Україні. *Наукові праці інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. 2013. №19. С. 219–226.
2. Доронин А.В. Конкурентные преимущества биоэтанола из продукции свеклосахарного производства. *Вісник цукровиків України*. 2013. №8 (87). С. 18–20.
3. Цыганков С.П. Биоэтанол. Киев: НПП «Интерсервис», 2010. 160 с.
4. Долінський А.А., Ободович О.М. Реалії сьогодення та перспективи виробництва біоетанолу як компонента сумішевих палив. *Вісник Національної академії наук України*. 2019. № 11. С. 29–37. doi.org/10.15407/vism2019.11.029.
5. Калетнік Г.М., Олійнічук С.Т., Скорук О.П. Економічна ефективність виробництва та використання біоетанолу в Україні. *Збірник наукових праць ВНАУ*. Серія: Економічні науки. 2012. №1 (56). С. 3–6.
6. Скорук О. П. Виробництво та перспективи використання біопалива у Вінницькій області. *Облік і фінанси*. 2017. № 2. С. 153–162.
7. Rakhmetova S.O., Vergun O.M., Blume R.Y., Bondarchuk O.P., Shymanska O.V., Tsygankov S.P., Yemets A.I., Blume Ya.B., Rakhmetov D.B. Ethanolproduction potential of sweet sorghum in North and Central Ukraine. *The Open Agriculture Journal*. 2020. Vol. 14. P. 321–338. doi: 10.2174/1874331502014010321.
8. Jiang D., Hao M., Fu J., Liu K., Yan X. Potential bioethanol production from sweet sorghum on marginal land in China. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 220. P. 225–234. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.294>.
9. Kim M., Han K.J., Jeong Y., Day D.F. Utilization of whole sweet sorghum containing juice, leaves, and bagasse for bioethanol production. *Food Science Biotechnology*. 2012. Vol. 21, No 4. P. 1075–1080. <http://dx.doi.org/10.1007/s10068-012-0139-5>.
10. Mohapatra S., Ray C R., Ramachandran S. Bioethanol from biorenewable feedstocks: technology, economics, and challenges. *Bioethanol production from food crops:*

- Sustainable sources, interventions, and challenges. *Academic Press, Elsevier*. 2019. P. 3–27. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813766-6.00001-1>.
11. Khalil SRA, Abdelhafez AA, Amer EAM. Evaluation of bioethanol production from juice and bagasse of some sweet sorghum varieties. *Annals of Agricultural Sciences*. 2015. Vol. 60, No. 2. P. 317–324. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aoas.2015.10.005>.
 12. Cao W, Liu R. Screening and optimization of trace elements supplement in sweet sorghum juice for ethanol production. *Biomass Bioenergy*. 2013. Vol. 50. P. 45–51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.10.016>.
 13. Володько А. И., Новак А. Г., Цыганков С. П. Сахарное сорго – энергетическая культура для производства биоэтанола в Украине. *Відновлювальна енергетика*. 2012. №. 29 (2). С. 88–92
 14. Cysewski G.R., Wilke ChR. Rapid ethanol fermentations using vacuum and cell recycle. *Biotechnol Bioeng*. 1977. Vol. 19. P. 1125–1143. <http://dx.doi.org/10.1002/bit.260190804>.
 15. Samnuknit W., Boontawan A. Extractive fermentation of ethanol using vacuum fractionation technique. *International Journal of Chemical and Molecular Engineering*. 2014. Vol. 8, No. 9. P. 925–930. doi.org/10.5281/zenodo.1094651.
 16. Nguyen V.D., Kosuge H., Auresenia J., Tan R., Brondial Y. Effect of Vacuum Pressure on Ethanol Fermentation. *Journal of Applied Sciences*. 2009. Vol. 9, No. 17. P. 3020–3026. doi: 10.3923/jas.2009.3020.3026.
 17. Володько О. І., Кулічкова Г. І., Лантух Г. В., Лукашевич К. М., Циганков С. П. Застосування вакуумування при спиртовій ферментації цукровмістної сировини дріжджами *Saccharomyces cerevisiae*. *Біотехнологія: звершення та надії: VII Міжнародна науково-практична конференція НУБіП України (м. Київ, 29–30 листопада 2018 р.)*. Київ, 2018. С. 39–40.
 18. 46 Belum V S Reddy, A Ashok Kumar and S. Ramesh. Sweet sorghum: a water saving bioenergy crop. International crops research institute for the SemiArid Tropics Patancheru 502 324. Andhra Pradesh, India 2007. URL:: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahU>

KEwjkl0fLnL3wAhXrpIsKHaqVDt0QFjABegQIBBAD&url=http%3A%2F%2Fwww.iwmi.cgiar.org%2FEWMA%2Ffiles%2Fpapers%2FPaper%2520for%2520Bioenergy%2520and%2520water-

BelumReddy.pdf&usg=AOvVaw1eC4_MW19QRhbWIRcnrUl

19. Супрунчук В.К., Роменский Н.П., Хорунжая Л.В., Панчук А.Н. Производство глюкозно-фруктозных сиропов. Киев: Урожай, 1993. 112 с.
20. Петрушевский В.В., Бондарь Е.Г., Винокурова Е.В. Производство сахаристых веществ. Киев: Урожай, 1989. 168с.
21. Grassi G. Bioethanol industrial world perspectives. In the proceedings of 2000. *1st World Conference on Biomass for Energy and Industry*. 2000. P. 2131–2134.
22. Lifang H., Fan S., Libo F., Zongsheng Z. Effects of phosphorus, potassium, sulfur, and magnesium on sugar cane yield and quality in Yunnan. *Better Crops International*. 2001. Vol. 15, No. 1. P 6–9.
23. Sweet sorghum to ethanol. Technology, Plant & Machinery. Presentation by Praj Industries Limited. <https://www.yumpu.com/en/document/read/51513809/sweet-sorghum-to-ethanol-praj-industries-ltd> (дата звернення: 05.01.2021).
24. Сорго (сборник статей). Государственное издательство сельскохозяйственной литературы. Москва. 1957.
25. Тараненко В. И. Сорго как кормовая культура. Харьков, 1969. 184 с.
26. Царев А. П., Кирюхин И. В. Сок и патока из сахарного сорго. *Кукуруза и сорго*. 1989. № 6. С.35–37.
27. Востоков А.И. Несвекловичные сахароносы и производство из них сахара. Москва: Пищепромиздат, 1952. 72 с.
28. Еримизин Н. Н. Создание и изучение гибридов и сортов сахарного сорго. *Сельскохозяйственные науки: научные труды*. КГАУ. Симферополь: Вперед, 2002. Вып. 78. С.85–87.
29. Гибриды и сорта сорговых культур, впервые включенные в Государственный реестр с 1993 г. *Кукуруза и сорго*. 1993. № 6. С.14–16.

30. Левандовський Л. В., Олійнічук С. Т., Ткаченко Л. В., Ткаченко А. Ф. Використання соку цукрового сорго для біосинтезу спирту. *Вісник аграрної науки*. 2004. № 7. С. 63–65.
31. Галичкин. А. И, Сариев К. Влияние норм и способов сева на урожайность сахарного сорго. *Земледелие*. 2007. № 6. С. 30–31.
32. Бритвин, В. В., Болдырева Л. Л. Селекционное изучение сортов и гибридов сахарного сорго. *Сельскохозяйственные науки: научные труды ЮФ "КАТУ" НАУ. Симферополь: ЧП "Фактор", 2006. Вып. 96. С. 151–156.*
33. Исаков, Я. И., Горпиниченко С. И. Селекция сахарного сорго. *Кукуруза и сорго*. 2003. № 1. С. 9–12.
34. Pirgari E. Sweet sorghum – natural sweetener for foods. *Cercetări Agronomice în Moldova. Anul XXXX. 2007. Vol. 3, No. 131. URL: http://www.uaiasi.ro/CERCET_AGROMOLD/CA3-07-06.pdf (дата звернення: 05.01.2021).*
35. Nimbkar N., Kolekar N.M., Akade J. H. and Rajvanshi A.K.. Syrup Production from Sweet Sorghum. NARI. Phaltan. 2006. URL: https://www.researchgate.net/publication/238449544_Syrup_Production_from_Sweet_Sorghum. (дата звернення: 05.01.2021).
36. Nahar, Kamrun. Sweet sorghum: an alternative feedstock for bioethanol. *Iranica Journal Energy & Environment*. 2011.Vol. 2, No 1. P. 58–61.
37. Phowchinda O., Strehaiano P. Utilization of Mixed Sugars for Alcoholic Fermentation by *Saccharomyces cerevisiae*. *Thammasat International Journal of Science and Technology*. 1999. Vol. 4, No.2. P. 23–31.
38. Reddy BVS, Ramesh S, Reddy PS, Kumar AA, Sharma KK, Chetty SMK, Palaniswamy AR. Sweet sorghum food, feed, fodder and fuel crop. In: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Patancheru, India: ICRISAT. 2006. P. 1–24. URL:http://oar.icrisat.org/2598/1/SweetSorghumFoodFeedFodderAndFuelCrop_2006.pdf. (дата звернення: 05.01.2021).

39. Іллєвич С.В. Унікальний коренеплід. Київ: Урожай, 1991. 176 с.
40. Самойленко А., Шевченко Т. Технологія вирощування сорго. *Agroexpert*. 2009. № 5. С. 14–16.
41. Шепель. Н. А. Адаптивная селекция, технология возделывания и направления использования сахарного сорго. *Сельскохозяйственные науки: научные труды*. КГАТУ. Симферополь. 2004. Вып. 86. С. 32–44.
42. Заец А.С. Сахарная промышленность в Украине: становление, развитие, реструктуризация. Киев.: Наук. думка, 2004. 326 с.
43. Исаков, Я., Пахайло А., Кольчик А.. Невзирая на засуху. *Кукуруза и сорго*. 1997. № 6. С. 19–21.
44. Ишин А. Г., Пронько В. В., Голубев А. В., Коюда С. П. Сорго в засушливом Поволжье. *Кукуруза и сорго*. 1987. № 6. С. 26–27.
45. Lima, G.S. de. Estudo comparativo da resistencia a' seca no sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) em diferentes estadios de desenvolvimento. Recife: UFRPE. 1998. 128 p.
46. Stephen R. Chapman, Lark P. Carter. Crop production, principle and practices. San Francisco: W.H. Freeman, 1976. 566 p.