

**С.П. Циганков<sup>1</sup>, О.І. Володько<sup>1</sup>, А.І. Ємець<sup>1</sup>, Г.В. Лантух<sup>1</sup>,  
Д.І. Литвин<sup>1</sup>, К.М. Лукашевич<sup>1</sup>, А.Г. Новак<sup>1</sup>, С.П. Ожерєдов<sup>1</sup>,  
Д.Б. Рахметов<sup>2</sup>, С.І. Співак<sup>1</sup>, Я.Б. Блюм<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Державна установа «Інститут харчової біотехнології та геноміки НАН України», Київ

<sup>2</sup> Національний ботанічний сад ім. М.М. Гришка НАН України, Київ

## **РОЗРОБЛЕННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ КОМПЛЕКСНОГО ТРАНСФОРМУВАННЯ ВУГЛЕВОДНОГО СКЛАДУ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ У БІОЕТАНОЛ**



*Описані результати розробки та випробування дослідної технології переробки цукрового сорго та пальчастого проса у біоетанол. Визначено вміст та спектр вуглеводів біомаси досліджуваної рослинної сировини. Визначений потенційний вихід біоетанолу з вуглеводного складу рослинної сировини цукрового сорго та пальчастого проса. Одержані основні технологічні параметри підготовки обох видів рослинної сировини до спиртового ферментування. Запропонована концепція дослідної технології отримання біоетанолу з вуглеводної сировини першого та другого поколінь. Проведено випробування технології комплексного трансформування вуглеводів рослинної сировини в біоетанол.*

*Ключові слова:* біоетанол, вуглеводна сировина, цукрове сорго, пальчасте просо, гідроліз лігноцелюлози, ферментування.

### **АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ**

У 2011 р. світове виробництво біоетанолу перевищило 100 млрд. л (80 млн. т) [1]. Лідери з виробництва паливного етанолу — Бразилія, США — переробляють у біоетанол цукри та крохмаль, котрі одержують з цукрової тростини, цукрового буряку та зернових культур — кукурудзи, пшениці та ін. Цукри та крохмаль належать до сировини першого покоління [2–4]. Проте використання сировини першого покоління для виробництва біопалив викликає зростаючий супротив громадських організацій та державних інститутів ряду країн, вмотивований можливою конкуренцією між продовольством і паливом. Такі побоювання стимулю-

ють пошук економічно ефективних технологій перероблення у біопалива лігноцелюлози — сировини другого покоління, джерела якої практично невичерпні [3, 5]. Однак, незважаючи на інтенсивні дослідження й розробки, до цього часу немає жодного прибуткового комерційного проекту з виробництва біоетанолу або біобутанолу з сировини другого покоління [6]. Основна складність полягає у вирішенні питання зменшення витрат на технологічних стадіях попередньої підготовки та гідролізу лігноцелюлози до простих цукрів [5, 7].

Що ж стосується України, то поки що наявний потенціал не використовується навіть у сфері виробництва біоетанолу із сировини першого покоління, оскільки відсутні сучасні підприємства відповідного профілю. Спроби перепрофілювати існуючі застарілі спиртові заводи на виробництво біопалив не заслуго-

© С.П. ЦИГАНКОВ, О.І. ВОЛОДЬКО, А.І. ЄМЕЦЬ,  
Г.В. ЛАНТУХ, Д.І. ЛИТВИН, К.М. ЛУКАШЕВИЧ,  
А.Г. НОВАК, С.П. ОЖЕРЄДОВ, Д.Б. РАХМЕТОВ,  
С.І. СПІВАК, Я.Б. БЛЮМ, 2013

вують серйозної оцінки через вкрай енерговитратне обладнання і застарілі технології, що впроваджувались на них у 60-і роки минулого століття. Сподіватися на перехід до використання сировини 2-го покоління можна лише на основі розвинутої сучасної промисловості з перероблення сировини 1-го покоління, яка могла би скласти технологічну основу для поступового використання сировини і другого покоління. При цьому необхідність розвитку біопаливного виробництва в Україні має низку вагомих причин. Головними із них є наявність достатньої кількості угідь, що наразі не використовуються, необхідність зменшення енергозалежності, зумовленої імпортом нафти і газу, можливість поступального розвитку сільського господарства, збільшення кількості робочих місць, необхідність поліпшення стану навколишнього середовища [8]. Тому вже зараз потрібно замислитись над тим, які сільськогосподарські культури можуть замінити традиційну кукурудзу, цукровий буряк, пшеницю для того, щоб не стати об'єктом критики за марнотратство продовольчої сировини.

Одним з найкращих кандидатів на цю роль є цукрове сорго (*Sorghum saccharatum*), яке останнім часом все ширше використовується для отримання біоетанолу [9, 10]. Важливою особливістю є високий вміст у його рослинному соку до 20 % розчинних цукрів, що дозволяє розглядати цей вид культурних рослин одночасно як сировину першого (моно- та олігосахариди), так і другого (лігноцелюлоза) покоління [11]. Іншими словами, стебла цукрового сорго на підприємстві можуть бути повністю використані у виробництві: в першу чергу їх рідинна частина (відпресований та згущений сік цукрового сорго) як елемент поживного середовища для спиртового зброджування. Крім того, багаса цукрового сорго (знецукрена маса технічних стебел цукрового сорго, яку одержують механічним пресуванням) на першому етапі може бути використана в енергетичних котлах як тверде паливо для генерації

технологічної пари, на другому — як сировина 2-го покоління [8, 12].

Лігноцелюлоза стебла цукрового сорго в процесі віджимання 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. Таким чином, підприємство, яке буде комплексно використовувати вуглеводний склад цукрового сорго у виробництві біоетанолу, може стати базовим підприємством для впровадження інноваційних технологій, переробляючи надлишок лігноцелюлозної біомаси не лише сорго, а й інших перспективних біоенергетичних культур (наприклад, пальчасте просо (*Eleusine coracana*)) [13, 14]. Таким чином, для переходу у подальшому на сировину 2-го покоління не виникатиме необхідності створювати нове підприємство: досить буде доукомплектувати існуюче декількома позиціями спеціалізованого обладнання.

В Україні цукрове сорго не належить до традиційних культур харчового призначення, тому його перероблення в біопалива не викликає такої критики, як використання кукурудзи чи пшениці [15]. Нові сорти та гібриди цієї культури, що випробовувались в Україні та Росії, показали високу пластичність та продуктивність, забезпечуючи до 130 т/га біомаси при вмісті 25–35 % загальних цукрів на суху речовину. Однак в Україні створено не так багато сортів цукрового сорго [15], а селекційна робота по створенню сортів пальчастого проса повністю зосереджена у Національному ботанічному саду ім. М.М. Гришка НАН України [5, 16–20]. У період 2008–09 рр. автори вивчали технологічні властивості цукрового сорго, вирощеного в Хмельницькій області України (Шепетівський р-н), біомаси сортів та сортозразків цукрового сорго [5, 21] і пальчастого проса [5, 22, 23], створених у Національному ботанічному саду ім. М.М. Гришка НАН України за участі Інституту харчової біотехнології та генетики (ІХБГ) НАН України.

Результати проведених досліджень свідчать про те, що вихід біоетанолу з одиниці площі залежно від умов вегетації цукрового сорго та технології перероблення його сировини може становити від 4 до 8 м<sup>3</sup> [24]. Порівняно з кукурудзою та цукровим буряком потенціал цукрового сорго як сировини першого покоління вищий у 1,5–2,5 рази. У свою чергу це означає, що для забезпечення виробництва біоетанолу (або біобутанолу) необхідно задіяти в 1,5–2,5 меншу площу сільськогосподарських угідь, ніж при використанні традиційних культур для аналогічних потреб. Це значно вигідніше завдяки зменшенню витрат на обробку сільськогосподарських угідь та зниженню транспортних витрат, пов'язаних з доставкою сировини на переробний завод (порівняно з цукровим буряком). Частина біомаси рослини (зокрема ту, що містить насіння) можна збирати окремо і використовувати як фураж, частково компенсуючи витрати.

Саме тому для завершення розробки технологічних основ виробництва біоетанолу з цукрового сорго в Інституті харчової біотехнології та геноміки НАН України було виконано науково-технічний проект «Розробка дослідної технології переробки цукрового сорго та пальчастого проса у біоетанол та його промислове випробування. Розділ 2. Розробка та випробування технології комплексної трансформації вуглеводів рослинної сировини у біоетанол» (№ Держреєстрації 0110U003337) з подальшим впровадженням розробленої технології на підприємствах біопаливної галузі. Кінцевою метою цієї розробки стала промислова апробація усіх стадій технологічного процесу отримання біоетанолу з цукрового сорго в промислових умовах.

#### **ХАРАКТЕРИСТИКА СТРУКТУРНО-ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ВИХІДНОЇ СИРОВИНИ ДЛЯ ОТРИМАННЯ БІОЕТАНОЛУ**

Відомо, що хімічний склад, харчова та енергетична цінність біомаси сільськогосподарських рослин, у тому числі й сорго, є не лише

видо- і сортоспецифічними [25], але й залежать від умов районування, часу та способів збирання, обмолоту, зберігання, а також (що є суттєвим чинником) від обраних методів аналізу [26–31]. Тому дані щодо вмісту структурних компонентів у лігноцелюлозній сировині цукрового сорго в різних літературних джерелах дещо відрізняються (табл. 1).

Хімічний склад багаси цукрового сорго добре вивчений [32] (див. табл. 2). Внаслідок попередньої обробки багаси цукрового сорго за різними хімічними та фізичними схемами і подальшого гідролізу за допомогою фібролітичних коктейлів можна ефективно вивільнити С5 та С6 цукри [33]. Обробка багаси тільки ферментним комплексом дозволяє зробити доступними лише 50 % від загальної кількості С5 та С6 цукрів.

Попередня обробка паром під тиском та екструзія багаси, що передують її ферментації,

Таблиця 1

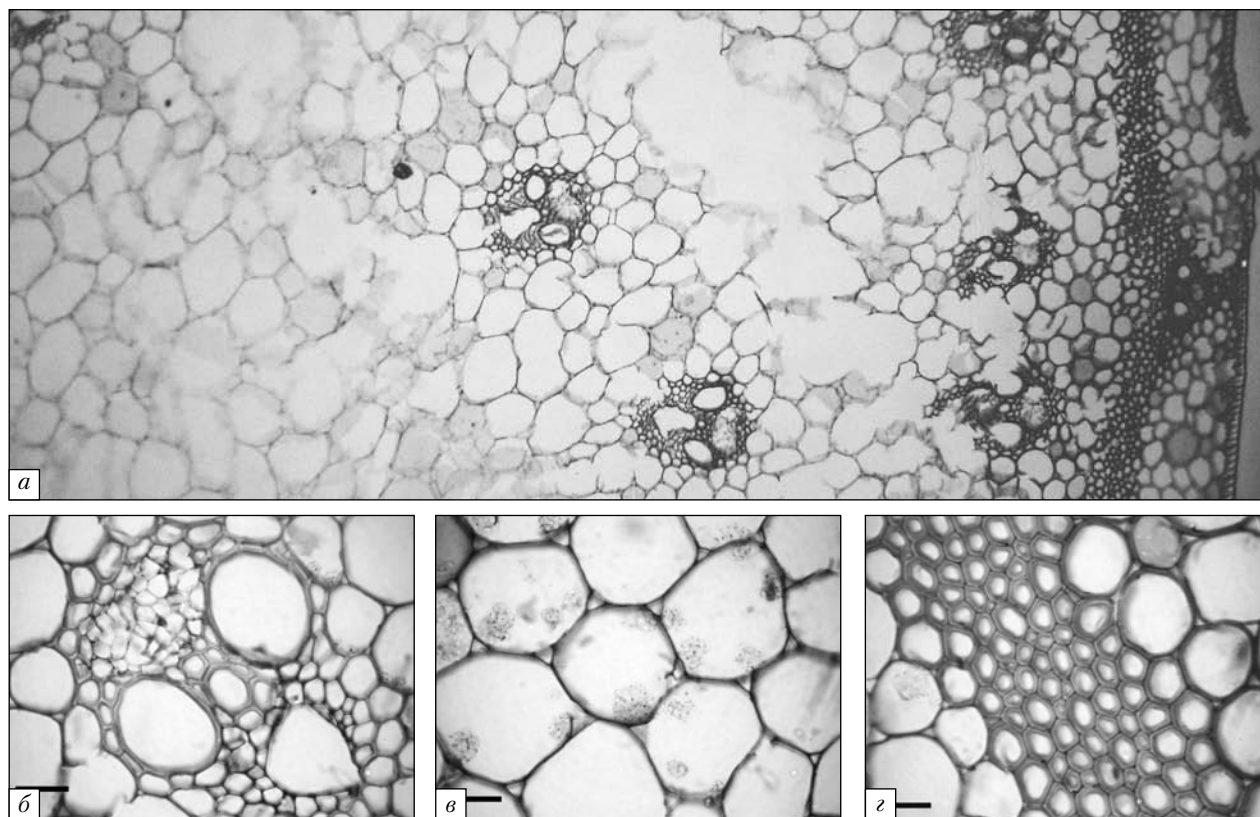
#### **Вміст структурних компонентів лігноцелюлози цукрового сорго**

Видова частина цукрового сорго	Целюлоза	Гемі-целюлоза	Лігнін
Цукрове сорго (для годування худоби), % [29]	30	31	11
Цукрове сорго (конкретно не вказано), % [30]	27	25	11
Цукрове сорго (для біоетанолу), % [31]	45	27	21

Таблиця 2

#### **Склад багаси цукрового сорго**

Компонент	Маса нетто, %
Розчинний у кислоті лігнін	9
Нерозчинний у кислоті лігнін	21
Арабінан (С5 – арабіноза)	4
Ксилан (С5 – ксилоза)	16
Маннан (С6 – манноза)	більше 1
Галактан (С6 – галактоза)	більше 1
Глюкан (целюлоза)	44
Невизначено	5



**Рис. 1.** Морфологічні особливості основних елементів стебла цукрового сорго: *a* – поперечний зріз стебла, *б* – камбій, *в* – провідні елементи, *г* – паренхіма

збільшують вихід цукрів на 17 % у порівнянні з ферментацією без такої обробки, а ферментна обробка збільшує загальну кількість доступних цукрів на 40 %. Важливо, що екструзія на відміну від інших попередніх обробок багаси не генерує утворення таких інгібіторів ферментації, як оцтова кислота, фурфурол та 5-оксифурфурол. Як наслідок, після 24-годинної ферментації відповідними штамми *Saccharomyces cerevisiae* та *Issatchenkia orientalis* можна отримати 183,9 і 209,2 мг етанолу/г сухої багаси, що була попередньо оброблена, відповідно, HCl та ферментами [33]. Розроблені також шляхи комбінування попередньої обробки багаси цукрового сорго NaOH та ультразвуком, що передує ензиматичному гідролізу комерційною целюлозою та  $\beta$ -глюкозидазою [34]. Використання для подальшої ферментації зи-

гоміцетного гриба *Mucor hiemalis* дозволяє досягти рівня ензиматичного гідролізу до 79–92 % від теоретично розрахованого виходу.

Деякі джерела [35] зазначають, що всі види проса, включаючи пальчасте, містять приблизно 63–70 % від загальних карбогідратів, які в основному знаходяться в цілісному зерні, вільний цукор складає від 0,46 до 0,69 %, крохмаль – 56–61 %, целюлоза – 0,7–1,8 %, пентоза – 5,5–7,2 %. Екстракції цукрів 70%-им етиловим спиртом дозволяє отримати 1,5–4,3 % ксилози, 8,6–15 % фруктози, 9,9–15 % глюкози, 31–35 % сахарози, 9–11,0 % мальтози, 8,6–12 % рафінози, 5–6,1 % мальтотріози, 3–10 % нерозпізнаних компонентів і 5–9 % вищих олігосахаридів. Водорозчинний гумі містить арабінозу та ксилозу як головні компоненти цукрів разом з незначними кількостями маннози і галактози

і змінних кількостей глюкози. Арабіноксилани пальчастого проса добре охарактеризовані авторами [36]. Геміцелюлоза А складається головним чином з глюканів, що містять в незначних кількостях арабінозу і ксилозу [35]. Геміцелюлоза В містить арабінозу і ксилозу з невеликими кількостями глюкози і галактози [37].

Для з'ясування перспектив використання пальчастого проса у технологічному процесі отримання біоетанолу з цукрового сорго було проведено порівняльний аналіз структурно-морфологічних характеристик клітинної стінки обох досліджуваних видів рослин за допомогою мікроскопічних та біометричних методів. Для цього зразки стебел використаних у роботі сортів та сортозразків фіксували у розчині 3%-го формаліну впродовж доби з подальшим зневодненням та включенням у парафін. Після фарбування метиленовим синім було оцінено співвідношення товщини клітинної стінки основних типів тканин стебла, як це продемонстровано на прикладі цукрового сорго, а саме поперечного зрізу стебла (рис. 1, а), клітин камбію (рис. 1, б), провідних елементів (рис. 1, в), та паренхіми (рис. 1, г).

Біометричні показники клітинних стінок цукрового сорго та пальчастого проса аналізували за допомогою програми ImageJ (для оцінки кожного показника аналізували не менш, ніж 50 клітин). У табл. 3 наведені результати вимірювання товщини клітинної стінки досліджуваних сортів рослин.

Отримані дані свідчать про певні морфологічні відмінності будови клітинної стінки цукрового сорго та сортів пальчастого проса.

В цілому ж солома пальчастого проса, яка майже повністю складається з матеріалу клітинних стінок, містить перш за все карбогідрати, оточені лігніном, і невелику кількість структурних білків і мінералів. Іншими компонентами є залишки депонованих полісахаридів глюкози (глюкани), фруктози і маннани. Таким чином, у соломі целюлоза і ксилан геміцелюлоз є переважаючими компонентами, а також в обмеженій кількості присутні складові пектину і небагато маннанів. Хоча у соломі розрізняють такі біологічні фракції, як міжвузловиння, вузли, листя і полова, слід відзначити, що листя і вузли дуже подібні за вмістом азоту і структурних вуглеводів. Азоту і геміцелюлози більше в листі і вузлах при меншій кількості целюлози, ніж у міжвузловинні, тоді як більшість фракцій лігніну знаходяться в міжвузловинні [38]. Аналіз компонентів етанольного екстракту соломи вказує на вміст низькомолекулярних цукрів, фруктози, глюкози, сахарози, арабінітолу і манітолу. Приблизний склад компонентів злакової соломи наведено у табл. 4 [29]. Все це у сукупності дозволяє зробити певні узагальнення для визначення режиму попередньої обробки та ферментативного гідролізу целюлози пальчастого проса.

Таблиця 3

Товщина клітинної стінки досліджуваних форм та сортів цукрового сорго *Sorghum saccharatum* (L.) Moench і пальчастого проса *Eleusine coracana* (L.) Gaerth., мкм

Зразок	Тканина		
	Камбій	Провідний елемент	Паренхіма
<i>Sorghum saccharatum</i> , сорт Пам'яті Шепеля	34,5 ± 9,1	30,4 ± 4,5	28,3 ± 5,7
<i>Sorghum saccharatum</i> , сорт Ботанічний	12,2 ± 1,6	27,3 ± 6,7	20,3 ± 6,0
<i>Sorghum saccharatum</i> , форма ФЕЦЦФ-3	11,6 ± 3,1	26,7 ± 5,5	22,5 ± 3,9
<i>Eleusine coracana</i> , сорт Тропіканка	21,8 ± 5,6	92,6 ± 9,2	19,2 ± 5,8
<i>Eleusine coracana</i> , сорт Ярослав-8	29,8 ± 3,9	36,8 ± 4,7	21,6 ± 7,0
<i>Eleusine coracana</i> , сорт Євгенія	23,9 ± 3,7	29,5 ± 8,1	26,8 ± 7,8
<i>Eleusine coracana</i> , форма SE-1	28,0 ± 5,2	51,2 ± 7,8	31,7 ± 6,7

Щоб більш детально оцінити потенційні можливості використання соломи пальчастого проса у технологічному процесі отримання біоетанолу, можна послатися на дослідження, у якому вивчалися особливості отримання біоетанолу із сільськогосподарських відходів та соломи різних видів злаків (пшениця, ячмінь, тритикале, просо, цукрове сорго) через низку етапів хімічної попередньої обробки, ферментативного гідролізу і процесів бродіння [39]. Зазначимо, що сільськогосподарська солома та сіно в середньому містять 28,62–38,58 % глюкозу, 11,19–20,78 % ксилану і 22,01–27,57 % лігніну, роблячи їх перспективними для виробництва біоетанолу (табл. 5).

Таблиця 4

Усереднений склад компонентів злакової соломи

Компонент	% на абсолютно суху масу
Целюлоза	42,20
Геміцелюлоза	26,37
Лігнін	7,38
Протеїн	4,22
Зола	6,33

Як видно з даних, наведених у цій таблиці, особливої різниці між кількісним та якісним складами компонентів лігноцелюлозної частини досліджуваних сільськогосподарських рослин немає. Так, багаса цукрового сорго містить дещо більше целюлози (в сорго більше холоцелюлози та глюкозу — приблизно на 3 %), ніж багаса проса, а геміцелюлози, можливо, дещо більше у просі, оскільки різниця у кількості ксилану між ними складає всього 1,3 %. У кінцевому результаті авторами цього дослідження продемонстровано, що вихід етанолу після зброджування гідролізатів з різноманітної лігноцелюлозної сировини знаходився в межах 0,27–0,34 г/г або 52–65,82 % від теоретично максимального виходу етанолу.

#### ОПРАЦЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ КОМПЛЕКСНОГО ПЕРЕРОБЛЕННЯ БІОМАСИ ЦУКРОВОГО СОРГО ТА ПАЛЬЧАСТОГО ПРОСА У БІОЕТАНОЛ

Як уже зазначалося, лігноцелюлозна сировина вимагає попереднього оброблення для полегшення доступу ферментів до целюлозних волокон. Застосовуються різні види механічної, хімічної і теплової дій: подрібнення на ку-

Таблиця 5

Відносний відсотковий склад необробленої лігноцелюлозної сировини<sup>a</sup>

Лігно-целюлозна сировина	Загальні СР	Холоцелюлоза	Арабінан	Галактан	Глюкан	Ксилан	КРЛ <sup>b</sup>	КНЛ <sup>c</sup>	Зола
Ячмінне сіно	92,35 (0,49)	40,58 (0,64)	1,55 (0,07)	0,03 (0,04)	28,62 (1,77)	11,19 (1,06)	4,75 (0,18)	17,26В (1,06)	7,04 (0,08)
Ячмінна солома	93,34 (0,13)	58,46 (0,78)	1,70 (0,21)	0,00 (0,00)	38,58 (2,27)	19,64 (1,43)	2,18 (0,04)	25,39А (1,35)	5,26 (0,08)
Перлове просо (сіно)	93,59 (0,42)	43,75 (1,21)	2,83 (0,07)	0,44 (0,05)	28,76 (2,99)	14,39 (0,67)	5,29 (0,06)	16,72В (0,59)	10,72 (0,08)
Цукрове сорго (сіно)	89,01 (0,11)	46,21 (0,58)	2,01 (0,18)	0,38 (0,11)	30,36 (1,59)	13,08 (0,87)	5,65 (0,08)	16,39В (1,58)	8,45 (0,19)
Тритикале сіно	92,76 (0,07)	53,14 (0,92)	1,30 (0,10)	0,00 (0,00)	28,13 (2,27)	12,62 (0,98)	3,96 (0,18)	22,14А (0,43)	9,62 (0,38)
Тритикале солома	95,47 (0,22)	56,43 (0,54)	2,07 (0,06)	0,05 (0,07)	35,91 (1,16)	20,78 (0,98)	2,07 (0,13)	23,01А (0,32)	8,23 (0,08)

Примітка. <sup>a</sup> — значення в круглих дужках — стандартні відхилення; <sup>b</sup> — кислотно розчинний лігнін; <sup>c</sup> — кислотно нерозчинний лігнін

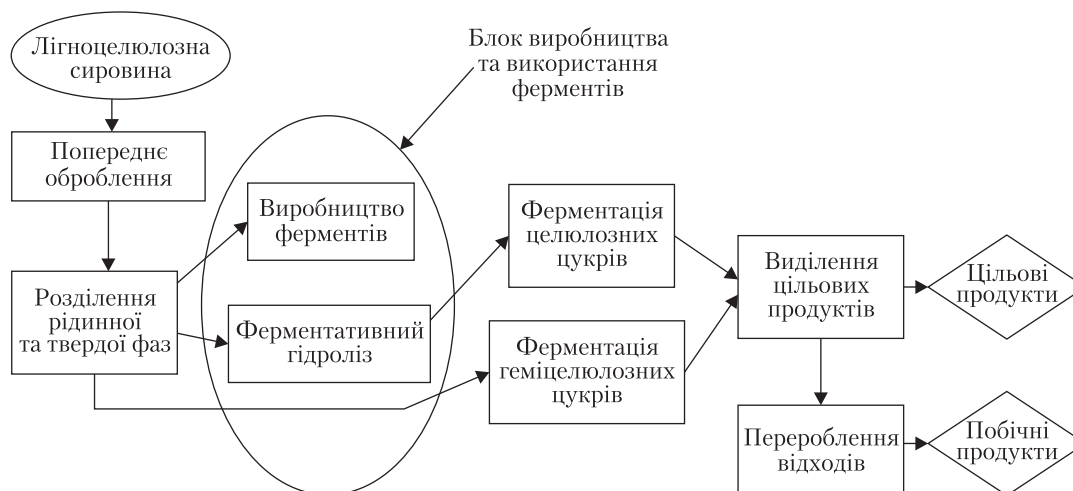


Рис. 2. Схема перероблення лігноцелюлозної сировини з попереднім гідролізом

льових млинах, м'який кислотний гідроліз, оброблення парою при температурі 180–220 °С і швидке зниження тиску, екструзійне оброблення [33, 40]. Для кожного виду сировини підбираються такі технологічні рішення, які мінімізують витрати енергії і води, ферментних препаратів, тривалість оброблення при задовільному виході цукрів. У всіх випадках необхідно намагатися досягти якнайтоншого подрібнення сировини, проте таке намагання обмежується пропорційним зростанням енерговитрат. При попередньому обробленні прагнуть зменшити ступінь кристалічності субстрату (целюлозних волокон), тим самим збільшуючи її питому поверхню [40].

Існуючі на сьогоднішній день технології, найбільш наближені до комерційного використання, передбачають оброблення подрібненої сировини слабкими розчинами мінеральних кислот і тепловим впливом. Це дозволяє завершити гідроліз більшої частини геміцелюлоз і забезпечити перехід утворених пентоз у розчин (рис. 2) [26]. Попереднє оброблення прагнуть проводити в максимально м'яких умовах, щоб не допустити утворення фурфуролу (із пентоз) і оксиметилфурфуролу (із гексоз), які негативно впливають на стан мікроорганізмів у процесі бродіння [41]. Надалі рідину відокремлюють від твердої фази і направляють на зброджування спеціалізованими мікроорганізмами, які здатні здійснювати біоконверсію пентоз в етанол.

З урахуванням цих обставин нами ставилося завдання опрацювати у дослідно-виробничих умовах основні стадії технологічного процесу виробництва біоетанолу із біомаси цукрового сорго та пальчастого проса. У найбільш повному вигляді пропонується нами принципова схема технологічного процесу наведена на рис. 3.

Згідно з пропонованою схемою стебла цукрового сорго надходять на завод, де механічним пресуванням з них відтискується цукровмісний сік. Сік зброджується за допомогою дріжджів *Sacch. cerevisiae*. Отримана культуральна рідина направляється на дистиляцію та зневодження біоетанолу до нормативних показників. Отримана внаслідок механічного пресування багаса цукрового сорго змішується з подрібненою соломою пальчастого проса і надходить на термообробку при температурі 90–95 °С у суміші з кислими продуктами дистиляції та концентрування біоетанолу (рН 3–4). Оброблена таким чином лігноцелюлозна біомаса у значній мірі звільняється від лігніну та геміцелюлози, продукти гідролізу яких відокремлюються від целюлози, яка не розчи-

нюють від твердої фази і направляють на зброджування спеціалізованими мікроорганізмами, які здатні здійснювати біоконверсію пентоз в етанол.

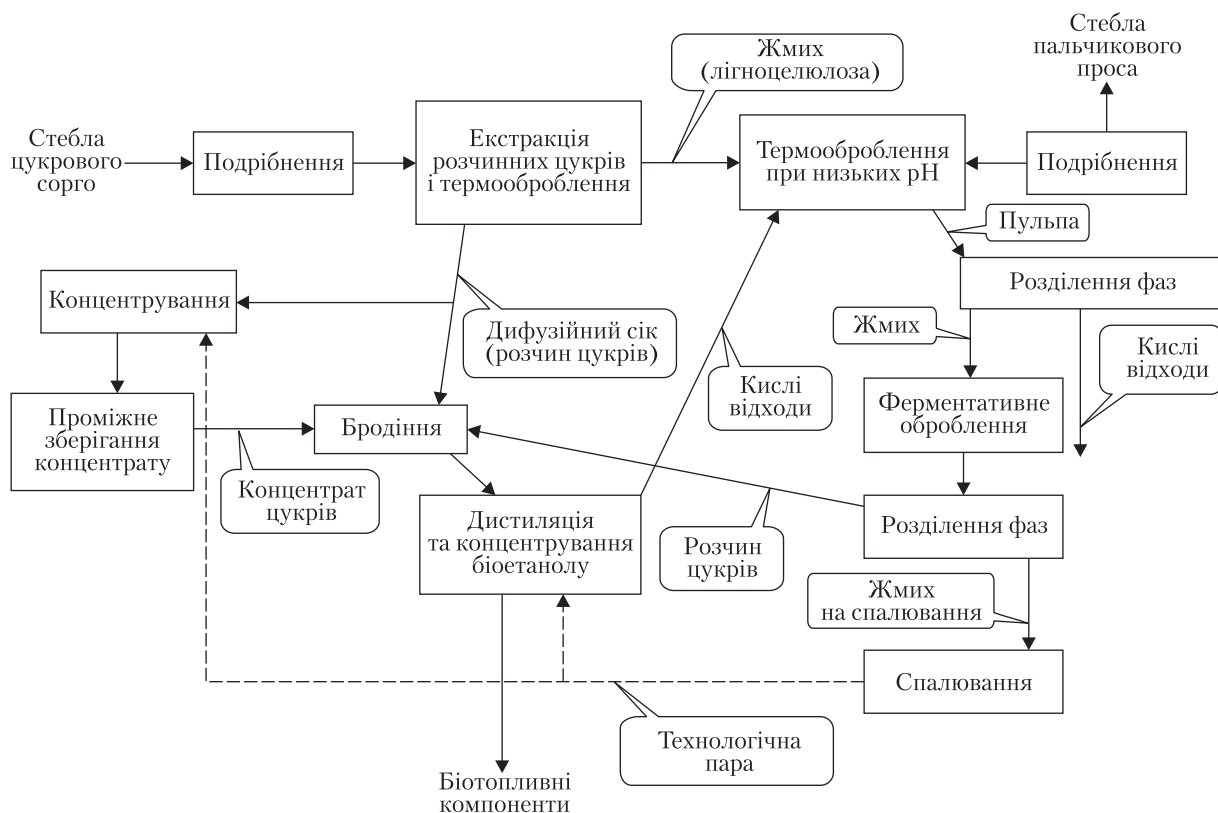


Рис. 3. Схема технологічного процесу комплексного перероблення біомаси цукрового сорго та пальчастого проса у біоетанол

Таблиця 6

Способи попередньої підготовки лігноцелюлозної сировини

Спосіб оброблення	Реагенти	Температура, °C	Тиск, бар	Тривалість оброблення, хв	СР, %
Розбавлена сірчана кислота (в паралельному потоці)	0,5–3,0 %	130–200	5–15	2–30	10–40
Розбавлена сірчана кислота (в протитечії)	0,0–0,1 %	190–200	20–24	12–24	2–4
Вода з низьким рН	Вода, барда	160–190	6–14	10–30	5–30
Безводний аміак	100 %	70–90	15–20	<5	60–90
Водний розчин аміаку	10–15 %	150–170	19–17	10–20	15–30
Вапняний розчин	0,05–0,15 г Ca(OH) <sub>2</sub> / г біомаси	70–130	1–6	1–6 год.	5–20
Вапняний розчин + повітря	0,05–0,15 г Ca(OH) <sub>2</sub> / г біомаси	25–60	1	2–8 тижнів	10–20
Кислотні відходи дистиляції та концентрування + сірчана кислота	Лютерна вода + 0,1 % кислота	90–95	1	60	30



няється при зазначеному режимі термообробки. Надалі целюлоза (глюкан) піддається ферментативному гідролізу спеціалізованими ферментними препаратами, гідролізат відокремлюється від нерозчинених компонентів та направляється на ферментацію разом з сорговим соком.

Зазначена технологічна схема комплексно-го перероблення біомаси в біоетанол у повному обсязі може бути реалізована лише в умовах спеціалізованого дослідно-промислового виробництва, для якого потрібно закупити, розробити та виготовити за переліком декілька позицій нового (основного) технологічного обладнання:

- ✦ реактор для попереднього термооброблення лігноцелюлозної біомаси;
- ✦ подрібнювачі для лігноцелюлозної біомаси;
- ✦ реактор для ферментативного оброблення целюлози;
- ✦ відокремлювачі пульпи від нерозчинних компонентів біомаси;
- ✦ вакуум-випарна установка для концентрування (згущення) соку тощо.

#### **ПРОМИСЛОВЕ ВИПРОБУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ОТРИМАННЯ БІОЕТАНОЛУ З БІОМАСИ ЦУКРОВОГО СОРГО ТА ПАЛЬЧАСТОГО ПРОСА**

Незважаючи на близькі структурно-хімічні властивості лігноцелюлозної біомаси різних злакових культур, технологія її попереднього підготовки для отримання біоетанолу залежить від особливостей складу та структури рослинної сировини. У табл. 6 наведена характеристика найбільш поширених способів попередньої підготовки лігноцелюлозної сировини, які застосовуються і удосконалюються на цей час. Солома пальчастого проса, яка найбільш важко піддається гідролізу, вимагає жорсткішого теплового і хімічного оброблення. Тому нами був розроблений та використаний спосіб термообробки біомаси пальчастого проса при атмосферному тиску (останній рядок табл. 6).

Для попередньої підготовки лігноцелюлозної сировини використовували модельний

розчин, що імітує кислотні продукти дистиляції та концентрування біоетанолу з доданням 0,1%-го розчину сірчаної кислоти. Ферментативний гідроліз попередньо підготовленої сировини здійснювали за допомогою целюлозного ферментного комплексу для гідролізу ліг-

Таблиця 7

#### **Відносний склад ізомерних форм моноцукрів геміцелюлозної паренхіми цукрового сорго**

Моноцукри	Кількість ізомерів, %
L-арабіноза	
α-ізомер	38,8
β-ізомер	53,8
γ-ізомер	7,4
D-ксилоза	
α-ізомер	47,3
β-ізомер	47,2
γ-ізомер	5,5
D-маноза	
α-ізомер	82,4
β-ізомер	17,6
D-галактоза	
α-ізомер	35,7
β-ізомер	49,8
γ-ізомер	14,4
D-глюкоза	
α-ізомер	45,3
β-ізомер	54,7

Таблиця 8

#### **Відносний вміст моноцукрів у соломі пальчастого проса і в багасі цукрового сорго (% в повітряно-сухій масі)**

Моноцукри	Багаса цукрового сорго	Солома пальчастого проса
Арабіноза	6,98	4,98
Галактоза	1,76	0,50
Глюкоза	62,19	56,42
Ксилоза	21,22	28,38
Не ідентифіковані	6,72	8,92

ноцеллюлозної біомаси ACCELERASE™ 1500 (Genencor, США) в оптимальних умовах, рекомендованих виробником: температура процесу – 50 °С, рН = 5,0 (допустимий діапазон 50–65 °С; рН 4–5).

Для хроматографічного аналізу отриманих гідролізатів використовували триметилсиланові (ТМС) похідні моноцукрів, які отримували шляхом синтезу з триметилхлорсиланом у присутності піридину. Газохроматографічні вимірювання виконували на хроматографі «Цвет-100». Оскільки моноцукри в розчині знаходяться у вигляді кількох ізомерних форм, між якими встановлюється певна рівновага, це призводить до того, що на хроматограмі візуалізується не одна смуга для кожного моноцукру, а дві-три. Виходячи з цього, ідентифікацію окремих ізомерів моноцукрів в гідролізаті виконували за допомогою відповідних стандартів. У табл. 7 наведено склад ізомерних форм ТМС–похідних арабінози, ксилози, маннози, галактози і глюкози, що були визначені в даних умовах. З цією метою кількість кожного з моноцукрів у суміші визначали за методом нормування площин.

Хроматографічне визначення важкодоступних для гідролізу поліцукрів целюлози проводили у вигляді ацетильованих поліолів (див. табл. 8).

Потенційний вихід біоетанолу з біомаси було розраховано на основі даних щодо вмісту

гексоз, які можуть бути ферментовані промисловими штамами *Sacch. cerevisiae*. Наразі ведуться роботи з отримання рекомбінантних дріжджів, які можуть ферментувати в етанол пентози з геміцелюлоз біомаси, однак вони ще не мають промислового застосування [5]. Тому реальний вихід біоетанолу розрахований зважаючи на неповний ферментативний гідроліз целюлози в реальних виробничих умовах. Результати розрахунків наведені в табл. 9.

Наведені дані свідчать про те, що найбільший потенціал для підвищення виходу продукту має біомаса пальчастого проса та багаса цукрового сорго – лігноцелюлозна сировина. Подальші зусилля щодо удосконалення технології мають бути спрямовані на підвищення декстрозного еквіваленту в процесі гідролізу целюлози, оскільки підвищення концентрації ферментного комплексу ACCELERASE™ 1500 не дає поглиблення гідролізу. Досягти більш глибокого гідролізу можна двома шляхами:

- ✦ удосконаленням технології попереднього оброблення сировини;
- ✦ розробленням нових або пошуком існуючих більш ефективних целюлозолітичних ферментних препаратів.

Таким чином, при розрахунку обладнання для дослідно-промислового виробництва необхідно орієнтуватись на дані, наведені в табл. 9.

Оскільки в рамках цього проекту не передбачалося фінансування капітальних витрат на

Таблиця 9

Потенційний вихід біоетанолу з біомаси цукрового сорго та пальчастого проса

Вид сировини	Співвідношення видів сировини за сухою речовиною (СР)	Вміст целюлози або розчинних цукрів у сировині, % від СР	Вологість, %	Вихід доступних для ферментації цукрів, % від СР	Реальний вихід етанолу, м <sup>3</sup> /т СР	Потенційний вихід етанолу, м <sup>3</sup> /т СР
Солома пальчастого проса (целюлоза)	1,00	35	20	10	6,6	23
Стебла цукрового сорго (розчинні цукри)	0,40	40	70	35	23,1	26
Багаса цукрового сорго (целюлоза)	0,60	20	50	10	4,0	13

Примітка. З урахуванням різної вологості зразків розрахунки зроблені на суху речовину (СР) біомаси.

будівництво дослідно-промислової технологічної лінії, то для випробування та апробації розроблених технологічних рішень нами було використано існуюче технологічне обладнання на двох діючих підприємствах: ПАТ «Шепетівський цукровий комбінат» Хмельницької обл. та ЗАТ «Еко-Енергія» (Будильський експериментальний завод) Сумської обл., керівництво яких люб'язно погодилося співпрацювати з ДУ «ІХБГ НАН України» у виконанні цієї роботи на умовах творчої співдружності.

Необхідна рослинна сировина була вирощена на земельних угіддях ПАТ «Шепетівський цукровий комбінат», перероблена у готову для ферментації суміш розчинних цукрів. Хімічний склад біомаси цукрового сорго, використаної для отримання соку, наведено у табл. 10.

Після механічного подрібнення із стебел сорго було отримано цукровий сік шляхом віджиму на пресі. Цей сік являє собою рідину зелено-сірого кольору, з якої при відстоюванні відокремлюється пухкий осад, який складається в основному з білків, хлорофілу і мезги.

Шляхом випарювання води із соргоцукрового соку у випарювальній установці Шепетівського цукрокомбінату одержували сироп цукрового сорго — т. з. *сорговий мед* із вмістом сухих речовин близько 65 %. Такий сироп має густину 1,33–1,35 т/м<sup>3</sup>, а тому стабільно зберігається на протязі тривалого проміжку часу, що дає можливість використовувати його при виробництві біоетанолу подібно до бурякової меляси. Склад продуктів, отриманих внаслідок

док переробки стебел цукрового сорго, наведений у табл. 11. Необхідно зазначити, що склад продуктів, отриманих із сорго, вирощеного в інших ґрунтово-кліматичних умовах, може істотно відрізнятись.

Отриманий сироп цукрового сорго був доставлений на підприємство ЗАТ «Еко-Енергія», де його використовували для приготування поживного середовища з подальшою апробацією в промислових умовах процесів ферментації цукрів в етанол. Було проведено дистиляцію ферментованого соку, концентрування і зневоднення летких компонентів. Зокрема, технологію вироблення етанолу з цукрового сорго та виділення останнього разом із супровідними леткими продуктами метаболізму спиртового бродіння було завершено отриманням товарного продукту — паливного оксигенату ОМП-А. Загалом, на обладнанні обох підприємств-партнерів у 2010 р. було перероблено

Таблиця 10

Хімічний склад біомаси (стебел) цукрового сорго, використаної для отримання соку

Хімічний склад	Вміст, мас. %
Сухі речовини	25–28
Вода	72–75
Сахароза	6–8
Глюкоза	2–4
Фруктоза	2–4
Зброджувані цукри	15–18

Таблиця 11

Хімічний склад продуктів, отриманих із стебел цукрового сорго

Найменування показника	Одиниця вимірювання	Цукровий сік сорго	Цукровий сироп сорго
Вода	%	82,75	30,59
Сира зола	% у сухій речовині	0,59	4,10
Загальний цукор	%	16,54	63,73
Моносахариди	%	10,42	26,20
Фосфор	мг/кг	0,29	1,28
Кальцій	мг/кг	0,56	2,37
Нітрати	мг/кг	177,0	1489,0

близько 2 т біомаси і отримано 120 л паливного оксигенату ОМП-А, до складу якого входить вироблений етанол. У процесі роботи були перевірені запропоновані технологічні режими та прийоми, які складають предмет патентування та ноу-хау.

### ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

На закінчення слід відзначити, що графік роботи біопаливного підприємства практично збігається з режимом роботи цукрового заводу. Протягом тримісячного сезону збирання біомаси цукрового сорго підприємство може приймати і переробляти сировину в первинний рослинний сік із вмістом загальних цукрів 12–14 %, а далі у вторинний концентрований рослинний сік — сироп цукрового сорго — із вмістом 60–75 % від загальних цукрів, який буде надходити на зберігання за аналогією зі зберіганням бурякової меляси. Виробництво власне біоетанолу може розпочинатися з перероблювання соку цукрового сорго з подальшим переходом на використання сиропу після закінчення збирання врожаю сорго. Потужність технологічної лінії ферментування, дистилювання та ректифікація біоетанолу мають розраховуватися на закінчення «сезону» перероблення сиропу цукрового сорго торішнього врожаю перед початком збирання цьогорічного за винятком періоду планово-попереджувального ремонту. Таким чином, біопаливне підприємство може функціонувати 300–350 діб на рік [24].

Перевага цукрового сорго як сировини для виробництва полягає також у можливості використання багаси цукрового сорго для самозабезпечення підприємства тепловою енергією. За даними російських науковців співвідношення кількості отриманої та витраченої енергії при одержанні етанолу із зерна, цукрової тростини та маніюки складає від 1,1 — 1,4 (для зерна) до 2,1 (для цукрової тростини) [4]. З кожною тонною цукрів, що використовується на виробництво біопалива, на завод надходить дві тонни лігноцелюлози з багасою цукрового сорго. Теплотворна здатність її горю-

чої маси складає від 3731 до 4363 МДж/т. Це паливо у два рази перевищує потреби в теплової енергії для згущення соргоцукрового соку в сироп і забезпечення виробництва біоетанолу в період збирання врожаю. За вказаною схемою працюють заводи, що здійснюють переробку цукрової тростини і мають при цьому собівартість виробленого біоетанолу в межах 0,20–0,25 дол. США за літр. На жаль, собівартість біоетанолу українського виробництва з традиційної сировини зараз у 3–4 рази вища.

Апробовані стадії технологічного процесу не є вичерпними для реалізації запропонованої технології. Для перевірки в дослідно-промислових умовах всієї технологічної лінії потрібне створення пілотного виробництва, що матиме відповідне спеціалізоване обладнання для кожної технологічної стадії. Особливо це стосується таких стадій, як подрібнення і попередня підготовка лігноцелюлозної сировини, розділення кислотних відходів та біомаси після попередньої підготовки, відокремлення розчину цукрів від негідролізованої біомаси при використанні целюлаз. Звісно, капітальні витрати на створення обладнання не були передбачені в рамках виконання нашого науково-технічного проекту. Проте отримані результати можуть бути покладені в основу проектування дослідно-промислового виробництва рідинних паливних компонентів з біомаси цукрового сорго, пальчастого проса та іншої рослинної сировини.

Інститут харчової біотехнології та геноміки НАН України за останні 10 років набув значного досвіду у вирішенні задач, пов'язаних з виробництвом біопалив. Наукові розробки інституту випробувані та апробовані у виробничих умовах. Досягнутий науково-технічний потенціал є достатнім для створення пілотного заводу для відпрацювання технології біопалив із сировини другого покоління в дослідно-промислових умовах. Створення пілотного виробництва для відпрацювання промислової технології одержання біопалива із сировини другого покоління вимагає підтримки з боку

Уряду України в питанні визначення базового промислового об'єкта (проммайданчика), на якому може бути розгорнуто будівництво пілотного заводу, а також для фінансування та координації цих робіт. Інститут може розробити і надати Кабінету Міністрів України обґрунтовані пропозиції щодо створення пілотного заводу для відпрацювання технології виробництва рідинних біопалив із сировини другого покоління.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *OECD/FAO (2012) Chapter 3. Biofuels.* In: OECD-FAO Agricultural Outlook 2012-2021 (DOI: 10.1787/agr\_outlook-2012-en). — OECD Publishing and FAO, 2012. — P. 77–117.
2. *Калетник Г.М., Циганков С.П., Володько О.І.* Новітні технології біоенергоконверсії і перспективи використання паливного біоетанолу в Україні // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Економічні науки. — Вінниця, 2011. — Випуск 1(48). — Т. 2 — С. 109–112.
3. *Цыганков С. П.* Биоэтанол. — К.: НПП «Интерсервис», 2010. — 160 с.
4. *Кухаренко А.А., Винаров А.Ю.* Безотходная биотехнология этилового спирта. — М.: Энергоатомиздат, 2001. — 272 с.
5. *Блюм Я.Б., Гелетуха Г.Г., Григорюк І.П. та ін.* Біологічні ресурси і технології виробництва біопалива. — К.: Аграр Медіа Груп, 2010. — 408 с.
6. *Fairley P.* Next generation biofuels. — Nature. — 2011. — 474. — P. S2–S5.
7. *Stephen J.D., Mabee W.E., Saddler J.N.* Will second-generation ethanol be able to compete with first-generation ethanol? Opportunities for cost reduction. — Biofuels, Bioprod. Bioref. — 2012. — V. 6. — P. 159–176.
8. *Володько А.И., Новак А.Г., Цыганков С.П.* Сахарное сорго — энергетическая культура для производства биоэтанола в Украине // Відновлювана енергетика. — 2012. — Т. 29, № 2. — С. 87–92.
9. *Almodares A., Hadi M.R.* Production of bioethanol from sweet sorghum: A review. — African J. Agricultural Res. — 2009. — V. 4, № 9. — P. 772–780.
10. *Han K.-J., Pitman W.D., Kim M. et al.* Ethanol production potential of sweet sorghum assessed using forage fiber analysis procedures. — GCB Bioenergy. — 2012. — doi: 10.1111/j.1757-1707.2012.01203.x.
11. *Kim M., Han K.-J., Jeong Y., Day D.F.* Utilization of whole sweet sorghum containing juice, leaves, and bagasse for bio-ethanol production. — Food Sci. Biotechnol. — 2012. — V. 21, № 4. — P. 1075–1080.
12. *Володько О.І., Циганков С.П.* Розробка біотехнології отримання паливного етанолу із цукрового сорго // Біотехнологія XXI століття: Тези доповідей IV Всеукраїнської науково-практичної конференції. — Київ, 5 квітня 2012 р. — Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут». — 2012. — С. 27–28.
13. *Блюм Я., Рахметов Д., Стадничук Н.* Пальчатое просо, или элевсина: находка для небольших хозяйств // Зерно. — 2012. — Т. 72, № 4. — С. 66–72.
14. *Reddy V.D., Rao K.V., Reddy T.P., Kishor P.B.K.* Finger millet // In: Compendium of Transgenic Crop Plants: Transgenic Cereals and Forage Grasses (Eds Kole C. and Hall T.C.). — 2008. — Blackwell Publishing Ltd. — P. 191–198.
15. *Ковальчук В.П., Григоренко Н.О., Костенко О.І.* Цукрове сорго — цукровмісна сировина та потенційне джерело енергії // Цукрові буряки. — 2009. — № 6. — С. 6–7.
16. *Баер Г.Я., Емець А.И., Стадничук Н.А. и др.* Соматическая вариабельность у *Eleusine coracana* (L.) Gaertn. как источник для создания новых сортов // Цитология и генетика. — 2007. — Т. 41, № 4. — С. 9–14.
17. *Баер Г.Я., Рахметов Д.Б., Стадничук Н.А. и др.* Использование культуры *in vitro* для получения селекционного материала пальчатого проса *Eleusine coracana* (L.) Gaertn // Физиология и биохимия культурных растений. — 2009. — Т. 41, № 2. — С. 140–145.
18. *Емець А.И., Баер Г.Я., Климкина Л.А. и др.* Введение в культуру *in vitro* и регенерация растений дагуссы *Eleusine coracana* (L.) Gaertn. сорго Тропиканка // Физиол. биохим. культ. растений. — 2003. — Т. 35, № 2. — С. 1–8.
19. *Рахметов Д.Б., Стадничук Н.О., Блюм Я.Б. та ін.* Методика проведення експертизи сортів елевсини (дагуси) (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn.) на відмінність, однорідність і стабільність // Офіційний бюлетень «Охорона прав на сорти рослин»: Методики проведення експертизи рослин на відмість, однорідність і стабільність. — 2007. — Ч. 2, № 3. — С. 197–209.
20. *Radchuk V., Radchuk R., Pirko Y. et al.* A somaclonal line SE7 of finger millet (*Eleusine coracana*) exhibits modified cytokinin homeostasis and increased grain yield // J. Exp. Bot. — 2012. — Vol. 63, № 15. — P. 5497–5506.
21. *Рахметов Д.Б., Мартинюк Г.М., Блюм Я.Б.* Заявка № 10472003 від 03.11.2010 р. про авторство на сорт рослин «Ботанічний» Соргоцукрове *Sorghum saccharatum* (L.) Pers. Державна служба з охорони прав на сорти рослин, 2013.
22. *Блюм Я.Б., Емець А.И., Рахметов Д.Б., Стадничук Н.О.* Свідоцтво № 120109 про авторство на сорт рослин «Євгенія» Пальчасте просо (Дагуса) *Eleusine coracana*

- (L.) Gaertn. Заявка № 10344001 від 03.11.2010 р. Державна служба з охорони прав на сорти рослин, 2012.
23. Стаднічук Н.О., Баєр Г.Я., Ємець А.І. та ін. Свідоцтво № 09551 про авторство на сорт рослин «Ярослав-8» Елевсіна (Дагуса) *Eleusine coracana* (L.) Gaertn. Заявка № 08324001 від 03.11.2008 р. Державна служба з охорони прав на сорти рослин, 2009.
  24. Циганков С.П., Володько О.І., Новак А.Г., Агарков М.М. Цукрове сорго – перспективна сировина для виробництва біоетанолу // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. – 2010. – Т. 2 – Виш. 42. – С. 88–91.
  25. Jiang S.-Y., Ma Z., Vanitha J., Ramachandran S. Genetic variation and expression diversity between grain and sweet sorghum lines // *BMC Genomics*. – 2013. – № 14. – 18 doi:10.1186/1471-2164-14-18.
  26. Блюм Я.Б., Гелетуха Г.Г., Григорюк І.П. та ін. Новітні технології біоенергоконверсії. – К.: Аграр Медіа Груп, 2010. – 326 с.
  27. McDonald P., Edwards R.A., Greenhalgh J.F.D., Morgan C.A. Animal nutrition // England: Longman Scientific & Technical. – 1995. – № 5. – P. 465–480.
  28. Sipos B., Réczey J., Somorai Z. et al. Sweet sorghum as feedstock for ethanol production: enzymatic hydrolysis of steam-pretreated bagasse. – *Appl Biochem Biotechnol*. – 2009. – № 153. – P. 151–162.
  29. Antongiovanni M., Sargentini C. Variability in chemical composition of straws // *Options Méditerranéennes – Série Séminaires*. – 1991. – № 16. – P. 49–53.
  30. Wiselogle A., Tyson S., Johnson D. Biomass feedstock resources and composition. – In: Handbook on bioethanol: Production and utilization C. E. Wyman (Ed.), Washington, DC: Taylor & Francis. – 1996. – P. 105–119.
  31. Kim M., Day D.F. Composition of sugar cane, energy cane, and sweet sorghum suitable for ethanol production at Louisiana sugar mills. – *J. Ind. Microbiol. Biotechnol*. – 2011. – 38. – P. 803–807.
  32. Stevens G., Holou R., Dunn D., Wrather A. Switchgrass and sweet sorghum fertilization for bioenergy feedstocks // In: Proc. Southern Plant Nutrition Management Conf. 6 – 7 Oct. Olive Branch, MS. – 2009. – P. 38–45.
  33. Heredia-Olea E., Pérez-Carrillo E., Serna-Saldívar S.O. Production of ethanol from sweet sorghum bagasse pretreated with different chemical and physical processes and saccharified with fiber degrading enzymes // *Biorresource Technol*. – 2013. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.162>.
  34. Goshadrou A., Karimi K., Taherzadeh M.J. Bioethanol production from sweet sorghum bagasse by *Mucor hienalis* // *Industrial Crops and Products*. – 2011. – V. 34, № 1. – P. 1219–1225.
  35. Wankhede D.B., Shehnaaj A., Raghavendra M.R. Carbohydrate composition of finger millet (*Eleusine coracana*) and foxtail millet (*Setaria italica*) // *Plant Foods for Human Nutrition*. – 1978. – V. 28, № 4. – P. 293–303.
  36. Subba Rao M.V.S.S.T., Muralikrishna G. Structural analysis of arabinoxylans isolated from native and malted finger millet (*Eleusine coracana*, ragi) // *Carbohydr. Res.* – 2004. – V. 14, № 339. – P. 2457–2463.
  37. Subba Rao M.V.S.S.T., Muralikrishna G. Hemicelluloses of ragi (finger millet, **Eleusine coracana**, Indaf-15): Isolation and purification of an alkali-extractable arabinoxylan from native and malted hemicellulose B. // *J. Agricult. Food Chem.* – 2006. – № 54. – P. 2342–2349.
  38. de S. Thiago L.R.L., Kellaway R.C. Botanical composition and extent of lignification affecting digestibility of wheat and oat straw and paspalum hay // *Anim. Feed Sci. Technol.* – 1982. – № 7. – P. 71–81.
  39. Chen Y., Sharma-Shivappa R.R., Keshwani D., Chen C. Potential of agricultural residues and hay for bioethanol production // *Appl. Biochem. Biotechnol.* – 2007. – V. 142, № 3. – P. 276–290.
  40. Chang V.S., Holtzapple M.T. Fundamental factors affecting enzymatic reactivity // *Appl. Biochem. Biotechnol.* – 2000. – № 84–86. – P. 5–37.
  41. Larsson S., Palmqvist E., Hahn-Höggerdal B. et al. The generation of fermentation inhibitors during dilute acid hydrolysis of softwood // *Enzyme Microb. Technol.* – 1999. – № 3-4. – P. 151–159.

С.П. Циганков, А.И. Володько, А.И. Емец, Г.В. Лантух,  
Д.И. Литвин, К.Н. Лукашевич, А.Г. Новак, С.П. Ожередов,  
Д.Б. Рахметов, С.И. Спивак, Я.Б. Блюм

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
КОМПЛЕКСНОГО ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ  
УГЛЕВОДНОГО СОСТАВА РАСТИТЕЛЬНОГО  
СЫРЬЯ В БИОЭТАНОЛ

Описаны результаты разработки и испытания опытной технологии переработки сахарного сорго и пальчатого проса в биоэтанол. Определено содержание и спектр углеводов биомассы исследованного растительного сырья. Определен потенциальный выход биоэтанола из углеводов сахарного сорго и пальчатого проса. Получены основные технологические параметры подготовки обоих видов растительного сырья к спиртовой ферментации. Предложена концепция опытной технологии получения биоэтанола из углеводного сырья первого и второго поколений. Произведено испытание комплексной трансформации углеводов растительного сырья в биоэтанол.

*Ключевые слова:* биоэтанол, углеводное сырье, сахарное сорго, пальчатое просо, гидролиз лигноцеллюлозы, ферментирование.

S.P. Tsygankov, O.I. Volodko, A.I. Yemets, H.V. Lantukh,  
D.I. Lytvyn, K.M. Lukashevich, A.H. Novak, S.P. Ozheredov,  
D.B. Rakhmetov, S.I. Spivak, Y.B. Blume

DEVELOPMENT AND TESTING THE TECHNOLOGY  
OF COMPLEX TRANSFORMATION OF  
CARBOHYDRATES FROM VEGETABLE RAW  
MATERIALS INTO BIOETHANOL

Results of development and testing the tentative technology of sweet sorghum and finger millet processing into bioethanol are described. The carbohydrates content and range of the studied vegetable biomass as the raw material is defined. Bioethanol potential output from sugar sorghum and finger millet carbohydrates and key technological parameters of preparation of both types of vegetable raw material for alcohol fermentation are defined. The concept of the tentative technology of bioethanol production from carbohydrate raw material of the first and second generations is offered. Testing of complex transformation of carbohydrates from vegetable raw materials into bioethanol is performed.

*Key words:* bioethanol, carbohydrate raw sweet sorghum, finger millet, lignotselyulozy hydrolysis, fermentation.

Стаття надійшла до редакції 29.03.13