

УДК 330.3: 664.1

doi: 10.20998/2413-4295.2024.03.03

## ВІДХОДИ ВИРОБНИЦТВА ЦУКРУ ТА ЇХ РАЦІОНАЛЬНЕ ВИКОРИСТАННЯ

А. О. БЕЗПАЛА<sup>1</sup>, А. В. ШАПОВАЛ<sup>1</sup>, Д. І. САВАЙЛО<sup>1</sup>, А. О. ДЕМИДОВА<sup>2</sup>, О. М. ПІВЕНЬ<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Кафедра технології жири та продуктів бродіння, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

<sup>2</sup>Кафедра харчових технологій та готельно-ресторанної справи, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, м. Запоріжжя, УКРАЇНА

\*e-mail: olena.piven@khpri.edu.ua

**АНОТАЦІЯ** У процесі перероблення сільськогосподарських культур утворюється велика кількість відходів. Більшість з них можна використати як джерела енергії, добрива, складові кормів, сировину для харчових, фармацевтичних та інших виробництв тощо. Таким чином одним з найбільш перспективних напрямів розвитку агропереробного сектору України є впровадження технологій перетворення відходів на продукти з високою доданою вартістю. Одержання цукру з цукрових буряків супроводжується утворенням великої кількості різноманітних лігноцелюлозних відходів, утилізація яких становить велику екологічну проблему. Для формування подальших шляхів впровадження ресурсоощадних технологій виробництва бурякового цукру детально вивчено перспективні методи використання його відходів. В статті наведені методи валоризації цукрового виробництва за рахунок використання меляси, бурякового бадилля та жому. Розвиток агропромислового комплексу України буде пов'язаний з біопереробкою різноманітних відходів, біотехнологічні методи сьогодні є потужним способом підвищення рентабельності багатьох харчових виробництв, у тому числі цукрового. Окремою важливою проблемою зменшення навантаження на навколишнє середовище є розроблення технологій використання поновлювальних джерел енергії, в статті показано перспективність використання відходів виробництва цукру як джерел чистих, ефективних технологій одержання енергії, цінних хімічних речовин, у тому числі біопалива. Продемонстрована можливість одержання на базі цукрових відходів етилового спирту, харчових кислот, ферментів, білку, пекарських дріжджів, пектину, харчових добавок, біодобрив, цінних кормових компонентів тощо. Висвітили деякі нещодавні дослідження щодо очищення водою за рахунок гідрогелів та фотокаталізаторів, а також біопластику на базі бурякового жому. Всі ці технології базуються на здатності відходів виробництва цукру досить легко зброджуватися з утворенням великого різноманіття кінцевих та побічних продуктів, більшість з яких є корисними в різних видах діяльності людства. Більш детального вивчення потребує економічна оцінка доцільності впровадження цих технологій з оглядом на українські реалії.

**Ключові слова:** цукровий буряк; відходи; бурякове бадилля; жом; меляса; цукрова промисловість

## SUGAR PRODUCTION WASTE AND THEIR RATIONAL USE

A. BEZPALA<sup>1</sup>, A. SHAPOVAL<sup>1</sup>, D. SAVAILO<sup>1</sup>, A. DEMYDOVA<sup>2</sup>, O. PIVEN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Fat and Fermentation Products Technologies, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

<sup>2</sup>Department of Food Technologies and Hotel-Restaurant Business, Dmytro Motorny Tavri State Agro-Technological University, Zaporizhzhia, UKRAINE

**ABSTRACT** In the process of processing agricultural crops, a large amount of waste is generated. Most of them can be used as sources of energy, fertilizers, feed ingredients, raw materials for food, pharmaceutical and other industries, etc. Thus, one of the most promising directions for the development of the agro-processing sector of Ukraine is the implementation of waste transformation technologies into products with high added value. The production of sugar from sugar beets is accompanied by the formation of a large amount of various lignocellulosic wastes, the disposal of which constitutes a major environmental problem. In order to formulate further ways of implementing resource-saving beet sugar production technologies, promising methods of using its waste were studied in detail. The article presents the methods of valorization of sugar production due to the use of molasses, beet tops, and pomace. The development of the agro-industrial complex of Ukraine will be related to the bioprocessing of various wastes, biotechnological methods today are a powerful way to increase the profitability of many food industries, including sugar. A separate important problem of reducing the burden on the environment is the development of technologies for the use of renewable energy sources, the article shows the perspective of using sugar production waste as a source of clean, efficient technologies for obtaining energy, valuable chemicals, including biofuel. The possibility of obtaining ethyl alcohol, food acids, enzymes, protein, baker's yeast, pectin, food additives, biofertilizers, valuable feed components, etc. on the basis of sugar waste has been demonstrated. Some recent research on water purification using hydrogels and photocatalysts, as well as bioplastics based on beet pulp is highlighted. All these technologies are based on the ability of sugar production wastes to ferment quite easily with the formation of a large variety of final and by-products, most of which are useful in various types of human activities. An economic assessment of the feasibility of implementing these technologies with a view to Ukrainian realities requires a more detailed study.

**Keywords:** sugar beet; waste; beet tops; molasses; pulp; sugar industry.

### Вступ

Одержання великої кількості сільськогосподарських відходів у всьому світі створює різні проблеми

для навколишнього середовища. Спалювання цих відходів вивільняє в атмосферу забруднюючі гази, такі як оксид вуглецю, діоксид азоту, оксид азоту та

дрібні частинки, відомі як димовий вуглець, а їх неправильне зберігання спричиняє утворення аміаку та метану, які утворюють небезпечні парникові гази. Цукровий буряк використовується переважно для виробництва цукру, що становить майже 16 % світового виробництва цукру [1]. Частина відходів переробляється у добриво, при цьому суттєва кількість залишків є невикористаними та становлять проблему утилізації.

Концепція циркулярної економіки описує використання відходів однієї галузі як сировини для іншої та базується на принципі сталого розвитку «зменшення, повторного використання, переробки, відновлення та відновлення» (5R), змінюючи класичну лінійну модель економіки (зробити-використати-кинути) до ефективної циклічної моделі [2]. Зокрема, циркуляція біологічних відходів для розробки продуктів з високою доданою вартістю може бути майбутньою альтернативою реалізації мрії про циркулярну економіку, засновану на біотехнологіях [2].

Сьогодні в світі вирощують менше цукрових буряків (85,7 %) порівняно з цукровою тростиною (згідно з даними Продовольчої та сільськогосподарської асоціації США) [3]. Однак виробництво цукру з буряків потребує менше ресурсів прісної води, ніж виробництво цукру з тростинку, тож в майбутньому, імовірно, це співвідношення буде змінено на користь цукрових буряків [4].

дисахаридів. У макро- і мікроелементному складі свіжої бурякової гички присутній кальцій, алюміній і молібден, бор і калій, натрій, магній і кобальт. Крім цього бадилля досить багата фтором, марганцем і залізом, цинком і міддю. У листі буряків є йод, сірка і фосфор [6].

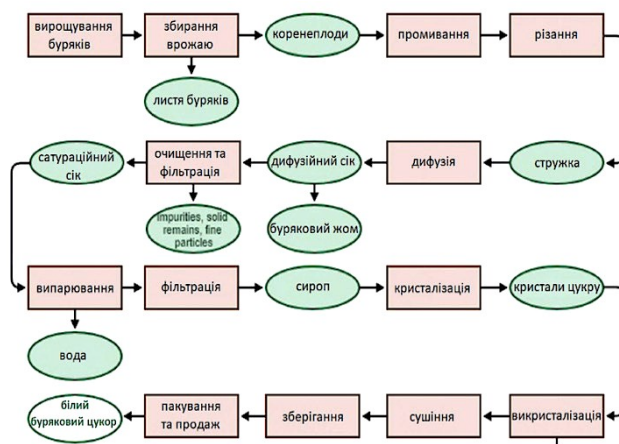


Рис. 1 – Схема виробництва цукру-піску [5]

### Мета роботи

Для формування подальших шляхів впровадження ресурсоощадних технологій виробництва бурякового цукру планується детально вивчити перспективні методи використання його відходів.

### Виклад основного матеріалу

Цукор вилучається з буряків із використанням гарячої води. У результаті цього отримують дифузійний сік, який потім очищується, фільтрується і концентрується циклічним промиванням та випарюванням. Для отримання кінцевого продукту сироп проходить процес кристалізації. Потім отриманий білий цукор викристалізовується, що в кінцевому підсумку призводить до виробництва високоякісного рафінованого цукру. На різних етапах переробки цукрового буряка отримуються різноманітні продукти (рис. 1) [5].

Основні побічні продукти при виробництві цукру зображено на рис. 2.

#### Бурякове бадилля.

У процесі створення цукру, після обробки сировини, залишається бурякове бадилля. Воно представлене соковитими стеблами і листям самого буряка. В буряковому бадиллі міститься багато корисних речовин, які необхідні для здоров'я людини. У зелені міститься 1,2 % білків, 0,1 % жирів і 6 % вуглеводів, представлених у вигляді моно- і



Рис. 2 – Побічні продукти одержання цукру-піску з цукрового буряку

Бадилля позитивним чином впливають на здоров'я людини, а саме: поліпшує травну функцію (має проносний ефект, а значить вона виводить токсини і шкідливі сполуки з організму. Крім того, містить багато нерозчинної клітковини, вона, рухаючись по кишечнику, вбирає в себе шкідливі речовини); омолоджує (сприяє посиленню регенерації шкірного покриву); позитивно впливає на серцево-судинну систему (зміцнення судин); прискорює процеси метаболізму.

#### Рафінадна патока або меляса

Це текуча маса темно-вишневого кольору солодкого смаку з присмаком карамелі і гіркуватого солодким присмаком, продукт неповного гідролізу крохмалю – декстрин, глюкоза, мальтоза є основними складовими солодкої рідини. Широке застосування знаходить патока у виробництві пряників та інших булочних виробів, мармеладу і зефіру. Вона використовується як варіант інвертного цукру [7]. Меляса – це кінцевий побічний продукт, який отримують при виробництві цукрози шляхом багаторазового випарювання, кристалізації та центрифугування соків з цукрових буряків, вона

містить не менше 48 % загальних цукрів [8]. Нецукри меляси можна поділити на неорганічні і органічні. Органічні у свою чергу поділяються на безазотисті і азотовмісні, останні зустрічаються у формі білків, амідів, амінокислот і нітратів. Безазотисті нецукри становлять вуглеводи (інверта, рафіноза) і органічні кислоти (молочна, мурашина, оцтова, масляна, лимонна) [9]. Бурякова меляса дуже поживна, оскільки містить досить велику кількість незамінних амінокислот, різних мінералів і бетаїну [10]. Завдяки своєму складу меляса є популярною сировиною (як джерело вуглецю) для харчової, кормової та бродильної промисловості для виробництва лікеру (рому), сухих дріжджів, ацетону, бутанолу, деяких органічних кислот тощо. Проте, згідно з поточним сценарієм глобальних досліджень, найбільша кількість меляси використовується для виробництва етанолу [11], одержується етиловий спирт високої якості, який, у свою чергу, використовується для отримання різноманітних алкогольних напоїв [12]. Помітна тенденція використання меляси для одержання кормів для великої рогатої худоби сурогатів кави, сухих електробатарей, пластмаси, ферментів тощо (табл. 1).

*Буряковий жом.*

Жом — екстрагована січка цукрових буряків, яка є цінним побічним продуктом буряко-цукрової промисловості, містить приблизно 19 % целюлози, 28 % геміцелюлози, 18 % пектину та 8 % білка, тобто 65–80 % полісахаридів. Це один із найбільших рослинних відходів, які виробляються в Європі, а також найбільших за об'ємом відхід цукрового виробництва – до 70 % становить саме буряковий жом. За даними Продовольчої сільськогосподарської організації (FAO), 86 % коренеплодів цукрових буряків перетворюються на цукор, залишаючи після себе жом цукрових буряків [16].

Найбільш розповсюдженими видами бурякового жому є свіжий, кислий, віджатий, висушений та гранульований жом. Свіжий є цінним кормом для свійських тварин. Однак він швидко окиснюється, тому його використовують як кормову добавку на протязі не більше ніж 1–3 днів. *Свіжий жом* економічно не вигідно транспортувати на значні відстані, тому його використовують поблизу заводів у найближчих господарствах [17].

*Кислий жом* утворюється зі свіжого в жомових ямах. Дно і стінки ями бетонують і оснащують дренажем для відведення з жому так званої жомової води, після чого під впливом мікроорганізмів жом в ямах закисає, що позитивно впливає на його біологічну цінність, реалізується як корм для тварин.

За вивезення невикористаного свіжого жому і викидання його у навколишнє середовище заводам доводиться виплачувати великі штрафи, тому утилізація є дуже актуальною. Одне з основних рішень цієї проблеми – сушіння бурякового жому (до вологості 12...14 %). За кількістю кормових одиниць сухий жом майже дорівнює вівсу, тобто в два рази

корисніше сіна і в три рази – вівсяної соломи. Переваги цього продукту полягають у тривалому зберіганні та легкому транспортуванні, що дає змогу включати його до складу різних комбікормів для корів та молодняку. *Віджатий.* Для отримання однієї кормової одиниці у жомі при сушінні доводиться витратити близько 1 кг умовного палива. Під час тривалої сушки при підвищеній температурі цукор, білки, вітаміни жому частково руйнуються.

Таблиця 1 – Різновиди застосування меляси [11-15]

Продукт	Причини застосування
Компонент для кормів для тварин	Підвищує продуктивність тваринництва; покращує ріст корисних мікроорганізмів у шлунках рогатої худоби, таким чином поліпшує травлення та стан їхнього здоров'я; для підвищення видоїв молока, де патока використовується як джерело енергії в дієтах з низьким вмістом клітковини
Тютюн, кальян	Додається до тютюну або кальяну для покращення смаку; ферментація тютюну за допомогою меляси, фруктовий есенції та гліцерину дає вологу, податливу суміш під назвою массел
Добриво	Покращує органічний склад ґрунту, зменшує необхідність введення інших менш безпечних видів добрив
Стимулятор росту рослин	Насичення рослин поживними біодоступними речовинами
Етиловий спирт	Близько 90 % світових обсягів меляси сьогодні зброджується з одержанням харчового етанолу, що обумовлено поєднанням високого вмісту вуглеводів та низькою вартістю меляси
Фруктоза, вуглекислий газ, пекарські дріжджі, бутиловий спирт, ацетон	Всі ці речовини є побічними продуктами утворення етилового спирту під час зброджування меляси, їх одержання підвищує рентабельність процесу раціональним технології бродіння меляси
Харчові кислоти	Одержання лимонної, бурштинової, масляної, ітаконової кислот можливо під час зброджування меляси
Одноклітинний білок	Одноклітинний білок (SCP) вирощують на мелясі при 40°C шляхом розмноження штамів мікроорганізмів, які харчуються мелясою
Ферменти	Мелясу використовують як джерело вуглецю під час вирощування мікроорганізмів, які продукують лінгвоцелюлолітичні ферменти, у тому числі трансглютаміназу, фітазу тощо

У процесі віджимання зберігаються білки та вітаміни. У віджатому жомі менше цукру, що негативно позначається на його заквашуванні при силосуванні, впливає на якість зберігання [17].

*Гранульований.* Низька об'ємна маса висушеного жому у розсипному вигляді (близько 250 кг/м<sup>3</sup>) не дозволяє раціонально використовувати площі складів і вантажопідйомність транспорту. У зв'язку з цим сушений жом доцільно гранулювати. При цьому об'ємна маса його зменшується в 2...3 рази, що значно скорочує втрати жому при вантажно-розвантажувальних роботах, полегшує механізацію роздачі корму на фермах. Можна отримувати гранульований жом з різними добавками: мелясою, карбамідом тощо. Гранульований жом використовують для підкормки великої рогатої худоби узимку, оскільки це дозволяє навіть в зимовий період підтримувати приріст живої маси худоби та високий удій корів. За кормовими характеристиками, гранульований жом здатен замінити біля 50% вівса або ячменю, тому, його активно використовують у сільському господарстві [3].

### Обговорення результатів

Бурякове бадилля – це найбільш простий для утилізації продукт, тому що його можна використовувати як корм для худоби. Він містить шкідливу для тварин щавлеву кислоту, тому бадилля згодують разом із сіном та спеціальними добавками, наприклад, крейдою. Це дозволяє нейтралізувати негативний вплив кислоти на шлунок худоби. Однак з огляду на корисні властивості бадилля для організму людини, а також на невисоку кількість біоактивних речовин в сучасних продуктах, необхідно звернути увагу на використання бурякового бадилля в харчовій промисловості. Споживати бурякове бадилля можна у різному вигляді в багатьох стравах, наприклад: омлеті, рагу, соусі, супі та пюре, консервація, овочеві соки та смузі [6,18] тощо.

Доцільним є використання бурякового бадилля як біодоступного безпечного добрива. З нього вариться відвар, в якому міститься багато магнію, інших корисних елементів, які потрібні не лише людському організму, але й рослинам [18].

Багато уваги науковці приділяють сьогодні розробці технологій повноцінного використання бурякового жому. Одним з найактуальніших напрямів використання таких продуктів з високим вмістом целюлози, геміцелюлози та лігніну, як жом, є заміна пластику на біосумісні упаковки, що розкладаються (табл. 2). Однак розмір часток жому, погана адгезійна/адсорбційна поведінка, вологолюбна природа та низька хімічна стабільність обмежили його використання в цій сфері, необхідно застосовувати хімічну або фізичну обробку для вилучення наноформ з бурякового жому [6].

Також валоризація використання жому повинна враховувати його цінність як сировини для виробництва біопалива, біоводню, та широкого переліку хімічних речовин (табл. 2).

Іншим напрямом використання бурякового жому є створення біогенних систем очищення води та ґрунту. Мета – виведення зі стічних вод азоту і фосфору, патогенних мікроорганізмів і фекальних бактерій. Природні або синтетичні молекулярні біоматеріали, які мають високий ступінь адсорбції і які підтримують величезну кількість рідини в зв'язаному стані, відомі як гідрогелі [19]. Полімерна структура цих речовин містить гідрофільні частини, такі як CONH<sub>2</sub>, -COOH, -NH<sub>2</sub>, -OH, -SO<sub>3</sub>H тощо [20], які є реакційноздатними до багатьох забруднювачів. За дослідженнями [21], гідрофільність целюлози (її легко витягнути з бурякового жому) є високою, гідрогелі на основі целюлози характеризуються багатооб'ємними властивостями: 1) висока питома площа поверхні, яка забезпечує більше активних центрів, 2) гідроксильні групи забезпечують легке щеплення сульфатів, складних ефірів, амінів та альдегідів, тобто целюлоза може виконувати функції не лише адсорбенту, а й мембрани, флокулянту; 3) висока стабільність і поверхневий натяг целюлози у воді зменшує біологічне забруднення та покращує змочування; 4) колоїдна стабільність і агрегація целюлози [22], а також, звісно, відсутність негативного впливу на навколишнє середовище. Гідрогель з целюлози можна одержати за технологією зшивання водневих зв'язків, для одержання чистої целюлози при цьому використовують ферменти [23].

Фотокаталізатори є ще одним важливим класом матеріалів, які використовуються для очищення води [24]. Через синергетичну поведінку специфічних гідрогелів на основі целюлози та наночастинки фото каталізатора, створення біогібриду привертає сьогодні велику увагу (наприклад, біогібрид Cellulose/ β-FeOОН [25]).

Також целюлозу, як і один з її похідних жому широко застосовують в харчовій промисловості як загущувач, драглеутворювач, вологоутримувач тощо. Цей нетоксичний природний полімер також використовують в паперовій, текстильній промисловості, у виробництві фарб та ліків [26], що додатково розширює потенційну сферу застосування жому.

Жом цукрового буряку є перспективним джерелом пектину (містить 25–30 % пектину в перерахунку на суху речовину). Пектинові речовини - це природні полісахариди, присутні в структурі клітинної стінки. Вони складаються з галактуронової кислоти, рамнози, арабінози та галактози, використовується в багатьох харчових продуктах як драглеутворювач для джемів і желе, як загусник і як емульгатор у молочних продуктах. Він також використовується в медичній промисловості для зменшення серцевих захворювань і в косметичних продуктах завдяки його желюючим властивостям [27]. Традиційно пектин екстрагують із сировини гарячою підкисленою водою (при температурах 70–90 °C і рН 1–3) протягом 1–6 год. Пектин також можна екстрагувати за допомогою ферментів галактуронази, а також екструзії, мікрохвильового екстрагування, ультразвуку, субкритичної технології тощо [27].

Таблиця 2 – Сучасні технології використання бурякового жому [19-27]

Кінцевий продукт перероблення жому	Принципи та способи одержання продуктів на основі бурякового жому
Біорозкладна упаковка	Величезна кількість целюлози, геміцелюлози та лігніну, які містить жом є матеріалом екологічних упаковок, здатних до повного розкладання. Для одержання таких плівок з жому використовують лігноцелюлолітичні секретуючі грибові та бактеріальні ферменти
Біопаливо, біоводень	З метою скорочення викидів парникових газів для одержання енергії використовуються такі біорозкладні види як жом
Ферменти	Екстракція ферментів, таких як пектинолітичні та протеолітичні ферменти з жому
Цукри, білки, мінерали	Можуть бути отримані до лігноцелюлозної трансформації за допомогою обробки паром, кислотного гідролізу або комплексів ферментів. Перший крок перероблення жому включає його подрібнення та гідроліз для перетворення складних вуглеводів у ферментовані цукри (глюкозу, фруктозу). Хімічний або ферментативний гідроліз (целюлазами та глікозидазами) використовують для розщеплення полісахаридів на прості цукри
Пектин	Жом містить велику кількість пектину – 25–30 % на суху речовину, який є ефективним драглеутворювачем (E440)
Гідрогелі, фотокаталізatori	Очищення стічних вод та інших забруднених водних ресурсів, ґрунтів за допомогою адсорбційних характеристик компоненту жому – целюлози
Одержання харчових добавок	Компонент жому – целюлоза, після очищення може бути використана як одна з найбільш популярних харчових добавок це E 460 – мікрористалічна целюлоза (для стабілізації та забезпечення текстури в харчових продуктах). Також до харчових добавок відносяться наступні її похідні: E 461 – метилцелюлоза; E 462 – етилцелюлоза; E 463 – гідроксіпропілцелюлоза; E464 – гідроксіпропілметилцелюлоза
Виробництво арабінози, рамнози, галактози та ферулової кислоти	Ці цінні компоненти біотехнологічних процесів, є проміжними речовинами у фармацевтичній галузі, арабіноза – сировина для виробництва вітаміну С
Виробництво дріжджів	Жом буряків після гідролізу можна використовувати для виробництва дріжджів та інших цінних продуктів з дріжджів
Виробництво пропіленгліколю	Для перетворення цукрів жому на пропіленгліколь використовують бактерії або дріжджі, які здатні ферментувати глюкозу у пропіленгліколь. Отриману після ферментації суміш піддають гідрогенолізу в присутності каталізатора. Цей процес включає реакцію з воднем для перетворення гліцеринових залишків у пропіленгліколь. Для очищення пропіленгліколю використовують дистиляцію, можливо адсорбцію або екстракцію. Одержаний чистий продукт є харчовою домішкою E 1520, яка широко використовується в харчовій промисловості як вологоутримувач, розчинник, диспергатор.

Ферментативне перетворення бурякового жому є способом переробити їх як джерела енергії, одночасно зменшуючи їхній вплив на навколишнє середовище. Вміст здатних до зброджування цукрів у буряковому жомі є наступним, % на суху речовину: глюкоза 68; арабіноза 22; уронові кислоти 18; галактоза 5; рамноза 2; ксилоза 2; маноза 1; сахароза (залишкова) 4; ферулова кислота 0,5; оцтова кислота 1,6; метанол 0,4; білок 8. Тобто бурякових жом може бути використаний як сировина для виробництва не лише харчових волокон (корм), але й арабінози, рамнози, галактози та ферулової кислоти. Також він може бути використаний як субстрат у різних біотехнологічних процесах: етаноловому або молочнокислому бродінні та інших процесах для отримання цінних біопродуктів і препаратів, або для виробництва біогазу та одноклітинного білка (SCP). Вивільнення цих речовин полегшується після розщеплення біополімерів (лігнін, целюлоза) шляхом кислотного гідролізу, обробки паром або при

застосуванні целюлолітичних та інших ферментів (каталізують руйнування біополімерів). Перетворення жому цукрових буряків у продукти з доданою вартістю економічно ефективно проводити за умов використання кислотного гідролізу, ферментного гідролізу гідротермальних методів і ферментативного гідролізу (табл. 2).

### Висновки

У результаті аналізу сучасних наукових джерел зрозуміло, що економічна доцільність використання відходів цукрового виробництва як для виробництва поновлювальної енергії, так і для одержання продуктів розщеплення/перетворення біополімерів (пектину, ферментів, харчових кислот тощо) сьогодні не виглядає настільки очевидною, щоб вмовити українських підприємців відкривати такі типи виробництв. Зусилля спеціалістів повинні бути направлені на зменшення собівартості такої продукції,

тобто на подальше вдосконалення технологій. Наукова спільнота повинна займатися організацією семінарів, наукових консультацій, які пояснюють технічні аспекти, доцільність та перспективність виробництва низки продуктів з відходів агропромислового комплексу, бо є досить перспективним і доцільним використання бурякового бадилля, меляси, жому за двох основних напрямків – як поновлювального джерела енергії та як сировини для виробництва широкого асортименту корисних харчових та фармацевтичних речовин. Зброджування цих відходів додатково підвищує економічну ефективність процесу валоризації відходів цукрового виробництва.

Такий підхід сприяє ефективному використанню ресурсів та стимулює розвиток циркулярної економіки. Використання відновлюваних ресурсів сприяє зменшенню викидів парникових газів, засміченню водою відходами виробництва цукру тощо.

Одним з найбільш важливих напрямків використання лігноцелюлозних відходів, у тому числі на базі відходів цукрового виробництва, на нашу думку, є впровадження технологій біорозкладної упаковки. Відповідна сировинна база в Україні є дуже об'ємною, не обмежується кукурудзяними або картопляними крохаллями. Суспільство стає все більш свідомим щодо екологічних проблем, які створює пластикова упаковка, це поступово підвищує попит на екологічно безпечні упаковки. Існуючі технологічні рішення виробництва біорозкладної упаковки на базі відходів агропромислового комплексу потребують детального розгляду, що ми і плануємо зробити у наступних статтях.

#### Список літератури

- Singh P., Sharma K., Hasija V., Sharma V., Sharma S., Raizada P., ... & Thakur V. K. Systematic review on applicability of magnetic iron oxides-integrated photocatalysts for degradation of organic pollutants in water. *Materials Today Chemistry*. 2019. № 14. 100186. doi: 10.1016/j.mtchem.2019.08.005.
- Rojas L. F., Zapata P., Ruiz-Tirado L. Agro-industrial waste enzymes: Perspectives in circular economy. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 2022. № 34. 100585. doi: 10.1016/j.cogsc.2021.100585.
- Rana A. K., Gupta V. K., Newbold J., Roberts D., Rees R. M., Krishnamurthy S., & Thakur V. K. Sugar beet pulp: Resurgence and trailblazing journey towards a circular bioeconomy. *Fuel*. 2022. № 312. 122953. doi: 10.1016/j.fuel.2021.122953.
- Chernysheva D. V., Konstantinov M. S., Sidash E. A., Klushin V. A., Tokarev D. V., Andreeva V. E., ... & Ananikov V. P. Tuning Sugar Biomass Waste Conversion for the Preparation of Carbon Materials for Supercapacitors and Catalysts for Oxygen Reduction. *Energy Technology*. 2023. № 11(3). 2201145. doi: 10.1002/ente.202201145.
- Національна асоціація цукровиків України «УКРЦУКОР». URL: <http://ukrsugar.com/uk/post/produkti-pererobki-cukrovih-burakiv-ak-sirovina-dla-virobnictva-himicnih-recovin-ta-biorozkladnih-polimeriv-castina-1>. (дата звернення: 01.09.2024).
- Сталінська І. В., Хандогіна О. В. Управління екологічними ризиками відходів виробництва цукру. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2023, Т. 33, No 1. С. 39–44. doi: 10.36930/40330106.
- Zhang S., Wang J., & Jiang H. Microbial production of value-added bioproducts and enzymes from molasses, a by-product of sugar industry. *Food chemistry*. 2021. № 346. P. 128860. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.128860.
- Duraisam R., Salegn K., Berekete A. K. Production of Beet Sugar and Bio-ethanol from Sugar beet and its Bagasse: A Review. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2017. № 43 (4). P. 222–233. doi:10.14445/22315381/ijett-v43p237.
- Меляса бурякова. Радехівський цукор. URL: <https://m.diamantsugar.com.ua/ua/articles/melyasa-buryakova>. (дата звернення: 06.08.2024).
- Adbhai A. R., Dewanjee S., Patel K. G., & Karmakar N. Sugar beet molasses production and utilization. In *Sugar Beet Cultivation, Management and Processing*. 2022. P. 885–904. doi.: 10.1007/978-981-19-2730-0\_44.
- Jamir L., Kumar V., Kaur J., Kumar S., & Singh H. Composition, valorization and therapeutical potential of molasses: a critical review. *Environmental Technology Reviews*. 2021. № 10 (1). P. 131–142. doi: 10.1080/21622515.2021.1892203.
- Jain R, Venkatasubramanian P. Sugarcane molasses – a potential dietary supplement in the management of iron deficiency anemia. *J Diet Suppl*. 2017. № 14 (5). P. 589–598. doi:10.1080/19390211.2016.1269145.
- Кудрявцева Ю., Демидова А., Півень О. Зберігання та контроль якості лікєро-горілчаної продукції. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення у сучасних технологіях*. 2023. № 4 (18). С. 58–65. doi: 10.20998/2413-4295.2023.04.08.
- El-Sheekh M. M., Bedaiwy M. Y., El-Nagar A. A., El Kelawy M., & Bastawissi H. A. Ethanol biofuel production and characteristics optimization from wheat straw hydrolysate: Performance and emission study of DI-diesel engine fueled with diesel/biodiesel/ethanol blends. *Renewable Energy*. 2022. № 191. P. 591–607. doi: 10.1016/j.renene.2022.04.076.
- Pandey A. K., Kumar M., Kumari S., & Gaur N. A. Integration of acid pre-treated paddy straw hydrolysate to molasses as a diluent enhances ethanol production using a robust *Saccharomyces cerevisiae* NGY10 strain. *Renewable Energy*. 2022. 186. P. 790–801. doi: 10.1016/j.renene.2022.01.039.
- Joanna B., Michal B., Piotr D., Agnieszka W., Dorota K., & Izabela W. Sugar beet pulp as a source of valuable biotechnological products. *Advances in biotechnology for food industry*. 2018. P. 359–392. doi: 10.1016/B978-0-12-811443-8.00013-X.
- Бордун І. М. Новий спосіб утилізації бурякового жому. *Цукор України*. 2016. № 6–7 (126-127). С. 45–47.
- Adem K., Ozguven M. M., Altas Z. A sugar beet leaf disease classification method based on image processing and deep learning. *Multimedia Tools and Applications*. 2023. № 82(8). P. 12577–12594. doi: 10.1007/s11042-022-13925-6.
- Sharma B., Thakur S., Mamba G., Gupta V. K. Titania modified gum tragacanth based hydrogel nanocomposite for water remediation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020. P. 104608. doi:10.1016/j.jece.2020.104608.
- Verma A., Thakur S., Goel G., Raj J., Gupta V. K., Roberts D. Bio-based Sustainable Aerogels: New Sensation in CO2 Capture. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*. 2020. 3. P.100027. doi:10.1016/j.crgsc.2020.100027.

21. Chen X., Li Z., He N., Zheng Y. Nitrogen and phosphorus removal from anaerobically digested wastewater by microalgae cultured in a novel membrane photobioreactor. *Biotechnology for Biofuels*. 2018. № 11. 190. doi: 10.1186/s13068-018-1190-0.
22. He J., Ni F., Cui A., Chen X., Deng S., Shen F., et al. New insight into adsorption and coadsorption of arsenic and tetracycline using a Y-immobilized graphene oxide-alginate hydrogel: Adsorption behaviours and mechanisms. *Science of The Total Environment*. 2020. № 701. P. 134363. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134363.
23. Seddiqi H., Oliaei E., Honarkar H., Jin J., Geonzon L. C., Bacabac R. G. Cellulose and its derivatives: Towards biomedical applications. *Cellulose*. 2021. № 28. P. 1893–1931. doi: 10.1007/s10570-020-03674-w.
24. Ahmad N., Anae J., Khan M. Z., Sabir S., Yang X. J., Thakur V. K. Visible light-conducting 1293 polymer nanocomposites as efficient photocatalysts for the treatment of organic pollutants in wastewater. *Journal of Environmental Management*. 2021. № 295. P. 113362. doi:10.1016/j.jenvman.2021.113362.
25. Wang J., Li X., Cheng Q., Lv F., Chang C., Zhang L. Construction of  $\beta$ -FeOOH@ tunicate cellulose nanocomposite hydrogels and their highly efficient photocatalytic properties. *Carbohydrate Polymers*. 2020. № 229. P. 115470. doi: 10.1016/j.carbpol.2019.115470.
26. Kanikireddy V., Varaprasad K., Jayaramudu T., Karthikeyan C., Sadiku R. Carboxymethyl cellulose-based materials for infection control and wound healing: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. № 164. P. 963–975. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.07.160.
27. Gharib-Bibalan S. High Value-added products recovery from sugar processing by-products and resi. duals by green technologies: Opportunities, challenges, and prospects. *Food engineering reviews*. 2018. № 10. P. 95–111. doi: 10.1007/s12393-018-9174-1.
6. Stalinska I. V., Khandohina O. V. Upravlinnia ekolohichnymi ryzykamy vidkhodiv vyrobnytstva tsukru [Environmental risk management of sugar production waste]. *Scientific bulletin of NLTU of Ukraine*, 2023, Vol. 33, no. 1, pp. 39–44, doi: 10.36930/40330106.
7. Zhang S., Wang J., & Jiang H. Microbial production of value-added bioproducts and enzymes from molasses, a by-product of sugar industry. *Food chemistry*, 2021, no. 346, pp. 128860, doi: 10.1016/j.foodchem.2020.128860.
8. Duraisam R., Salelgn K., Bereket A. K. Production of Beet Sugar and Bio-ethanol from Sugar beet and it Bagasse: A Review. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 2017, no. 43 (4), pp. 222–233, doi: 10.14445/22315381/ijett-v43p237.
9. Meliasa buriakova. Radekhivskyi tsukor [Beet molasses. Radehiv sugar]. Available at: <https://m.diamantsugar.com.ua/ua/articles/melyasa-byryakova> (accessed: 06.08.2024).
10. Adbhai A. R., Dewanjee S., Patel K. G., & Karmakar N. Sugar beet molasses production and utilization. In *Sugar Beet Cultivation, Management and Processing*, 2022, pp. 885–904, doi: 10.1007/978-981-19-2730-0\_44.
11. Jamir L., Kumar V., Kaur J., Kumar S., & Singh H. Composition, valorization and therapeutical potential of molasses: a critical review. *Environmental Technology Reviews*, 2021, no. 10 (1), pp. 131–142, doi: 10.1080/21622515.2021.1892203.
12. Jain R, Venkatasubramanian P. Sugarcane molasses – a potential dietary supplement in the management of iron deficiency anemia. *J Diet Suppl.*, 2017, no. 14 (5), pp. 589–598, doi: 10.1080/19390211.2016.1269145.
13. Kudriavtseva Yu., Demydova A., Piven O. Storage and quality control of alcoholic beverages. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*, 2023, no. 4(18), pp. 58–65. doi: 10.20998/2413-4295.2023.04.08.
14. El-Sheekh M. M., Bedaiwy M. Y., El-Nagar A. A., El Kelawy M., & Bastawissi H. A. Ethanol biofuel production and characteristics optimization from wheat straw hydrolysate: Performance and emission study of DI-diesel engine fueled with diesel/biodiesel/ethanol blends. *Renewable Energy*, 2022, no. 191, pp. 591–607, doi: 10.1016/j.renene.2022.04.076.
15. Pandey A. K., Kumar M., Kumari S., Gaur N. A. Integration of acid pre-treated paddy straw hydrolysate to molasses as a diluent enhances ethanol production using a robust *Saccharomyces cerevisiae* NGY10 strain. *Renewable Energy*, 2022, no. 186, pp. 790–801, doi: 10.1016/j.renene.2022.01.039.
16. Joanna B., Michal B., Piotr D., Agnieszka W., Dorota K., Izabela W. Sugar beet pulp as a source of valuable biotechnological products. *Advances in biotechnology for food industry*, 2018, pp. 359–392, doi: 10.1016/B978-0-12-811443-8.00013-X.
17. Bordon I. M. Novyi sposib utylizatsii buriakovoho zhomu [A new method of disposal of beet pulp]. *Tsukor Ukrainy*, 2016, no. 6–7 (126–127), pp. 45–47.
18. Adem K., Ozguven M. M., Altas Z. A sugar beet leaf disease classification method based on image processing and deep learning. *Multimedia Tools and Applications*, 2023, no. 82 (8), pp. 12577–12594, doi: 10.1007/s11042-022-13925-6.
19. Sharma B., Thakur S., Mamba G., Gupta V. K. Titania modified gum tragacanth based hydrogel nanocomposite for water remediation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, pp. 104608, doi: 10.1016/j.jece.2020.104608.

#### References (transliterated)

1. Singh P., Sharma K., Hasija V., Sharma V., Sharma S., Raizada P., ... & Thakur V. K. Systematic review on applicability of magnetic iron oxides-integrated photocatalysts for degradation of organic pollutants in water. *Materials Today Chemistry*, 2019, no. 14, pp. 100186, doi: 10.1016/j.mtchem.2019.08.005.
2. Rojas L. F., Zapata P., & Ruiz-Tirado L. Agro-industrial waste enzymes: Perspectives in circular economy. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 2022., no. 34, pp. 100585, doi: 10.1016/j.cogsc.2021.100585.
3. Rana A. K., Gupta V. K., Newbold J., Roberts D., Rees R. M., Krishnamurthy S., & Thakur V. K. Sugar beet pulp: Resurgence and trailblazing journey towards a circular bioeconomy. *Fuel*, 2022, no. 312, pp. 122953, doi: 10.1016/j.fuel.2021.122953.
4. Chernysheva D. V., Konstantinov M. S., Sidash E. A., Klushin V. A., Tokarev D. V., Andreeva V. E., ... & Ananikov V. P. Tuning Sugar Biomass Waste Conversion for the Preparation of Carbon Materials for Supercapacitors and Catalysts for Oxygen Reduction. *Energy Technology*, 2023, no. 11(3), pp. 2201145, doi: 10.1002/ente.202201145.
5. Natsionalna asotsiatsiia tsukrovykiv Ukrainy «UKRTsUKOR» [National Association of Sugar Growers of Ukraine "UKRCSUKOR"]. Available at: <http://ukrsugar.com/uk/post/produkti-pererobki-cukrovih-burakiv-ak-sirovina-dla-virobnictva-himicnih-recovin-ta-biorozkladnih-polimeriv-castina-1>. (accessed: 01.09.2024).

20. Verma A., Thakur S., Goel G., Raj J., Gupta V. K., Roberts D. Bio-based Sustainable Aerogels: New Sensation in CO<sub>2</sub> Capture. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 2020, no. 3, pp. 100027, doi: 10.1016/j.crgsc.2020.100027.
21. Chen X., Li Z., He N., Zheng Y. Nitrogen and phosphorus removal from anaerobically digested wastewater by microalgae cultured in a novel membrane photobioreactor. *Biotechnology for Biofuels*, 2018, no. 11, 190, doi: 10.1186/s13068-018-1190-0.
22. He J., Ni F., Cui A., Chen X., Deng S., Shen F., et al. New insight into adsorption and coadsorption of arsenic and tetracycline using a Y-immobilized graphene oxide-alginate hydrogel: Adsorption behaviours and mechanisms. *Science of the total environment*, 2020, no. 701, pp. 134363, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134363.
23. Seddiqi H., Oliaei E., Honarkar H., Jin J., Geonzon L.C., Bacabac R.G. Cellulose and its derivatives: Towards biomedical applications. *Cellulose*, 2021, no. 28, pp. 1893–1931, doi: 10.1007/s10570-020-03674-w.
24. Ahmad N., Anae J., Khan M. Z., Sabir S., Yang X. J., Thakur V. K. Visible light-conducting 1293 polymer nanocomposites as efficient photocatalysts for the treatment of organic pollutants in wastewater. *Journal of Environmental Management*, 2021, no. 295, pp. 113362, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113362.
25. Wang J., Li X., Cheng Q., Lv F., Chang C., Zhang L. Construction of  $\beta$ -FeOOH@ tunicate cellulose nanocomposite hydrogels and their highly efficient photocatalytic properties. *Carbohydrate Polymers*, 2020, no. 229, pp. 115470, doi: 10.1016/j.carbpol.2019.115470.
26. Kanikireddy V., Varaprasad K., Jayaramudu T., Karthikeyan C., Sadiku R. Carboxymethyl cellulose-based materials for infection control and wound healing: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, no. 164, pp. 963–975, doi:10.1016/j.ijbiomac.2020.07.160.
27. Gharib-Bibalan S. High Value-added products recovery from sugar processing by-products and resi. duals by green technologies: Opportunities, challenges, and prospects. *Food engineering reviews*, 2018, no. 10, pp. 95–111, doi: 10.1007/s12393-018-9174-1.

### Відомості про авторів (About authors)

**Безпала Анастасія Олексіївна** – студентка кафедри технології жирів та продуктів бродіння, група ХТ-5216; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-1796-5746>; e-mail: [anastasiia.bezpala1@ihti.khpi.edu.ua](mailto:anastasiia.bezpala1@ihti.khpi.edu.ua).

**Bezpara Anastasiia** – student, department of Fat and Fermentation Products Technologies, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-1796-5746>; e-mail: [anastasiia.bezpala1@ihti.khpi.edu.ua](mailto:anastasiia.bezpala1@ihti.khpi.edu.ua).

**Шаповал Анастасія Валеріївна** – студентка кафедри технології жирів та продуктів бродіння, група ХТ-5216; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0009-0006-3443-9718>; e-mail: [anastasiia.shapoval@ihti.khpi.edu.ua](mailto:anastasiia.shapoval@ihti.khpi.edu.ua).

**Shapoval Anastasiia** – student, department of Fat and Fermentation Products Technologies, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0009-0006-3443-9718>; e-mail: [anastasiia.shapoval@ihti.khpi.edu.ua](mailto:anastasiia.shapoval@ihti.khpi.edu.ua).

**Савайло Денис Ігорович** – студент кафедри технології жирів та продуктів бродіння, група ХТ-5216; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-8504-1260>; e-mail: [denys.savailo@ihti.khpi.edu.ua](mailto:denys.savailo@ihti.khpi.edu.ua).

**Savailo Denys** – student, department of Fat and Fermentation Products Technologies, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-8504-1260>; e-mail: [denys.savailo@ihti.khpi.edu.ua](mailto:denys.savailo@ihti.khpi.edu.ua).

**Демидова Анастасія Олександрівна** – доктор технічних наук, доцент кафедри харчових технологій та готельно-ресторанної справи, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4714-3450>; e-mail: [ademidova2016@gmail.com](mailto:ademidova2016@gmail.com)

**Anastasiia Demydova** – Doctor of Technical sciences, associate professor of the Department of Food Technologies and Hotel-Restaurant Business, Dmytro Motorny Tavri State Agro-Technological University, Zaporizhzhia, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4714-3450>; e-mail: [ademidova2016@gmail.com](mailto:ademidova2016@gmail.com)

**Півень Олена Миколаївна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри технології жирів та продуктів бродіння; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6987-1504>; e-mail: [elpiven33@gmail.com](mailto:elpiven33@gmail.com).

**Olena Piven** – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of the Department of Fat and Fermentation Products Technologies, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6987-1504>; e-mail: [elpiven33@gmail.com](mailto:elpiven33@gmail.com).

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

Безпала А. О., Шаповал А. В., Савайло Д. І., Демидова А. О., Півень О. М. Відходи виробництва цукру та їх раціональне використання. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 3 (21). С. 17-24. doi:10.20998/2413-4295.2024.03.03.

*Please cite this article as:*

Bezpara A., Shapoval A., Savailo D., Demydova A., Piven O. Sugar production waste and their rational use. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2024, no. 3(21), pp. 17–24, doi:10.20998/2413-4295.2024.03.03.

Надійшла (received) 28.07.2024  
Прийнята (accepted) 14.09.2024