



## БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 620.97

<https://doi.org/10.31713/vt320251>

Квартенко О. М. <sup>[1; ORCID ID: 0000-0001-5634-1128]</sup>,

д.т.н., доцент

<sup>1</sup>Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

### ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОЕТАНОЛУ

Зміни клімату та обмеженість кількості викопного палива призвело до розвитку відновлюваної енергетики, одним із напрямків якої є виробництво біоетанолу. Сировина якої виробляється біоетанол поділяється на чотири покоління біомаси. Використання біомаси першого покоління – продуктів харчування є недоречним. Актуальним питанням є розробка технологій з ресурсів другого-четвертого поколінь. Основними етапами виробництва біоетанолу за допомогою мікробного бродіння є: виготовлення ферментованого розчину цукру; ферментація цукрів з утворенням етанолу в розчині; виділення та очищення етанолу від розчину.

**Ключові слова:** біоетанол; бурякова меляса; бактерії р. *Saccharomyces cerevisiae*; зброження; ферментація.

**Вступ.** Сучасне техногенне суспільство має великий антропогенний вплив на навколишнє середовище. Насамперед це стосується збільшення споживання викопних невідновних енергоресурсів таких як нафта, вугілля та природний газ. Використання викопних видів палива призводить до швидкого зростання рівня CO<sub>2</sub> в атмосфері, що, в свою чергу, призводить до зміни клімату – «парникового ефекту». Зміни клімату та обмеженість кількості викопного палива призвело до розвитку відновлюваної енергетики, одним із напрямів якої є виробництво біопалива: біоетанолу, біодизелю і біогазу.

**Метою** статті є аналіз перспектив розвитку виробництва біоетанолу із сільськогосподарської сировини. Біоетанол виробляють шляхом бродіння із сільськогосподарської сировини (таблиця) яка містить крохмаль та цукор.

Наведені в табл. 1 види сировини поділяються на чотири покоління біомаси:

Перше покоління (вироблене із продовольчих культур: цукровий буряк, солодке сорго, крохмалисті культури);

Таблиця 1

Основна сировина для виробництва біоетанолу

№	Сировина	Вихід етанолу (л/га)	№	Сировина	Вихід етанолу (л/га)
1	Цукровий буряк	5000	6	Цукрове сорго	3050–4070
2	Тростинний жом	5882	7	Просо	10,760
3	Кукурудза	3460–4020	8	Кукурудзяна солома	1050–1400
4	Пшениця	2590	9	Лісові відходи	3000–5000
5	Неочищений рис	2250	10	Тирса	1500–3000

Друге покоління (вироблене із непродовольчих культур: лігноцелюозна біомаса та неїстівне олійне насіння: кукурудзяна солома, тирса, просо);

Третє покоління (вироблене із генетично-модифікованих вуглецево-нейтральних культур: біовідходи та біомаса водоростей);

Четверте покоління (вироблене із генетично-модифікованих вуглецево-негативних культур: на основі генетично оптимізованої сировини низьким вмістом лінгіну, дерева).

Використання біомаси першого покоління впливає на зростання цін на продукти харчування та продовольчу безпеку. Тому актуальним питанням є розробка технологій виробництва біоетанолу з ресурсів другого-четвертого поколінь. Особливу увагу слід надати технологіям виробництва біоетанолу шляхом переробки харчових відходів: цукрового виробництва (жом і меляса).

Для виробництва біоетанолу меляса є однією з кращих сировин для переробки. Поряд з високим вмістом цукру в буряковій мелясі знаходяться всі речовини, необхідні для нормальної життєдіяльності дріжджів, в цьому і є основна цінність сировини. Цукрова тростина і буряк – основна рослинна сировина для отримання цукру в світі. Вони можуть бути легко гідролізовані ферментом інвертазою, який синтезується більшістю видів

*Saccharomyces*. Схема виробництва біоетанолу з меляси наведена на рис. 1.

При переробці меляси спрощується технологічна схема, так як не проводять розварювання сировини і оцукрювання крохмалю. У мелясі відсутні декстрини та неоцукрений крохмаль, тому вона швидше зброджується, зменшуються втрати вуглеводів, що зброджуються і збільшується вихід спирту в перерахунку на умовний крохмаль, знижується собівартість спирту [2]. Вміст сахарози в мелясі коливається від 45 до 55% до її маси.



Рис. 1. Схема виробництва біоетанолу з меляси [1]

У зв'язку з тим, що вміст фосфору в мелясі недостатньо для нормального розвитку дріжджів, в технології передбачається додавання 0,06–0,08%  $P_2O_5$  у вигляді суперфосфату, діамонійфосфату і ортофосфорної кислоти. Зазвичай, в мелясі міститься 1–2% загального азоту, у тому числі засвоюваного 0,3–0,7% до маси меляси [3], що є достатнім для живлення дріжджів.

Зброджування суслу відбувається в бродильних апаратах (рис. 2) які з'єднані в бродильну батарею безперервної дії (рис. 3, а).

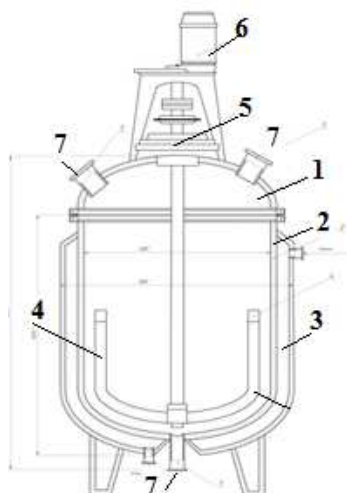
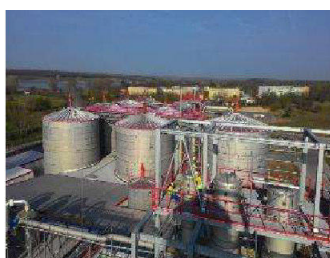


Рис. 2. Бродильний апарат: 1 – кришка; 2 – корпус; 3 – сорочка; 4 – механічна мішалка; 5 – привід, 6 – двигун, 7 – люки для завантажування та вивантажування

Постійне перемішування маси проводять для інтенсифікації зброджування, покращення масообміну та запобігання осіданню клітин мікроорганізмів у мелясних розчинах.

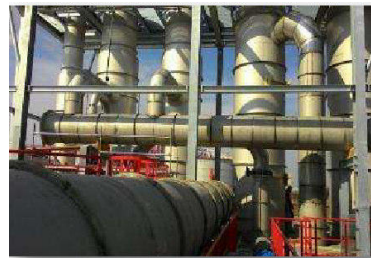
На виході з бродильної батареї виходить бражка з міцністю 10,5–13,0 алк. Охолодження суслу та дріжджової маси здійснюється через внутрішні водяні сорочки змонтовані в бродильних апаратах та дріжджегенераторах з економією хладоагента в 4 рази.



а



б



в

Рис. 3. Обладнання яке використовується для виробництва біоетанолу:  
а – бродильні апарати; б – дистиляційні колони;  
в – випарні апарати

Мелясні бражки мають властивість пінитися в дріжджегенераторах, бродильній батареї і бражних колонах при перегонці бражки. Основними способами піногасіння у виробництві біоетанолу є хімічний та механічний.

До хімічних піногасників відносяться жирові речовини, які при внесенні на поверхню бражки, що піниться, зменшують сили



поверхневого натягу на повітряних бульбашках піни [3]. До таких речовин відносяться: соапсток, олеїнова кислота, рослинна олія та інші жирові речовини.

Ферментація біоетанолу може проводитися в періодичному режимі, періодичному режимі з підживленням або безперервному режимі.

У періодичному процесі субстрат надається на початку процесу без додавання або видалення середовища. Він відомий як найпростіша система біореактора з багатокамерним, гнучким і легким процесом керування. Процес бродіння здійснюється в системі замкнутого циклу з високою концентрацією цукрів та інгібіторів на початку та в кінці високою концентрацією продукту [3].

Безперервна робота здійснюється шляхом постійного додавання субстратів, культурального середовища та поживних речовин у біореактор, що містить активні мікроорганізми. Об'єм культури при безперервній роботі повинен бути постійним, а продукти бродіння безперервно беруться із середовища. Різні типи продуктів можуть бути отримані з верхньої частини біореактора, такі як етанол, клітини та залишковий цукор.

**Для очищення етанолу**, який буде використовуватися як паливо, часто використовується апарати дистиляції (рис. 4). У випадку поділу етанол-вода традиційна дистиляція не дає достатнього хорошого поділу через утворення в суміші азеотропу при 95,6 масових відсотках етанолу. Азеотропні умови виникають, коли внаслідок властивостей змішування температура кипіння суміші падає нижче температури кипіння обох компонентів.

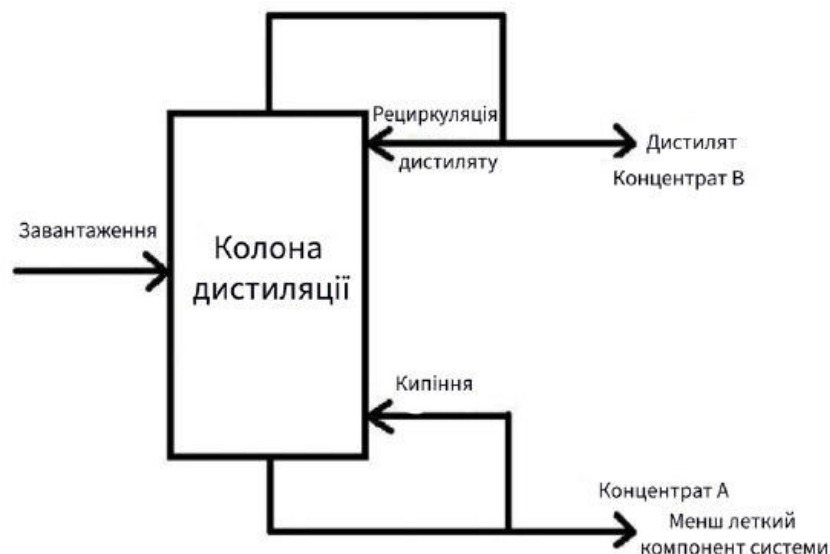


Рис. 4. Схема дистиляції [4]

Менш леткий компонент залишає залишки у вигляді майже чистої рідини. Дистилат із колони зі складом, близьким до азеотропного для робочого тиску, потім подають у другу колону під іншим тиском, як правило, атмосферним, що дає потік азеотропного дистилату з менш летким компонентом і потік чистого кубового залишку з більш летким компонентом. Дистилат з другої колони повертається назад у першу. Азеотроп, утворений сумішшю етанолу та води, змінюється при різних тисках, він змінюється лише на кілька процентних пунктів.

**Характеристика біологічного агента, *Saccharomyces***, рід дріжджів, що належать до родини *Saccharomycetaceae*, тип *Ascomycota*, царство *Fungi*. Головною характеристикою представників *Saccharomyces* є їх здатність перетворювати цукор на вуглекислий газ і спирти за допомогою ферментів [3; 5]. Максимальні концентрації етанолу спостерігаються в середовищі *Saccharomyces cerevisia* та *Zygomonas mobilis* (табл. 2).

Бактерії в порівнянні з дріжджами – більш зручний об'єкт для застосування генно-інженерних методів поліпшення їх технологічних властивостей. На відміну від дріжджів ці бактерії характеризуються низькою чутливістю до етанолу.

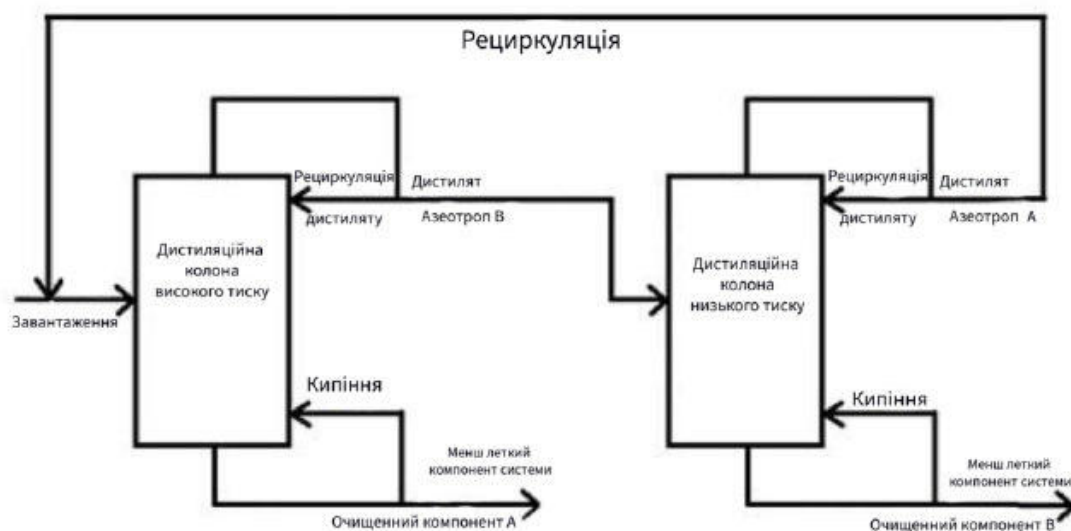


Рис. 5. Схема дистиляції зі змінним тиском [4]

Крім того, гранична швидкість вживання глюкози і утворення етанолу в 2–3 рази вища. Слід також зазначити, що бактерії роду *Zygomonas* здатні утилізувати глюкозу, сахарозу. Недолік – повільне зростання біомаси, що понижує продуктивність системи. На відміну від *Zygomonas*, дріжджі утилізують великий набір гексоз – близько 55% всієї рослинної маси.



Таблиця 2

Характеристика мікроорганізмів, що застосовуються у промисловості

Біологічний агент	Максимальна концентрація етанолу в середовищі, г/л	Вихід етанолу, %	Оптимальні рН та температура
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	130	100	рН – 3–4; 30° С
<i>Saccharomyces rosei</i>	42,5	88	рН – 4–6; 35° С
<i>Kluyveromyces maxianus</i>	44	88	рН – 4,4; 35° С
<i>Zymomonas mobilis</i>	130	95	рН – 5,5; 30° С
<i>Clostridium thermocellum</i>	1,5	50	рН – 7; 32° С

Спиртові дріжджі *S. cerevisiae*, являють собою одноклітинні мікроорганізми, здатні зброджувати цукри, що містяться в оцукреному суслі, у спирт. Оскільки вони характеризуються високими темпами росту 0,25–0,33 год<sup>-1</sup>, а також вони стійкі до високих концентрацій етанолу і низьких значень рН. Володіючи високою швидкістю росту і активним брунькуванням, штам забезпечує стабільні показники накопичення біомаси в процесі дріжджегенерації.

**Фактори впливу.** На життєдіяльність дріжджів має вплив активна кислотність середовища. Іони водню змінюють електричний заряд колоїдів плазматичної мембрани клітин і в залежності від концентрації можуть збільшувати або зменшувати її проникність для окремих речовин та іонів. Від значення рН залежить швидкість надходження поживних речовин у клітину, активність ферментів, утворення вітамінів. При зміні рН середовища змінюється і напрям самого бродіння. Якщо рН зрушується у лужний бік, то збільшується утворення гліцерину. Життєдіяльність дріжджів зберігається у межах рН середовища від 2 до 8; для їх вирощування оптимальним є рН 4,8 – 5,0. При рН нижче 4,2 дріжджі продовжують розвиватися, в той час як ріст кислотоутворюючих бактерій припиняється.

**Висновки.** Технологія виробництва біоетанолу за допомогою мікробного бродіння складається з трьох основних етапів. Перший

і основний – виготовлення ферментованого розчину цукру. Ферментація цукрів з утворенням етанолу в розчині є другим етапом, який проходить при сталих значеннях температури, рН та концентрації цукру. Виділення та очищення етанолу від розчину є завершальним, третім етапом, який зазвичай досягається за допомогою дистиляції.

**1.** Дубровін В., Голуб Г. Біодизель та біоетанол / ред. С. Щербак. Київ : Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України, 2015. 51 с. **2.** Ковіна О. Характеристика меляси як сировини для спиртового і дріжджового виробництва. Приймання, зберігання. Одеса, 2015. **3.** Прокопчук В. В. Технологія отримання біоетанолу з органічних відходів харчової промисловості за допомогою *Saccharomyces cerevisiae* та *Aspergillus niger* : магістерська дис. ... ступеня магістр за освітньо-професійною програмою «Біотехнології» спеціальності 162 «Біоінженерія». Київ 2022. 123 с. **4.** Daramola M. O, Zampraka A. Experimental study of the production of biomass by *Sacharomyces cerevisiae* in a fed batch fermentor. *African Journal of Biotechnology*. 2008. Vol. 7 (8). Pp. 1107–1114. **5.** *Saccharomyces cerevisiae* and its industrial applications / M. Parapouli et al. *AIMS Microbiology*. 2020. Vol. 6, no. 1. P. 1–32.

## REFERENCES:

**1.** Dubrovin V., Holub H. Biodyzel ta bioetanol / red. S. Shcherbak. Kyiv : Nats. un-t bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy, 2015. 51 s. **2.** Kovina O. Kharakterystyka meliasy yak syrovyny dlia spyrtovoho i drizhdzhovoho vyrobnytstva. Pryimannia, zberihannia. Odesa, 2015. **3.** Prokopchuk V. V. Tekhnolohiia otrymannia bioetanolu z orhanichnykh vidkhodiv kharchovoi promyslovosti za dopomohoiu *Saccharomyces cerevisiae* ta *Aspergillus niger* : mahisterska dys. ... stupenia mahistr za osvitno-profesiinoiu prohramoiu «Biotekhnolohii» spetsialnosti 162 «Bioinzheneriia». Kyiv 2022. 123 s. **4.** Daramola M. O, Zampraka A. Experimental study of the production of biomass by *Sacharomyces cerevisiae* in a fed batch fermentor. *African Journal of Biotechnology*. 2008. Vol. 7 (8). Pp. 1107–1114. **5.** *Saccharomyces cerevisiae* and its industrial applications / M. Parapouli et al. *AIMS Microbiology*. 2020. Vol. 6, no. 1. P. 1–32.

---



**Kvartenko O. M.** [1; ORCID ID: 0000-0001-5634-1128],  
Doctor of Engineering, Associate Professor

<sup>1</sup>*National University of Water and Environmental Engineering, Rivne*

## **TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT FOR BIOETHANOL PRODUCTION**

Climate change and the limited amount of fossil fuels have led to the development of renewable energy, one of the directions of which is the production of bioethanol. The raw materials from which bioethanol is produced are divided into four generations of biomass. The use of first-generation biomass – food products is inappropriate. The current issue is the development of technologies from resources of the second-fourth generations. The aim of the article is to analyze the prospects for the development of bioethanol production from agricultural raw materials. For the production of bioethanol, molasses is one of the best raw materials for processing. Along with the high sugar content, beet molasses contains all the substances necessary for the normal functioning of yeast.

Molasses does not contain dextrans, unsweetened starch, so it ferments faster, the loss of fermentable carbohydrates is reduced, and the yield of alcohol in terms of conditional starch increases. Due to the fact that the phosphorus content in molasses is insufficient for the normal development of yeast, the technology provides for the addition of 0.06–0.08% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in the form of superphosphate, diammonium phosphate and orthophosphoric acid. The fermentation of the wort takes place in fermenters. Bioethanol fermentation can be carried out in a periodic mode, a periodic mode with feeding or a continuous mode.

Characterization of the biological agent, *Saccharomyces*, a genus of yeast belonging to the family *Saccharomycetaceae*, phylum *Ascomycota*, kingdom Fungi. Maximum ethanol concentrations are observed in the medium of *Saccharomyces cerevisiae* and *Zymomonas mobilis*.

The vital activity of yeast is influenced by the active acidity of the medium. If the pH shifts to the alkaline side, the formation of glycerol increases. The vital activity of yeast is maintained within the pH range of the medium from 2 to 8; the optimal pH for their cultivation is 4.8–5.0. At a pH below 4.2, yeast continues to develop, while the growth of acid-forming bacteria stops.

The technology for producing bioethanol by microbial fermentation consists of three main stages. The first and main one is the production of a fermented sugar solution. The fermentation of sugars to form ethanol in the solution is the second stage, which takes place at constant temperature, pH

**and sugar concentration. The separation and purification of ethanol from the solution is the final, third stage, which is usually achieved by distillation.**

**Keywords:** Bioethanol; beet molasses; bacteria *Saccharomyces cerevisiae*; fermentation; fermentation.

Отримано: 17 червня 2025 року  
Прорецензовано: 02 вересня 2025 року  
Прийнято до друку: 25 вересня 2025 року