



Зберігання та переробка продукції

УДК 663.52
© 2025

СТАДІЯ ОЦУКРЕННЯ КРОХМАЛЮ ЯК ЛІМІТУЮЧИЙ ФАКТОР ЕФЕКТИВНОСТІ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЗБРОДЖУВАННЯ КРОХМАЛЕВМІСНОЇ СИРОВИНИ У ВИРОБНИЧИХ УМОВАХ

С.Т. Олійнічук¹, О.О. Коваль²

¹доктор технічних наук, старший науковий співробітник

²кандидат технічних наук

Інститут продовольчих ресурсів Національної академії аграрних наук України

вул. Є. Сверстюка, 4-А, м. Київ, 02002, Україна

e-mail: ¹oliynichucks@gmail.com, ²olgakoval1982@gmail.com

ORCID: ¹0000-0002-2885-6754, ²0000-0003-1035-5895

Надійшла 16.12.2024

Мета. Визначити основні параметри ферментативного гідролізу крохмалю кукурудзи у виробничих умовах, зокрема параметри стадії оцукрення, для подальшого розроблення ефективної технології безперервного зброджування суслу з крохмалевмісної сировини. **Методи.** Використовували загальноприйняті у спиртовій промисловості фізико-хімічні методи аналізу: вміст моно- і дицукрів визначали методом вискоэффективної рідинної хроматографії (ВЕРХ), вміст спирту — ареометрично. **Результати.** Встановлено, що виділення оцукрення крохмалю в окрему стадію у виробничих умовах дає можливість упродовж 4 год досягти його гідролізу до 99,38% від уведеного, що, своєю чергою, дає змогу розробити ефективну схему реалізації безперервного процесу зброджування крохмалевмісної сировини у промислових умовах. За безперервного зброджування оцукреного суслу підвищеної концентрації втрати цукрів з незбродженими становлять менш як 2% від уведених, тобто не перевищують регламентованих значень. Тривалість процесу зброджування крохмалевмісної сировини за таких умов скорочується до 26 год. **Висновки.** Підтверджено залежність перебігу процесу безперервного зброджування крохмалевмісної сировини від повноти її оцукрювання до зброджуваних цукрів та перспективу застосування цього процесу як засобу скорочення тривалості ферментації.

Ключові слова: ферментація, відходи переробки кукурудзи, спирт етиловий, розрідження крохмалю, ферментативний гідроліз.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202502-08>

Технологічний процес виробництва етилового спирту з крохмалевмісної сировини базується на трьох окремих, але взаємопов'язаних стадіях, як-от: ферментативне розрідження крохмалю α -амілазою з руйнуванням 1,4-глікозидних зв'язків; ферментативний гідроліз глюкоамілазою 1,6-глікозидних зв'язків з утворенням зброджуваних цукрів (переважно глюкози); перетворення отриманих цукрів на етиловий спирт. Стадія ферментативного розрідження крохмалю відбувається в безперервному процесі, а оцукрювання, культивування дріжджів та бродіння — періодичним способом, який потребує бродильної апаратури великих об'ємів. При цьому лімітуючими факторами перебігу процесу є швидкість утворення цукрів та швидкість їх споживання продуцентами етилового спирту, властиві періодичному процесу бродіння.

У періодичному процесі оцукрювання крохмалю і культивування дріжджів відбуваються одночасно у замкнутому і постійному об'ємі культурального середовища, склад якого з часом змінюється. Концентрація живильних речовин поступово зменшується, наближаючись до нуля. Отже, дріжджова клітина на початку періодичного процесу культивування перебуває в умовах надлишку живильних речовин з мінімальним вмістом продуктів метаболізму. Під час бродіння концентрація живильних речовин зменшується, а вміст метаболітів зростає [1, 2]. Очевидно, що дріжджі, вирощені на початку періодичного процесу, за своїми фізіологічними властивостями відрізнятимуться від тих, які вирощувалися в умовах безперервного процесу. Тобто в періодичному процесі бродіння неминучо є гетерогенність дріжджових клітин, що

визначає їх неоднорідну фізіологічну активність.

В умовах безперервного процесу, який характеризується тим, що приток живильного середовища в реактор дорівнює відтоку, підтримується постійна концентрація живильних речовин, а дріжджові клітини перебувають у стані метаболічної активності.

Базові принципи безперервних процесів біоконверсії рослинної сировини в етиловий спирт, наявність технологічних розробок і визначення їх економічної ефективності досить широко висвітлено в працях [3–6], присвячених технологіям зброджування цукровмісної сировини перед етанольною ферментацією зазнають ферментативного гідролізу до зброджуваних цукрів. Одними з головних проблем, що виникають в умовах безперервного бродіння, є повнота оцукрювання та збереження асептичних умов виробництва. Від цього залежать тривалість ферментації, втрати зброджуваних речовин та вихід етилового спирту. Однак дані щодо ефективності гідролізу крохмалю в умовах змінних параметрів, таких як температура, рН, активність і витрата ферменту, на практиці майже не враховуються [7–9]. Ферментативний гідроліз амілози та амілопектину за допомогою моделювання методом Монте-Карло [10, 11] показав, що коефіцієнт кореляції прогнозування моделі та отриманих експериментальних значень становить 0,6–0,91 для стадії розрідження та 0,84–0,91 — для стадії оцукрювання амілопектину. Це є свідченням того, що кінетика гідролізу крохмалю являє собою складний процес і залежить від властивостей субстрату, зокрема від його однорідності, й від комбінованої активності α - та глюкоамілази.

Результати дослідження процесу утворення зброджуваних цукрів упродовж 3 год реакції під час гідролізу крохмалю кукурудзи свідчать про зміну швидкості гідролізу крохмалю. Висока швидкість утворення зброджуваних цукрів і декстринів з крохмалю подрібненої кукурудзи зберігається до 15 хв, після чого процес характеризується повільнішим утворенням глюкози, яка є інгібітором дії ферментного препарату [12, 13].

Автори досліджували гідроліз крохмалю до глюкози залежно від співвідношення помел: вода у 3 етапи, а саме: комбіноване термічне й ферментативне розрідження крохмалю та подальше оцукрення. Встановлено залежність перебігу ферментативного гідролізу крохмалю й активності ферментів α - та глюкоамілази від показників технологічного процесу [12, 13].

Мета досліджень — підтвердити основні кінетичні закономірності ферментативного гідролізу крохмалю кукурудзи у виробничих умовах, зокрема стадії оцукрення, для подальшого розроблення ефективної технології безперервного зброджування сусла з крохмалевмісної сировини.

Матеріали та методи досліджень. Для встановлення ефективності безперервного зброджування підготовленої крохмалевмісної сировини на базі виробничих потужностей ДП «Зарубинський спиртовий завод» у Тернопільській обл. проведено моделювання процесу на пілотній установці із задіянням апаратів чистої культури.

Як сировину використовували сусло підвищеної концентрації із заводських комунікацій, попередньо розріджене препаратом α -амілази за температури 75–78 °С.

Основою сусла слугувала сировина крохмалевмісна подрібнена з підвищеним вмістом целюлозної складової, отримана як відхід промисловості у процесі переробки зерна. Гідромодуль сусла становив 1 : 2,5, при цьому 75%

від уведеної рідини становив фільтрат барди, оброблений препаратом целюлолітичного комплексу з вмістом цукрів 9,0 г/дм³. Уміст уведеного крохмалю, з урахуванням цукрів, унесених з фільтратом барди, становив 202,6 г/дм³.

Як продуцент спирту етилового використовували дріжджі, що застосовуються на виробництві. Оцукрення розрідженого сусла здійснювали препаратом глюкоамілази впродовж 4 год із розрахунку 6 одиниць на 1 г уведеного крохмалю. Зброджування оцукреного сусла проводили безперервним способом.

Уміст моно- та дицукрів у зразках для визначення динаміки перетворення вуглеводів із крохмалевмісної сировини в безперервному процесі та повноти зброджування встановлювали методом ВЕРХ із використанням хроматографа Shimadzu LC20. Уміст спирту в зрілій бражці визначали ареометричним методом [14]. Статистичну обробку результатів досліджень проводили з використанням програми STATISTICA 7,0.

Результати досліджень. За допомогою пілотної установки визначали динаміку гідролізу крохмального компонента зброджуваного сусла в процесі його оцукрення (табл. 1).

Подані у табл. 1 результати корелюють із результатами лабораторних досліджень [12], підтверджуючи таким чином, що лімітуючим фактором росту дріжджів та тривалості процесу бродіння є повнота гідролізу крохмалю глюкоамілазою до зброджуваних цукрів. Повний гідроліз крохмалю досягається за тривалості процесу оцукрення 4 год і сягає 99,38% від уведеного. Слід зауважити, що розрідження в умовах заводу здійснюється за температури 75–78 °С, яка є нижчою від використуваної в загальноприйнятій технології, однак уміст гідролізованого крохмалю у відсотках до введеного корелює з його вмістом у попередніх дослідженнях. Отже, можна стверджувати, що температура розрідження сусла в заводських

1. Динаміка перебігу оцукрення сусла з утворенням зброджуваних цукрів у виробничих умовах за безперервного процесу зброджування

Показник	Стадія		
	Сусло після розрідження	Оцукрення	
		1 год	4 год
Дицукри сумарно, г/дм ³	34,37 ± 0,63	39,28 ± 0,39	21,08 ± 0,62
Моноцукри сумарно, г/дм ³	50,96 ± 0,46	168,18 ± 0,95	197,60 ± 1,28
Усього, г/дм ³	85,33	207,46	218,68
Гідролізований крохмаль, % до введеного	36,85	94,12	99,38

2. Показники споживання цукрів продуцентами та утворення спирту етилового в процесі безперервного зброджування у виробничих умовах

Показник	Стадія		
	Сусло після оцукрення	Ферментація	
		6 год	26 год
Дицукри сумарно, г/дм ³	21,08 ± 0,62	8,07 ± 0,23	2,34 ± 0,12
Моноцукри сумарно, г/дм ³	197,60 ± 1,28	143,76 ± 0,95	1,02 ± 0,08
Усього, г/дм ³	218,68	151,83	3,36
Спожито дріжджами до вмісту цукрів після оцукрення, %	–	30,57	98,46
Уміст етилового спирту, % об.	0,00	4,00 ± 0,1	13,35 ± 0,1

умовах, за використання як сировини відходів від переробки кукурудзи, може бути знижена до певного рівня без втрати ефективності процесу розрідження. Водночас кількість препарату глюकोамілази, введеної для оцукрення, не перевищує норм, установлених виробником, з оптимумом дії на рівні 6 одиниць на 1 г введеного крохмалю.

У процесі зброджування оцукреного сусла було зазначено, що споживання зброджуваних цукрів продуцентами

після 6 год ферментації становило 30,57% від уведених, після 26 год — 98,46% (табл. 2).

У процесі ферментації отримали зрілу бражку з високим умістом спирту (13,35% об.) та низьким умістом незброджених цукрів (3,36 г/дм³). За умови зброджування сусла підвищеної концентрації втрати з незбродженим цукром становлять 1,54%, що свідчить про ефективність застосування описаного прийому у виробничих умовах.

Висновки

Установлено, що за тривалості оцукрювання сировини 4 год ступінь гідролізу крохмалю становить 99,38% і є достатнім для безперервного культивування дріжджів та спиртового бродіння. Температура розрідження сусла в заводських умовах, за

використання як сировини відходів переробки кукурудзи, може бути знижена до 75–78 °С без зменшення ефективності процесу розрідження.

Визначено, що втрати цукрів з незбродженими в умовах безперервного зброджування становлять до 2%

відносно введених у процес, що підвищує ефективність ферментації.

За результатами досліджень підтверджено залежність перебігу безперервного зброджування крохма-

левмісної сировини від повноти її оцукрювання до зброджуваних цукрів та перспективу застосування процесу як засобу скорочення тривалості ферментації.

Oliinichuk S.¹, Koval O.²

Institute of Food Resources of NAAS, 4-A Ye. Sverstiuk Str., Kyiv, 02002, Ukraine; e-mail: ¹oliynichucks@gmail.com, ²olgakoval1982@gmail.com; ORCID: ¹0000-0002-2885-6754, ²0000-0003-1035-5895

Stage of saccharification of starch as a limiting factor of efficiency of continuous fermentation of starch-containing raw materials under production conditions

Goal. To determine the main parameters of the enzymatic hydrolysis of corn starch in production conditions, in particular the parameters of the stage of saccharification, for the further development of an effective technology for the continuous fermentation of wort from starch-containing raw materials. **Methods.** They used the usual in the alcohol industry physicochemical analysis methods: the content of mono- and disaccharides was determined by high-performance liquid chromatography (HPLC), and alcohol content — areometrically. **Results.** It was found that the release of starch saccharification in a separate stage under

production conditions allowed within 4 hours to achieve its hydrolysis to 99.38% of the introduced one, which, in turn, allowed the development of an effective scheme for the implementation of a continuous process of fermentation of starch-containing raw materials under industrial conditions. With continuous fermentation of saccharified wort of increased concentration, the loss of sugars with non-fermented ones was less than 2% of the introduced, that is, did not exceed the regulated values. The duration of the process of fermentation of starch-containing raw materials under such conditions was reduced to 26 hours. **Conclusions.** The dependence of the process of continuous fermentation of starch-containing raw materials on the completeness of its saccharification to fermented sugars and the prospect of using this process as a means of reducing the duration of fermentation is confirmed.

Key words: fermentation, corn processing waste, ethyl alcohol, starch liquefaction, enzymatic hydrolysis.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202502-08>

Бібліографія

1. Sumner E.R., Avery S.V. Phenotypic heterogeneity: differential stress resistance among individual cells of the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Microbiology*. 2002. 148. Is. 2. P. 345–351. doi: 10.1099/00221287-148-2-345

2. Walker G.M. Yeast Physiology and Biotechnology. Chichester: John Wiley & Sons, 1998. 368 p.

3. Li Tan, Zhao-Yong Sun, Shinpei Okamoto et al. Production of ethanol from raw juice and thick juice of sugar beet by continuous ethanol fermentation with flocculating yeast strain KF-7. *Biomass and Bioenergy*. 2015. V. 81. P. 265–272. doi: 10.1016/j.biombioe.2015.07.019

4. Thani A., Laopaiboon P., Laopaiboon L. Improvement of continuous ethanol fermenta-

tion from sweet sorghum stem juice using a cell recycling system. *J. of Biotechnology*. 2017. V. 251. P. 21–29. doi: 10.1016/j.jbiotec.2017.03.030

5. Bai F.W., Anderson W.A., Moo-Young M. Ethanol fermentation technologies from sugar and starch feedstocks. *Biotechnology Advances*. 2008. V. 26. Is. 1. P. 89–105. doi: 10.1016/j.biotechadv.2007.09.002

6. Данилова К., Олійнічук С., Грушецький Р. Використання іммобілізованих мікроорганізмів в технології бродіння. *Продовольчі ресурси*. 2020. Т. 8. № 15 С. 91–101. doi: 10.31073/foodresources2020-15-10

7. Lee J.H., Pagan R.J., Rogers P.L. Continuous simultaneous saccharification and fermentation of starch using *Zymomonas*

mobilis. Biotechnology and bioengineering. 1983. 25(3) P. 659–669. doi: 10.1002/bit.260250304

8. Pat. US4243750A USA. Process for the hydrolysis of starch and the continuous fermentation of the sugars obtained therefrom to provide ethanol. 1979. Inventor: Werner C. Muller, Franklyn D. Miller. Current Assignee: Equistar Chemicals LP.

9. Thakur A., Panesar P., Saini M. Continuous Production of Lactic Acid in a Two Stage Process Using Immobilized *Lactobacillus casei* MTCC 1423 Cells. *International J. of Food Engineering*. 2018. P. 216–222. doi: 10.18178/ijfe.4.3.216-222

10. Murthy G., Singh V., Rausch K. et al. Mathematical Modeling of Enzymatic Hydrolysis of Starch: Application to Fuel Ethanol Production. *ASAE Annual Meeting*. 2006. doi: 10.13031/2013.21555

11. Marchal L., Zondervan J., Bergsma J. et al. Monte Carlo simulation of the α -amylolysis of

amylpectin potato starch. *Bioprocess Biosyst Eng*. 2001. 24. P. 163–170. doi: 10.1007/s004490100247

12. Данілова К., Олійнічук С., Заварзіна О. Дослідження динаміки оцукрювання крохмалевмісної сировини ферментним препаратом глюкоамілази в процесі ферментативного гідролізу. *Продовольчі ресурси*. 2022. Т. 10. № 9. С. 72–80. doi: 10.31073/foodresources2022-19-08

13. Олійнічук С., Данілова К. Декстринізація крохмалю альфа-амілазою в умовах виробництва етилового спирту. *J. of Chemistry and Technologies*. 2023. 31. С. 627–634. doi: 10.15421/jchemtech.v31i3.280974

14. СОУ 15.9-37-242:2005. Сировина крохмалевмісна зброджена для виробництва етилового спирту. Методи визначання об'ємної частки етилового спирту. Київ: Міністерство аграрної політики України, 2006. 23 с.