

УДК: 681.516.75

DOI 10.36910/775.24153966.2023.75.3

Б.О. Пальчевський, Л.М. Маркіна

Луцький національний технічний університет¹**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПРИГОТУВАННЯ ЗАМІСУ І ЙОГО ВОДНО-ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СПИРТУ**

В статті проведено аналіз стадії приготування та розварювання замісу при виробництві спирту з крохмалевмісної сировини. Під час виконання цієї стадії через вплив зовнішніх збурень не завжди вдається отримати задані значення технологічних параметрів, що призводить до необхідності їх коректування. В роботі описано запропоновану трьохконтурну систему керування процесом приготування замісу, яка забезпечує корекцію технологічних параметрів на основі контролю концентрації сухої речовини та в'язкості замісу, та розроблений алгоритм функціонування цієї системи керування.

Ключові слова: водно-теплова обробка, система керування, виготовлення спирту, в'язкість

B. Palchevskiy, L. Markina

INTELLIGENT SYSTEM FOR CONTROLLING THE PROCESS OF BATCH PREPARATION AND ITS WATER-HEAT TREATMENT IN THE PRODUCTION OF ALCOHOL

The article analyzes the stage of preparation and boiling of the mixture during the production of alcohol from starch-containing raw materials. During the implementation of this stage, due to the influence of external disturbances, it is not always possible to obtain the set values of the technological parameters, which leads to the need for their correction. The work describes the proposed three-circuit control system for the dough preparation process, which provides correction of technological parameters based on the control of the concentration of dry matter and the viscosity of the dough, and the developed algorithm for the functioning of this control system.

Key words: hydrothermal treatment, control system, production of alcohol, viscosity

Постановка проблеми. За останні десятиліття керування технологічними процесами стає все більш важливим для харчової промисловості через його здатність мінімізувати виробничі витрати і покращувати якість харчових продуктів. Зважаючи на те, що процес виробництва спирту відноситься до слабо формалізованих, а його стадії описуються в основному нелінійними рівняннями або взагалі не мають математичного опису, то для побудови надійної системи керування процесом, доцільно використати ланцюжок його постадійних моделей, зв'язаних між собою умовами переходу від однієї стадії процесу до іншої.

Технологічний процес виготовлення спирту складається з послідовності окремих стадій, на кожній з яких передбачено отримання проміжного продукту, що повинен мати відповідні значення технологічних показників:

$$X_i = \{X_i^1, X_i^2, \dots, X_i^n\}$$

де i - номер стадії виробництва,

n - технологічний показник напівпродукту.

Однак, під впливом зовнішніх збурень, а також за рахунок непередбачених змін у ході виконання технологічного процесу після виконання конкретної стадії не завжди вдається отримати бажані показники. Це пов'язано з тим, що тут відбуваються складні мікробіологічні й біохімічні процеси, які мають незворотний характер. У результаті наступні стадії виробництва, будуть проходити за непередбачених регламентом умов, що призведе до випуску продукції з низькими показниками якості. У зв'язку з цим виникає задача розробки алгоритмів автоматизованого корегування технологічних режимів на кожній стадії в залежності від результатів, отриманих на попередній стадії. Особливо це стосується початкових стадій виробництва, а саме приготування замісу із водно-зернової суміші та його водно-теплова обробка (ВТО), які визначають подальше протікання процесу виробництва спирту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Однією з найвідповідальніших стадій виробництва спирту з крохмалевмісної сировини є розварювання, яке залежить як від характеристик зернової сировини, так і від режимів її підготовки до ВТО [2, 4]. Тому на сьогоднішній день при одержанні спирту із зерна точність технологічних режимів при проведенні першої основної стадії є однією із ключових проблем [2, 6, 8]. З іншої сторони,

складність процесів на цій стадії та значні коливання характеристик вхідних матеріалів загальмували автоматизацію керування дільницею підготовки оцукрованого сусла із зерна. Зниження рухливості технологічного середовища на стадії приготування замісу призводить до погіршення умов протікання ферментативного гідролізу крохмалю та некрохмалистих полісахарид [1, 6, 7]. Окрім того, погіршуються умови міжапаратного переміщення напівфабрикату, що викликає втрати при виробництві спирту.

Постановка завдань. Оскільки корегування технологічних режимів необхідно виконувати на попередній стадії процесу, то у складі системи управління такими процесами необхідно передбачити використання прогнозованих моделей. Ці моделі дозволять визначити скореговані значення технологічних режимів, які необхідно підтримувати на плинній стадії виробництва з урахуванням технологічних показників, отриманих на попередній стадії. Для вирішення даного завдання необхідно розробити автоматизовану систему керування, яка б забезпечувала регулювання параметрів технологічного процесу та підтримувала їх в регламентованих межах.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо стадію приготування замісу і його ВТО при виробництві спирту, як сукупність етапів (рис.1). Пов'яжемо етапи початкової стадії виробництва спирту (одержанням замісу зерна із рідиною і його ВТО) між собою. Детальний розгляд етапів ВТО дає чітке розуміння про тісний взаємозв'язок всіх параметрів. Якщо технологічний процес триває за визначених регламентом умов, то підтримання регламентованих показників технологічних режимів забезпечує отримання напівпродукту із заданими показниками якості та забезпечує значну мінімізацію енергетичних ресурсів.

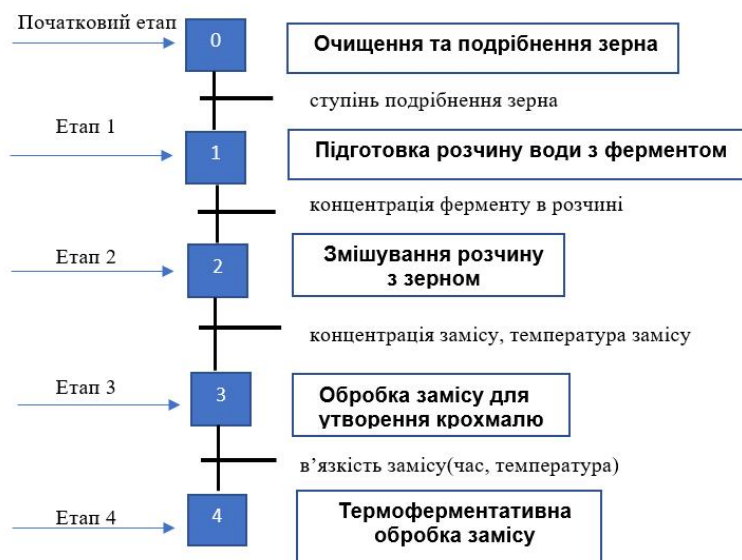


Рис. 1. Схема взаємозв'язаних моделей етапів приготування замісу і його ВТО

Початковим етапом є очищення та подрібнення зерна, яке надходить на виробництво спирту. Основною проблемою використання зерна для виготовлення спирту є забезпечення чистоти сировини, в першу чергу усуненню мікробіологічних забруднень і механічних домішок [1]. Подрібнення зерна - важлива стадія його підготовки до розварювання, оскільки якість і рівномірність помелу обумовлюють температурний режим водно-теплової обробки і ступінь втрат вуглеводів на цій стадії технологічного процесу. Помел повинен бути однорідним: прохід через сито діаметром 1,0 мм повинен бути не менше 95% [3,4]. Як відомо, сировиною для виробництва спирту є пшениця, жито, кукурудза.

Наступний **етап 1** передбачає підготовку розчину води з ферментом. Ферменти виконують роль катализаторів білкового походження [2]. Застосування ферментних препаратів сприяє інтенсифікації технологічних процесів, підвищенню виходу, поліпшенню якості готової продукції, забезпечує раціональне використання сировинних ресурсів [5]. Тому саме якість і кількість ферментних препаратів суттєво впливає на якість зернового сусла. Кількість використання даних препаратів визначається згідно регламенту технологічного процесу, який в свою чергу залежить від виду сировини, ступеня її подрібнення та кількісного співвідношення її з водою [6]. Особлива увага приділяється використанню ферментних препаратів селективної дії, що дозволить знизити температуру термоферментативної обробки замісів та забезпечують більш глибокий гідроліз біополімерів зерна [7].

На етапі 2 змішування розчину з зерном і отримання замісу одним із важливим моментів є дотримання співвідношень рідких та сипких складових процесу 2,5-3,0 л на 1 кг помелу. Кількість води змінюють у залежності від крохмалистості і вологості зерна з урахуванням того, щоб концентрація суслу була 18-20 % за цукроміром.

Обробка замісу на етапі 3 для утворення крохмалю передбачає регулювання температури замісу у залежності від дисперсності помелу зерна та змішування у відповідному співвідношенні розчину з зерном. Температурні режими замісів знаходяться в межах від 40° С до 80° С залежно від сировини [10,11]. Характеристиками замісу будуть концентрація сухої речовини і температура замісу. В свою чергу температура замісу визначає температурні показники, витрату пари та ступінь вивільнення крохмалю на наступній стадії – термоферментативної обробки. Складності виникають тоді, коли на попередній стадії виробництва не отримано передбачені регламентом технологічні показники. Наприклад виникає необхідність зниження температури замісу через різке зростання його в'язкості [9]. Це пов'язано з тим, що двофазна суміш (вода-зернові частки) змінює свої структурно-механічні властивості через початок процесу клейстеризації крохмалю [9], а це в свою чергу вимагає змін технологічних режимів наступної стадії, що призводить до додаткових витрат енергоресурсів.

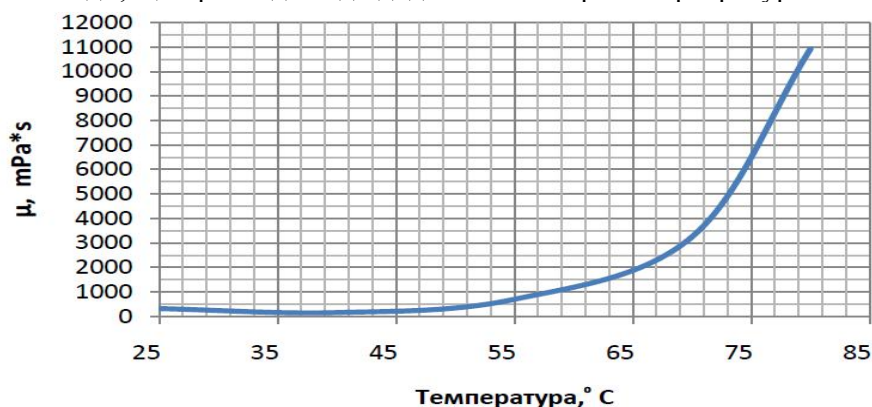


Рис.2. Зміна в'язкості водно-зернової суспензії в процесі її нагріву від 25°С до 85°С [10]

Як бачимо, особливістю підготовки замісу є те, що основний показник його якості - ступінь утворення крохмалю в замісі – не контролюється, а визначається приблизно за тривалістю теплової обробки при заданій температурі. Це обумовлює складності, які виникають тоді, коли на попередній стадії виробництва не отримано передбачені регламентом технологічні показники. Очевидно, що ситуація може бути покращена, якщо визначати ступінь крохмалистості замісу перед його подачею на наступну стадію обробки. Нами визначено, що таким показником може слугувати в'язкість замісу. Забезпечення заданої в'язкості замісу утворює передумови стабільності теплової його обробки і усуває необхідність зміни технологічних режимів на наступній стадії [1, 7, 9].

У всіх існуючих способах керування процесом підготовки зернового замісу є відсутність контролю за його в'язкістю, що не дозволяє використати теплові режими обробки, які забезпечили би ефективне проведення операції термоферментативної обробки суслу. Нині в'язкість зернових сумішей під час виробництва спирту не контролюється. На в'язкість замісів впливають ступінь подрібнення зерна, гідромодуль (m) та застосовувані ферментні препарати та їх кількість у замісі. При зміні типу зерна, розміру помелу, гідромодуля змішування, швидкості підвищення температури тощо, в'язкість замісу змінюється, тому передбачити в'язкість замісу, щоб уникнути його контролю, складно.

Оскільки корегування управляючих дій (технологічних режимів) необхідно виконувати перед початком виконання наступного етапу, то у складі системи управління такими процесами необхідно передбачити використання прогнозованих моделей, за допомогою яких можливо визначити скореговані значення технологічних режимів, що необхідно підтримувати на плинній стадії виробництва з урахуванням технологічних показників, отриманих на попередній стадії. На основі викладених міркувань було розроблено алгоритм поетапного відтворення процесу, який дозволив зв'язати в єдину систему всі етапи та технологічні режими процесу приготування замісу і його водно-теплової обробки.

Нами було розроблено систему керування в'язкістю замісу, що забезпечила покращення якості керування процесом підготовки замісу шляхом підвищення стабільності параметрів напівпродукту після стадії приготування замісу [5]. Автоматичне приготування замісу із крахмалевмісної сировини здійснюється в чанку-змішувачі із мішалкою та пристроєм подачі пари

для нагріву замісу. Автоматичне керування процесом приготування замісу проводять за допомогою системи керування, що складається із трьох контурів управління. Перший контур забезпечує задане співвідношення ферменту та гарячої води в деструктураторі крохмалю, другий контур забезпечує задане співвідношення подрібненого зерна і водного розчину деструктуратора крохмалю в замісі, третій контур забезпечує стабілізацію в'язкості крохмалевмісної маси шляхом регулювання температури T всередині бункера замісу за допомогою регулятора подачі пари (рис.3).

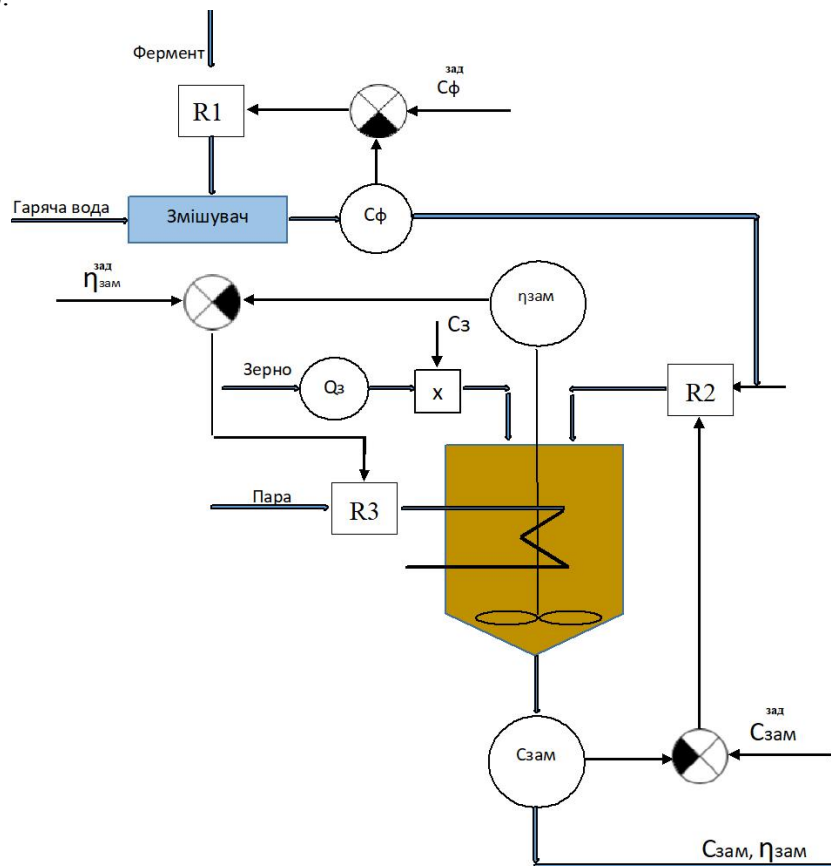


Рис.3. Трьохконтурна система керування процесом підготовки замісу

Змішування гарячої води з ферментами здійснюється у відповідному співвідношенні. Задане значення концентрації ферменту з водою порівнюються з поточним значенням в елементі порівняння 1 і у разі виникнення помилки неузгодженості $E_{\phi} = (C_{\phi}^{\text{зад}} - C_{\phi})$ сигнал надходить до регулятора R1, який змінює кількість ферменту, що надходить на змішування.

Наступний контур передбачає регулювання концентрації отриманого замісу. В змішувач неперервно надходить подрібнене зерно Q_z . Сигнал відповідної концентрації зерна C_z подається в блок перемноження, де перемножується з сигналом, який відповідає витраті зерна Q_z . Вихідний сигнал відповідає величині $Q_z C_z$, що і забезпечує надходження зерна відповідної кількості і концентрації в змішувач, куди також надходить змішана вода з ферментом. На виході з змішувача відбувається контроль концентрації замісу, яка в блоці порівняння 2 порівнюється з заданою. Помилка неузгодження надходить до регулятора R2, який змінює кількість рідких компонентів в замісі.

Третій контур регулювання передбачає регулювання в'язкості замісу, на величину якої впливають ступінь помелу зерна, його характеристики, вологість зерна та інші збурення. В'язкість визначається за допомогою вимірювання потужності, яка витрачається мішалкою при заданій швидкості обертання (наприклад, 100 об/хв). При постійній нарузі живлення мішалки потужність характеризується струмом, що використовується мішалкою. При побудові характеристики струм - в'язкість замісу значення струму живлення мішалки характеризує в'язкість замісу, значення якої подається на блок порівняння. Отримане значення помилки неузгодженості $E_{\eta} = (\eta_{\text{зам}}^{\text{зад}} - \eta_{\text{зам}})$ надходить до регулятора R3, який змінює кількість пари, що подається в змішувач.

Висновки

1. Аналіз літературних джерел показав, що практично у всіх існуючих способах керування процесом підготовки зернового замісу відсутній контроль за його в'язкістю, що не дозволяє використати теплові режими обробки в степені, достатній для забезпечення ефективного проведення наступної стадії термоферментативної обробки сула.

2. Початкові стадії процесу виробництва спирту, а саме стадії приготування замісу та його ВТО відносяться до слабо формалізованих, тому було запропоновано для побудови надійної системи керування його постадійне і поетапне математичне моделювання, яке включає окрім моделей окремих стадій і етапів також і моделі переходу від одного етапу чи стадії до іншого.

3. Розроблений алгоритм поетапного відтворення процесу дозволив зв'язати в єдину систему всі етапи та технологічні режими процесу приготування замісу і його водно-теплової обробки, а також забезпечити стабільне дотримання регламентних показників.

4. Впровадження трьохконтурної системи керування процесом підготовки замісу забезпечило контроль та регулювання всіх необхідних параметрів, що дозволило вплинути на зміну режимів розварювання, а саме зменшення витрат пари, зниження витрат зброджуваних речовин на стадії бродіння та покращення якості та кількість спирту.

Список використаних джерел

1. Громковская Л.К. Реологическая характеристика замесов из зерна, используемых в производстве спирта / Известия Вузов. Пищевая технология, №1-2, 1996. - с.27-29.
2. Технологія спирту. В.О.Маринченко, В.А.Домарецький, П.Л.Шиян, В.М.Швец, П.С.Циганков, І.Д.Жолнер. /Під ред. проф. В.О.Маринченка. - Вінниця: "Поділля-2000", 2003. - 496 с.
3. Леденев В.П. Гидрообработка зернового сырья в технологии получения спирта / В.П. Леденев, М.Е. Чурмасов, Р.А. Петров, В.В. Кононенко, О.С. Журба // Ликероводочное производство и виноделие, 2003. № 9 (45). С. 4-6
4. Шиян, П. Л. Інноваційні технології спиртової промисловості. Теорія і практика [Текст]: монографія / П. Л. Шиян, В. В. Сосницький, С. Т. Олійнічук. – К.: Видавничий дім «Асканія», 2009. – 424 с
5. Патент на корисну модель № 151663 UA МПК(2022) C12C 7/04, G05B 15/00. Спосіб автоматичного керування приготуванням замісу при виробництві етилового спирту із крохмалевмісної сировини /Пальчевський Б.О., Маркіна Л.М.,- № u 202200653; Заявл. 14.02.2022; Опубл. 25.08.2022, Бюл.№ 34.- 3с.
6. Изучение динамики изменения физико-химических показателей сула спиртового производства на стадиях механико-ферментативной обработки при увеличении концентрации зерновых замесов / А. А. Пушкарь, Д. В. Хлиманков, В. И. Соловей, Ю. С. Пусовская // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. наук. – 2019. – Т. 57, № 2. – С. 238–251. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2019-57-2-238-251>
7. Agafonov G.V., Kovaleva T.S., Yakovlev A.N., Muravev A.S., Yakovleva S.F. Optimization of water-heat treatment of barley batch (mix) in ethanol production. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2020. vol. 82. no. 3. pp. 131–138. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2020-3-131-138
8. Casey, G. P. Ethanol tolerance in yeasts / G. P. Casey, W. M. Ingledew // Crit. Rev. in Microbiology. – 1986. – Vol. 13, №3. – P. 219–280. <https://doi.org/10.3109/10408418609108739>
9. Yakovlev A N, Agafonov G V, Yakovleva S F, Romanyuk T I, Zueva N V, Kovaleva T S 2020 Refining process and properties of polysaccharide xylanase IOP Conference Series: Earth and Environmental Science p 640
10. A study of ethanol tolerance in yeast / T. D'Amore [et al.] // Crit. Rev. in Biotechnology. – 1990. – Vol. 9, N 4. – P. 287–304. <https://doi.org/10.3109/07388558909036740>
11. R. Folly, R. Berlim, A. Salgado, R. Franca and B. Valdman. ADAPTIVE CONTROL OF FEED LOAD CHANGES IN ALCOHOL FERMENTATION /Brazilian Journal of Chemical Engineering, vol. 14, № 4 ; <https://doi.org/10.1590/S0104-66321997000400012>