

УДК 681.51: 663.53

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-17

Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М., Сацик В. О.

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

ВИБІР ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПІДГОТОВКИ КРОХМАЛЕВМІСНОГО ЗАМІСУ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ

В статті проводиться аналіз механо-ферментативної обробки (МФО) при виробництві спирту. Визначення показника якості підготовки крохмалевмісного замісу – в'язкості, який на сьогоднішній день мало вивчений. Зазвичай основними показниками замісу є концентрація сухої речовини в замісі та ступінь утворення крохмалю в замісі, які не контролюються, а визначаються 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. Ситуація може бути покращена, якщо визначати ступінь крохмалистості замісу перед його подачею на наступну стадію обробки, це дозволить не лише покращити якість керування, але і вплине на кількісні показники кінцевої продукції, дозволить краще і швидше налаштувати систему автоматичного регулювання, а також забезпечить економію енергоресурсів.

Ключові слова: в'язкість, система автоматичного керування, МФО, приготування замісу, клейстеризація.

Постановка проблеми. Сировиною, яка переробляється на спирт, є зернові культури, які містять у своєму складі крохмаль, який займає визначальне місце в технологічному процесі. Процеси взаємодії з ферментами для крохмалю різних основних зернових культур суттєво відрізняються за характером і технологічними режимами їх протікання, що необхідно враховувати при визначенні ефективних технологічних параметрів для кожної зернової культури [1].

Механіко-ферментативна обробка сировини у виробництві спирту забезпечує економію електроенергії за рахунок виключення апаратів, що працюють під тиском, зниження втрат цукрів та підвищення виходу спирту з тони умовного крохмалю. Для впровадження механіко-ферментативної схеми необхідно забезпечити дрібний помел (за регламентом 80% проходу через сито $d=1$ мм) та використання бактеріальних α -амілаз [2].

При нагріванні подрібненої крохмалистої сировини з одночасною обробкою α -амілазою при механіко-ферментативній обробці йде інтенсивний гідроліз крохмалю до декстринів і цукрів, що сприяє якійсній підготовці сировини до подальшого оцукрювання та зброджування. Температура клейстеризації залежить переважно від природи крохмалю, розміру гранул. Так, до прикладу, температура клейстеризації пшеничного крохмалю 54...62°C, житнього 50...55°C. Зміна в'язкості крохмальних суспензій у воді визначає і зміну в'язкості замісів з різної сировини, оскільки крохмаль найбільше впливає на в'язкість. В'язкість крохмалевмісного замісу в період нагрівання суспензії крохмалю за температуру 35...45°C має властивість дуже повільно збільшуватися, в той час як за температури 75...85°C різко зростає і при 90°C досягає максимального значення. Різке підвищення в'язкості супроводжується інтенсивним набуханням сировини і початком клейстеризації. Процес клейстеризації практично завершується за температури 90°C і показники в'язкості практично лишаються сталими [7,8].

Процесу підварювання, під час переробки зерна, передує змішування крупки з водою. Він повинен проводитися так, щоб заміс був однорідним за температурного режиму води не вище 50°C (бути нижче температури клейстеризації). При механіко-ферментативному способі підготовки крохмалистої сировини із застосуванням розріджуючих ферментів α -амілази процеси набухання, клейстеризації та розчинення крохмалю необхідно проводити якомога повніше, оскільки процес розварювання під тиском виключається, а витримана на цьому етапі маса прямує безпосередньо на оцукрювання та охолодження.

Тому в умовах термічної обробки замісу необхідно підібрати такий режим, який повинен забезпечити більш повний перехід крохмалю у розчинений стан. В даний час до якості зерна і зернового суслу, що отримується на його основі, висувають все більш високі вимоги, так як вона безпосередньо пов'язана з якістю готової продукції: ректифікованого спирту. Слід зазначити, що у виробництві спирту зерно прийнято оцінювати з погляду вмісту в ньому головного компонента, що зброджується – крохмалю. При розробці нових технологій такий підхід не може повною мірою охарактеризувати сировину, що є багатокомпонентним субстратом бо під впливом

зовнішніх збурень, а також за рахунок непередбачених змін під час технологічного процесу, після виконання конкретної стадії не завжди вдається отримати бажані показники. Це пов'язано з тим, що термічний процес змішування супроводжується складними мікробіологічними й біохімічними змінами, які мають незворотний характер. У результаті наступні стадії виробництва, будуть проходити за непередбачених регламентом умов, що призведе до випуску продукції з низькими показниками якості, а також до додаткових енергетичних витрат. У зв'язку з цим виникає задача розробки алгоритмів автоматизованого керування процесами, особливо тими, що відбуваються на початковій стадії виробництва, а саме приготування замісу із водно-зернової суміші та його попередньої теплової обробки. Саме ці процеси визначають ефективність при подальшому протіканні процесів виробництва спирту. Для здійснення цієї стадії виникає проблема вибору показників замісу, придатних для автоматичного керування, які забезпечують спрощення синтезу системи керування. Технічним результатом такого підходу є автоматизація процесу вимірювання показника якості замісу, підвищення продуктивності підприємства, можливість контролю над зміною в'язкості в динаміці, економія енергоресурсів та ферментів [6, 7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Узагальнена технологія МФО на спиртових заводах України та за її межами передбачає наступну послідовність:

На початковому етапі відбувається перемішування всіх компонентів: зерна, води у співвідношенні від 1:2,5 до 1:4 та ферментів. Температурний режим підтримується за допомогою надходження гарячої води та становить в межах від 50-90°C в залежності від термостабільних показників ферментів. Час перебування замісу в змішувачі 20-30хв.

Наступним етапом є послідовне перекачування суміші спочатку в апарат термоферментативної обробки (ТФО -1), де перебуває 2 години за температури 6°-65°C, після чого потрапляє в апарат ТФО-2, де поступово збільшується нагрівання замісу від 7° до 90-95°C на протязі 1.5-2 год.

Далі здійснюється перекачування у паросепаратор для нагрівання до 100-105 °С.

Останнім етапом є охолодження до 58-60°C, витримування на протязі 30 хв. Отримане сусло перекачують на зброджування та при необхідності здійснюють додаткове зниження температури в теплообміннику, що обумовлено температурними показниками дій дріжджів.

Таким чином, раціональна схема МФО, розрахована на оптимальні тривалості ферментативної та ферментативно-теплової обробки, дозволяє завершити процес підготовки гідролізованої альфа-амілазної маси до зброджування з необхідністю урахування якості сировини, що переробляється, рисунок 1.

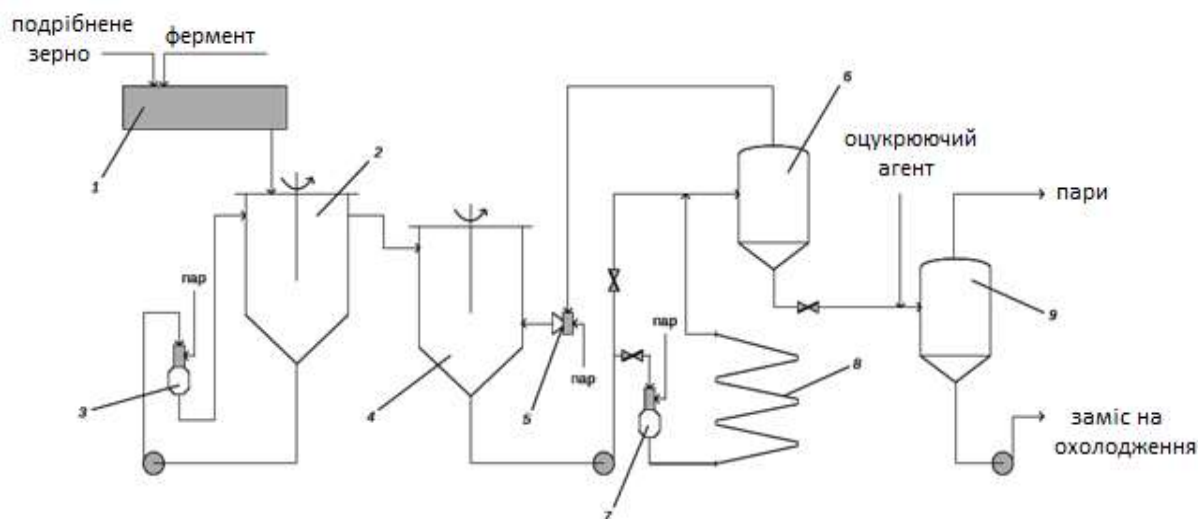


Рисунок 1 – Схема механіко-ферментативної обробки зернової сировини:

1 – змішувач; 2 – апарат ТФО-1; 3, 7 – контактна головка; 4 – апарат ТФО-2; 5 – паровий ежектор; 6 – паросепаратор; 8 – трубчастий витримувач; 9 - випарник-цукрівник

Підготовка замісу і його термічна обробка є найважливішим технологічним процесом під час виробництва спирту, від правильного ведення якого залежить успішність наступних процесів: розварювання замісу, повнота оцукрювання і бродіння і, зрештою - вихід спирту та його якість.

Процес розварювання (оцукрення) має на меті: зруйнувати клітинну структуру сировини та подрібнити, для виділення крохмалю із клітин і переведення його у розчинений стан.

До прикладу для житнього борошна основною властивістю крохмалю є температура клейстеризації та в'язкість [3]. Основні біотехнологічні процеси під час обробки крохмалевмісної сировини з метою одержання дозрілої бражки формуються з трьох послідовних стадій [5]:

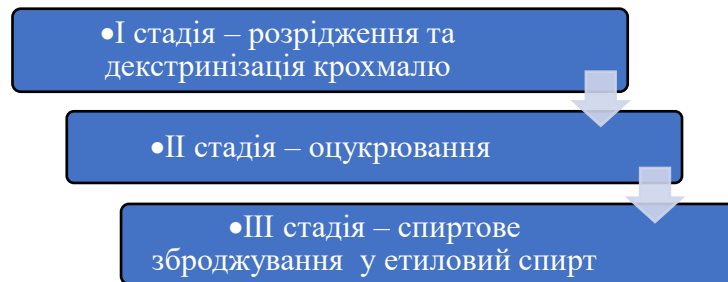


Рисунок 2 – Біотехнологічні процеси обробки крохмалевмісної сировини.

Варто зауважити, що конкретні температурні вимоги можуть варіюватися залежно від типу зернових замісів, їх якості та рецептури, що використовується в процесі виробництва спирту. Важливо враховувати ці фактори під час розробки процесу розварювання для забезпечення ефективного розкладання крохмалю. Із досліджень відомо, що в'язкість суспензії крохмалю у воді при підвищенні температури спочатку зменшується внаслідок зниження в'язкості води, потім підвищується, що обумовлено набуханням та клейстеризацією крохмалю [4].

За традиційною технологією отримання спирту із зернових замісів також передбачається використання змішувачів-передрозварників, функціональне призначення яких є підготовка зернового замісу до розварювання, яке в свою чергу супроводжується оцукрюванням крохмалевмісної сировини, що впливає на зміну в'язкості досліджуваного середовища. Тому можна стверджувати, що ступінь оцукрювання пропорційний в'язкості сировини та вивільненому крохмалю.

Проведені дослідження та аналіз отриманих результатів наукових робіт таких вчених, як Процан Н. В., Олійнічук С. Т. і Мельник С. Р. дозволив простежити динаміку клейстеризації крохмалю зерен на стадії приготування замісу та встановити основні фактори, що відіграють важливу роль. Зокрема можна виділити наступні закономірності:

Підвищення температури впливає на зміну в'язкості замісу, спочатку вона зростає, а потім в результаті досягнення температури клейстеризації починає знижуватись.

На температуру клейстеризації, в свою чергу впливає гідромодуль замісу (чим менший гідромодуль, тим вона вища). Передумовою такого процесу є утворення спочатку крохмальної сітки, яка під дією температури і її підвищенням руйнується.

На зміну в'язкості також має вплив ступінь подрібнення зерна (фракція).

Основними технологічними факторами початкового етапу технології приготування зернових замісів є ступінь подрібнення зерна, гідромодуль «зерно-вода» під час приготування зернових замісів, температура та тривалість водно-теплого оброблення [3]. Фракційний склад помелів розрізняється за ступенем дисперсності. Для кожної фракції помелу з метою скорочення втрат необхідний свій водно-тепловий режим щоб уникнути неповного розчинення крохмалю. Тому, актуальним завданням для науковців є дослідження впливу цих технологічних факторів на в'язкість зернового сусла під час підготовки його до спиртового зброджування і визначення оптимальних параметрів процесу, які характеризують підготовленість замісу для подальшої обробки.

Постановка завдань. Зазвичай основними показниками замісу є концентрація сухої речовини в замісі та ступінь утворення крохмалю, які не контролюються, а визначаються 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 яка обумовлює передумови стабільності теплової його обробки і усуває необхідність зміни технологічних режимів на наступній стадії [1, 7]. Для вирішення даного завдання необхідно визначити залежності між показниками приготовленого замісу і його в'язкістю.

Виклад основного матеріалу. Детальні дослідження даної ділянки нами передбачають розробку САР, яка б саме здійснювала контроль та регулювання вихідної суміші (замісу) базуючись саме на в'язкості. Для реалізації поставленої мети було проведено ряд лабораторних досліджень. В якості матеріалів було використано зразки замісів з різною концентрацією та співвідношенням зерно-вода 1:3. Нагрів суміші проводили у відповідності до технічного регламенту від 50 до 90°C. Для визначення густини замісу використано аерометр, який забезпечує швидкість та простоту виміру густини, рисунок 3.



Рисунок 3 – Лабораторне обладнання для визначення густини замісу

Для в'язкості вибрано капілярний візкозиметр ВПЖ-4. За результатами проведених досліджень, як лабораторно так і практично на чотирьох спиртогорілчаних заводів України дозволили сформувані наступні залежності між концентрацією сухих речовин і густиною, що представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Залежність густини замісу від концентрації сухих речовин

Концентрація сухих речовин %	Густина при температурі, °C				
	50	60	70	80	90
10	1,035	1,02	1,031	1,027	1,02
20	1,072	1,069	1,060	1,055	1,049
30	1,121	1,111	1,110	1,109	1,103
40	1,168	1,164	1,159	1,155	1,149

Також було встановлено залежність густини зернових замісів від концентрації сухих речовин, в'язкості та температури, таблиця 2.

Таблиця 2 – Залежність густини, в'язкості і концентрації сухих речовин від температури

Температура, °C	СР 10%		СР 20%		СР 30%		СР 40%	
	густина	в'язкість	густина	в'язкість	густина	в'язкість	густина	в'язкість
50	1,032	1,3	1,0747	2,1	1,1218	12,6	1,1691	20,2
60	1,01	1,2	1,0701	1,9	1,117	11,4	1,1642	18,4
70	1,030	1,1	1,069	1,7	1,110	10,2	1,1635	17,2
80	1,027	1,05	1,055	1,6	1,109	9,4	1,156	16,1
90	1,02	1	1,049	1,5	1,103	8,3	1,149	14,9

Далі проведено побудову графічних залежностей на основі отриманих експериментальних даних. На рисунку 4 представлено одну із отриманих залежностей густини, концентрації, в'язкості від температури.

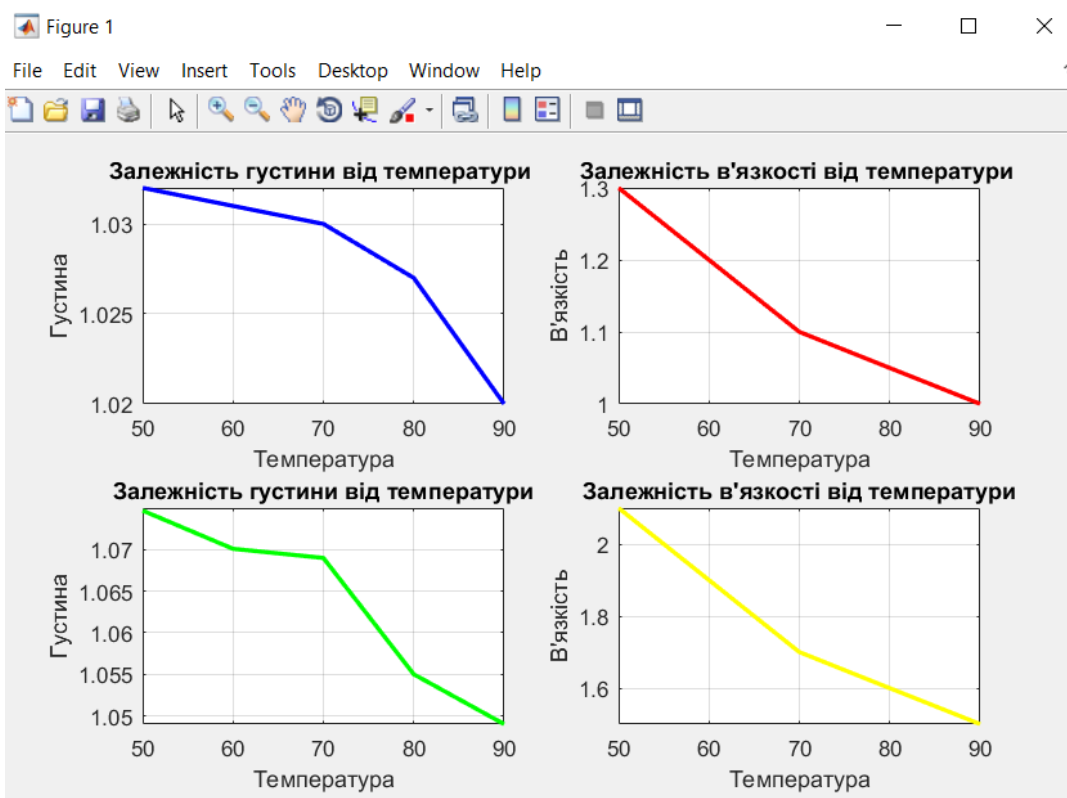


Рисунок 4 – Залежність густини і концентрації від температури та в'язкості, концентрації від температури.

У ході експериментів досліджено зміну в'язкості та густини замісу залежно від температури при різних значеннях концентрацій. Діапазон досліджених концентрацій становив від 10 до 40% сухих речовин з інтервалом 10% при зміні температури від 50 до 90 °С. Отримані дані дають змогу продемонструвати збільшення густини, а від так і в'язкості замісу від збільшення концентрації сухих речовин від 10% і вище. Перераховані закономірності дають чітке розуміння взаємозалежності усіх досліджуваних показників. Аналіз даних також дозволяє встановити, що в'язкість має тенденцію до зниження за умови збільшення температури замісу, незначне її збільшення спостерігається за низьких (до 10%) концентраціях замісу; поступова зміна відповідає 20-ти відсотковій концентрації, значне збільшення зафіксовано від 30-ти відсотковій концентрації і вище.

Висновок. В ході проведеного дослідження і аналізу параметрів процесу приготування замісу та його подальшого розварювання встановлено показник якості – в'язкість як такий, що впливає не тільки на ключові якісні та кількісні показники виготовленої продукції, а й на її енергоємність.

Проведене нами лабораторне дослідження водно-зернової суміші дозволило встановити, взаємозалежність густини та в'язкості від температури в сучасних системах автоматичного керування. Так зафіксовано збільшення густини, а від так і в'язкості замісу від збільшення концентрації сухих речовин від 10% і вище.

В'язкість має тенденцію до зниження за умови збільшення температури замісу, незначне її збільшення спостерігається за низьких (до 10%) концентраціях замісу; поступова зміна відповідає 20-ти відсотковій концентрації, значне збільшення даного показника зафіксовано вище 30-ти відсоткової концентрації.

Вищевказані закономірності гарантовано забезпечують спрощення етапу вибору операційних точок при налаштуванні САР та дають можливість адаптації в залежності від конкретних умов виробництва.

Інформаційні джерела

1. Патент на корисну модель № 151663 UA МПК(2^о22) C12C 7/04, G05B 15/00. Спосіб автоматичного керування приготуванням замісу при виробництві етилового спирту із крохмалевмісної сировини / Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М., № u202200653; Заявл. 14.02.2022; Опубл. 25.08.2022, Бюл.№ 34. 3с.

2. Пальчевський Б., Маркіна Л. Основні принципи автоматичного керування процесом підготовки крохмалевмісного замісу для виробництва спирту. TERMM-2023 IX Міжнародна науково – практична конференція «Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування»: IX international scientific and practical conference «theoretical and experimental research in materials science and mechanical engineering», м. Луцьк, 30 трав. 2023 р. Луцьк, 2023. С. 30-32.
3. Шиян П. Л. Інноваційні технології спиртової промисловості. Теорія і практика: моногр./ П. Л. Шиян, В. В. Сосницький, С. Т. Олійнічук. К.: ВД «Асканія», 2009. 424 с .
4. Марінченко В. О., Домарецький В. А, Шиян П. Л. та ін.; ред. Марінченка В. О. Технологія спирту. Вінниця: Поділля-2000, 2003. 496 с.
5. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М. Інтелектуальна система керування процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки при виробництві спирту. Наукові нотатки. 2023. № 75. С. 22-26. URL: <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2023.75.3>
6. Олійнічук С. Т.; Процан Н. В.; Ткаченко Л. В. Вплив Технологічних Факторів на В'язкість Житнього Сусла. Збірник Наукових Праць «Продовольчі Ресурси» 2017, 9, с 244-248.
7. Мельник Ю. Р., Мельник С. Р., Макаренко Д. С. Розрідження житнього замісу з використанням ферментного препарату shearzyme 500L. Chemistry, Technology and Application of Substances. 2024. Vol. 7, No. 1. С. 171-176.
URL: <https://doi.org/10.23939/ctas2024.01.171>
8. Lyudmila Markina, Bogdan Palchevskiy, Roman Hrudetskiy, Oleh Smoliankin, Yuliia Melnychuk, Nataliya Khrystynets: Optimization of Ethanol Production Using State-Space Modeling and Optimal Control Technology. 2023 Emergencies/ The 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT'2023). Greece, Athens, October 13-15, 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/DESSERT61349.2023.10416529>

Palchevsky B., Markina L., Satsyk V.

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

SELECTION OF QUALITY INDICATORS FOR THE PREPARATION OF THE STARCH-CONTAINING BATCH FOR AUTOMATIC PROCESS CONTROL

The article analyzes the mechanical-enzymatic processing (MEP) in alcohol production. Determination of the quality indicator of starch-containing batch preparation - viscosity, which is little studied to date. Usually, the main indicators of the batch are the concentration of dry matter in the batch and the degree of starch formation in the batch, which are not controlled but determined approximately by the duration of heat treatment at a given temperature. This leads to difficulties that arise when the technological indicators required by the regulations are not obtained at the previous stage of production. The situation can be improved if the degree of starchiness of the batch is determined before it is fed to the next processing stage, which will not only improve the quality of control but also affect the quantitative indicators of the final product, allow for better and faster adjustment of the automatic control system, and save energy.

Keywords: *viscosity, automatic control system, MFI, batch preparation, pasteurization.*