Technological peculiarities of dough structure formation in the absence of gluten. Physicochemical properties of gluten-free dough and methods of enhancing its elasticity. Innovative plant-based thickeners and technologies for extending freshness without synthetic preservatives

Oksana Kliuiko[1], *Ivanna Kliuiko* [2]

Received: 2021-05-29
Accepted: 2021-07-17
DOI https://doi.org/10.5281/zenodo.20046376

Abstract. Many Ukrainian bakeries, including those operating in the artisanal and small-scale industrial context, faced a major technological challenge: reproducible structure formation in gluten-free dough. Without a gluten network, dough systems become highly sensitive to hydration level, shear history, acidity, and fermentation temperature-time profile, which results in unstable specific volume, irregular porosity, crumb fragility, and accelerated staling. This paper systematizes the physicochemical mechanisms of structure development in gluten-free dough and substantiates process strategies aimed at improving elasticity and extending freshness without synthetic preservatives.

The analysis demonstrates that stable quality is achieved only when four control blocks are coordinated: (1) starch-protein matrix design based on alternative flours and pseudocereal components, (2) water redistribution and viscoelastic management, (3) use of innovative plant-based thickeners (psyllium, citrus and apple pectins, flax/chia hydrocolloid fractions, bamboo fiber, oat β-glucan), and (4) a fermentation-thermal scheme that limits post-bake crumb degradation. The results indicate that combined thickener systems provide a superior balance of gas retention, dough plasticity, and shelf-life stability compared with single-ingredient structuring.

Special attention is given to clean-label freshness technologies: sourdough acidification, enzymatic starch modulation, optimized cooling, moisture-supportive packaging, and anti-crumbly formulation profiles. A practical model is proposed for production, targeting consistent process output, sensory acceptance, and preservative-free shelf-life support. The article offers an applied control algorithm that helps bakeries integrate product functionality with economically realistic repeatability.

Keywords: gluten-free dough, elasticity, viscoelasticity, plant-based thickeners, psyllium, pectin, beta-glucan, crumb structure, staling, clean label, freshness extension, breadmaking technology.

[1] Founder of OK Bakery, Rivne, Ukraine
[2] Gluten-free baking expert, Chicago, USA

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Для пшеничного тіста структуроутворення базується на глютеновій сітці, яка забезпечує одночасно газоутримання, пружність і стійкість до деформації. У безглютенових системах такий каркас відсутній, тому технолог змушений створювати його штучно, керуючи водною фазою, в'язкістю, гелеутворенням і поведінкою крохмалю. У виробничих умовах це завдання особливо загострилося через зростання попиту на clean label-рецептури та відмову від синтетичних консервантів.

На практиці проблема проявляється як комплексний дефект: заготовка нестабільна при вистоюванні, м'якуш після випікання швидко втрачає еластичність, а під час зберігання посилюється крихкість. Отже, науково-практичне завдання полягає в побудові керованої моделі, яка одночасно підвищує еластичність тіста, стабілізує пористість, зберігає аромат і подовжує свіжість без застосування хімічних консервувальних агентів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, на які спирається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Базові положення безглютенового хлібопечення систематизовані в роботах кінця 2000-х - початку 2010-х років, де доведено визначальну роль гідроколоїдів, білкових добавок та ферментації у компенсації відсутнього глютенового каркаса [1], [2], [3]. Подальші дослідження показали, що якість безглютенового хліба суттєво залежить від реології тіста і стабільності крохмально-полісахаридної матриці [4], [5].

У 2010-х роках значний масив праць присвячено харчовій цінності та ультраструктурі безглютенових борошен, а також мікробним технологіям ферментації [6], [7]. Окрема увага приділялася ефектам додавання неглютенових білків, що покращують деякі структурні характеристики, але потребують точного налаштування водоутримання.

На етапі нинішніх років акцент змістився в бік інтегрованих підходів: поєднання інгредієнтної інженерії, заквасочних технологій і «чистих» рішень подовження свіжості. Міжнародні огляди підкреслили необхідність одночасного керування матрицею тіста і післявипікальною стабільністю. У вітчизняних публікаціях ці питання розкривалися переважно через окремі аспекти текстури або ферментації. Нормативно-ринковий контекст у цей період визначався чинним стандартом Codex та підходами FDA до маркування gluten-free.

Невирішеною залишається задача єдиної технологічної схеми, що поєднує: (1) підвищення еластичності безглютенового тіста; (2) використання інноваційних рослинних загущувачів; (3) подовження свіжості без синтетичних консервантів при стабільній сенсориці.

Мета статті (постановка завдання)

Метою статті є обґрунтування технологічної моделі формування структури безглютенового тіста в умовах, що забезпечує підвищення еластичності, стабільність м'якуша та продовження свіжості без використання синтетичних консервантів.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- проаналізувати фізико-хімічні властивості безглютенового тіста, критичні для еластичності;
- порівняти функціональну ефективність інноваційних рослинних загущувачів;
- визначити оптимальні комбіновані схеми загущення для газоутримання і пористості;

- оцінити технології збереження свіжості у clean label-підході;
- сформувати практичний алгоритм для ремісничого й малого промислового виробництва.

Методологічні засади дослідження

Методологія побудована за принципом «матриця тіста - процес - післявипікальна стабільність». Оцінювання здійснювалося за п'ятьма групами індикаторів:

- реологічні: уявна в'язкість, пружно-еластичний відгук, стійкість до механічного навантаження;
- технологічні: питомий об'єм, формостійкість, однорідність пористості;
- фізико-хімічні: динаміка pH, водоутримувальна здатність, активність бродіння;
- сенсорні: еластичність м'якуша, ароматичний профіль, післясмак;
- стабілізаційні: швидкість черствіння, крихкість через 24/48/72 год, вологість м'якуша.

Ключовим підходом була багатокритеріальна оптимізація: жоден параметр не розглядався ізольовано, а рішення приймалися на перетині структурної, сенсорної та зберігальної якості.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Фізико-хімічна природа структури безглютенового тіста

Якщо розглядати безглютенове тісто з погляду фізико-хімії, то ми маємо справу з вкрай нестабільною багатофазною системою. Тут архітектоніка продукту формується не через звичний білковий каркас, а за допомогою складних зв'язків між крохмальними гранулами, різними типами полісахаридів та рослинними білками. Головна складність у тому, що за відсутності глютену утримувати газ всередині стає набагато важче. Тепер ця функція повністю лягає на в'язкопружний стан гідроколоїдної матриці, яка фактично імітує еластичність клейковини.

У цьому процесі є кілька критичних точок структуроутворення, на яких тримається вся технологія:

Динаміка гідратації

Важливо не просто додати воду, а простежити, як швидко її поглинають гідроколоїди (наприклад, псиліум або пектини). Саме від цього залежить, чи буде тісто достатньо пластичним для формування, чи воно просто розвалиться ще до печі.

Створення гелевих доменів

Це такий собі тимчасовий «скелет» майбутнього хліба. Ці зони мають бути сформовані ще до випікання, щоб утримати форму заготовки під час підйому.

Стабілізація газової фази

Під час ферментації в'язкість середовища повинна бути такою, щоб пухирці діоксиду вугілля не зливалися між собою і не виходили назовні.

Клейстеризація крохмалю

Це момент істини під час термічної обробки. Коли температура зростає, крохмаль інтенсивно вбирає залишки вологи, фіксуючи пористу структуру і перетворюючи сире тісто на готовий м'якуш.

Процеси ретроградації

Навіть коли хліб випечений, він продовжує змінюватися. Кристалізація крохмальних ланцюгів (ретроградація) під час охолодження - це саме той

чинник, який змушує безглютеновий хліб черствіти набагато швидше за звичайний.

Для того, щоб якось приборкати цей хаос і отримати стабільний результат, ми виводимо певну математичну логіку якості (Q). Її можна представити як функцію, де кінцевий результат залежить від цілої низки змінних:

Q = f(C, H, V, F, T, t, P)

У цій моделі ми враховуємо все:

1. **C (Composition):** Які саме види борошна та загущувачів ми змішали.
2. **H (Hydration):** Скільки «вільної» води залишилося в системі.
3. **V (Viscoelasticity):** Наскільки матриця пружна та в'язка одночасно.
4. **F (Fermentation):** Який мікробіологічний режим ми обрали.
5. **T та t:** Температурні профілі та тривалість кожного етапу, від замішування до печі.
6. **P (Packaging):** Як ми охолоджуємо і в що пакуємо готовий виріб, адже це визначає його життя на полиці.

Тільки розуміючи взаємодію всіх цих параметрів, можна перетворити приготування безглютенового хліба з лотереї на керований інженерний процес.

Методи підвищення еластичності безглютенового тіста

Давайте будемо чесними: еластичність у безглютеновому світі - це не той дар, який ви отримуєте від природи разом із борошном. Це суто керований параметр, який доводиться буквально «витискати» з інгредієнтів. Якщо у класичному пекарстві глютен працює як природна гумова стрічка, то тут нам потрібно створити ілюзію цієї стрічки за допомогою складної гри між зв'язаною та вільною вологою. Весь фокус у тому, щоб рідка фаза тіста стала достатньо пластичною, але при цьому не перетворилася на некерований липкий кисіль.

Для того, щоб ця система не розсипалася, ми використовуємо кілька практичних інструментів, які перетворюють лотерею на прогнозований результат:

Ступенева гідратація

Це справжня тактика «порційного годування». Ми не виливаємо всю воду одразу. Чому? Бо загущувачі за своєю природою неймовірно жадібні. Якщо дати їм все і одразу, вони миттєво заблокують вологу, і крохмальні гранули залишаться «голодними». Додавання частини води вже після попереднього набухання основних компонентів дозволяє розслабити систему і додати їй тієї самої тягучості, якої нам так бракує.

Автоліз безглютенової суміші

Може здатися, що це просто марна трата часу, але ні. Коротка витримка суміші ще до початку активного, інтенсивного замішування дає змогу воді проникнути в найглибші шари частинок борошна. Це такий собі етап «притирання», коли компоненти домовляються між собою без механічного тиску. В результаті ми отримуємо набагато однорідніщу структуру без зайвих зусиль.

Двостадійне замішування

Тут ми розділяємо процес на дві чіткі фази - структуруючу та стабілізуючу. На першому етапі ми фокусуємося на створенні в'язкого гелевого каркаса, а на другому - м'яко доводимо систему до потрібної кондиції. Це дозволяє не «перебити» тісто і зберегти його здатність до розтягування, що критично важливо, коли воно почне рости в печі.

М’яке підкислення закваскою

Це історія не стільки про аромат, скільки про контроль гелеутворення. Зміна рівня pH (кислотності) середовища діє як тонкий хімічний тюнінг. Певний рівень кислотності робить крохмальні гелі стабільнішими і водночас еластичнішими, не даючи їм розриватися під тиском газу під час бродіння.

Комбінування рослинних загущувачів

Псиліум - це, звісно, база, такий собі фундамент. Але він не всесильний. Використання сумішей, де працюють одночасно кілька загущувачів із різною швидкістю зв’язування води (наприклад, псиліум плюс пектин або льон), створює багатошаровий захист. Поки один компонент вже тримає структуру, інший тільки вступає в гру, забезпечуючи еластичність на різних температурних етапах.

У підсумку, ми перестаємо сподіватися на чудо і починаємо працювати з тістом як з інженерною конструкцією. Тільки такий підхід дозволяє отримати м’якуш, який не кришиться в руках і має пристойну пористість. Це не просто рецепт - це управління фізикою процесу.

Інноваційні рослинні загущувачі та їх структурна роль

Інноваційність полягає не стільки у появі нових одиничних інгредієнтів, скільки у переході до композиційних систем загущення.

Псиліум. Дає виражений ефект вологоутримання та пластичності, підвищує формостійкість заготовки.

Цитрусовий/яблучний пектин. Формує м’які гелі, покращує зріз і зменшує крихкість у перші 24-48 годин.

Льонові та чіа-гідроколоїдні фракції. Працюють як природні структуроутворювачі з додатковим функціональним ефектом (клітковина, омега-фракції).

Вівсяний β-глюкан. Підсилює в’язкість рідкої фази, сприяє газоутриманню та уповільнює черствіння.

Бамбукова клітковина. Стабілізує водний баланс і покращує відчуття «сухої еластичності» м’якуша без гумовості.

Таблиця 1. Порівняльна технологічна роль рослинних загущувачів

Загущувач	Основний механізм	Вплив на еластичність	Ризик при передозуванні	Оптимальна функція в суміші
Псиліум	Інтенсивне водозв’язування	Високий	Надмірна щільність	Базовий структурний каркас
Пектин (цитрус/яблуко)	Гелеутворення	Середньо-високий	Липкість м’якуша	Антикрихкий компонент
Льон/чіа фракції	Слизоутворення, в’язкість	Середній	«Волога» текстура	Сенсорно-структурний баланс
β-глюкан вівса	Підвищення в’язкості	Середній	Зниження об’єму	Стабілізація пористості
Бамбукова клітковина	Регуляція водного профілю	Середній	Сухий післясмак	Корекція свіжості

Комбіновані системи загущення для безглютенового хліба

Найкращу відтворюваність демонструють композиції «псиліум + пектин» або «псиліум + β-глюкан + клітковина». Їх перевага полягає в різній швидкості гідратації компонентів: швидкий первинний ефект стабілізації поєднується з повільнішою післявипікальною підтримкою м'якуша.

Таблиця 2. Прикладні схеми загущення та очікуваний технологічний ефект

Схема	Еластичність тіста	Пористість	Свіжість 48 год	Практичний коментар
Псиліум + пектин	Висока	Рівномірна	Висока	Універсальна для формового хліба
Псиліум + β-глюкан	Середньо-висока	Добра	Висока	Ефективна при м'якому підкисленні
Пектин + льон/чіа	Середня	Середня	Середньо-висока	Краща для ремісничих виробів
Псиліум + клітковина	Висока	Середня	Середньо-висока	Потребує корекції гідратації

Технології подовження свіжості без синтетичних консервантів

У clean label-підході продовження свіжості забезпечується поєднанням декількох «м'яких» технологій:

- керована заквасочна ферментація (мікробіологічна стабілізація, аромат);
- ферментативне керування крохмальною фазою (зниження швидкості ретроградації);
- оптимізоване охолодження до цільової температури ядра;
- пакування з контрольованим вологообміном;
- рецептурна антикрихка корекція за рахунок полісахаридів і клітковини.

Таблиця 3. Порівняння «чистих» технологій збереження свіжості

Технологія	Основний ефект	Вплив на сенсорику	Обмеження
Заквасочна ферментація	Стабілізація м'якуша й аромату	Позитивний	Потребує контролю кислотності
Ферментативна модифікація	Сповільнення черствіння	Нейтральний/позитивний	Чутливість до режиму
Кероване охолодження	Менша крихкість	Нейтральний	Потрібна дисципліна процесу
Вологоутримувальне пакування	Збереження м'якості	Нейтральний	Ризик конденсату при помилках
Композиційні загущувачі	Антикрихкий профіль	Позитивний	Ризик «гумовості» при передозуванні

Результати технологічного моделювання

Коли ми говоримо про результати нашого технологічного моделювання, важливо розуміти: ми не шукали «стерильну» формулу для лабораторії. Нас цікавив реальний сектор - ремісничі пекарні та невеликі цехи, де обладнання може давати похибку, а борошно - змінювати вологість. Зрештою, після сотень тестів ми вивели комбінацію, яка працює стабільно, і вона базується на чотирьох «непорушних» складових.

Ось що дало найвищі бали за всіма показниками:

Борошняна суміш із «золотою серединою» псевдозлаків

Ми з'ясували, що не варто намагатися зробити хліб на 100% із гречки чи кіноа. Це шлях до отримання важкої «цегли». Оптимальний результат дає помірна частка цих культур у поєднанні з нейтральною рисовою базою. Це забезпечує ту саму поживність, за якою полює споживач, але зберігає легкість, притаманну класичному хлібу.

Тандем псиліуму та пектину

Якщо псиліум - це «м'язи» нашого тіста, його основний каркас, то пектин - це та сама секретна добавка, яка відповідає за утримання вологи та еластичність. Пектин (ми брали цитрусовий та яблучний) не дає м'якушу перетворюватися на суху тирсу. Ця зв'язка працює набагато краще, ніж будь-які синтетичні поліпшувачі.

Двостадійна ферментація з жорстким контролем фінального pH

Ми відмовилися від швидкого бродіння. Чому? Бо тільки довга робота мікрофлори закваски в поєднанні з коротким дріжджовим «поштовхом» дає правильну пористість. Контроль кислотності на виході - це ваша страховка від того, що хліб буде занадто кислим або, навпаки, прісним і гумовим.

Температурна стабілізація перед пакуванням

Це етап, на якому зазвичай «зрізають кути», а дарма. Хліб має повністю віддати зайву вологу і структурувати крохмаль. Ми зафіксували: якщо пакувати виріб лише після повної стабілізації м'якуша, термін його «життя» на полиці зростає без жодних консервантів.

Що ми маємо на виході? Профіль продукту виходить напрочуд збалансованим. Ви отримуєте стабільний, передбачуваний об'єм заготовки - вона не «падає» в печі. Зріз виглядає пружним, дірочки рівномірні, а головне - на другу і навіть третю добу хліб не починає кришитися під ножем. Аромат стає глибшим, з'являються ті самі горіхові та зернові нотки, які роблять продукт «дорогим» на смак, без жодних сторонніх присмаків. Це вже не просто дієтичний замінник, це повноцінний гастрономічний продукт

Практичний алгоритм впровадження для виробництва

Етап 1 - Скринінг сировини

Насамперед потрібно валідувати здатність до водопоглинання кожної окремої партії борошна та загущувачів. У безглютеновому секторі сировина від різних постачальників поводиться абсолютно непередбачувано, тому вхідний контроль - це не формальність, а питання виживання всієї партії. Ми не просто дивимося в сертифікати, а проводимо лабораторні тести на фактичне набухання, щоб розуміти, як компоненти поведуться в реальному замісі.

Етап 2 - Налаштування матриці

На цьому етапі ми підбираємо базову систему загущення та визначаємо цільовий діапазон гідратації для конкретного продукту. Важливо знайти ту саму «точку стійкості», де псиліум, пектин або інші волокна створюють міцний каркас, не роблячи тісто занадто важким. Пам'ятайте, що помилка в розрахунку води навіть на 2% може миттєво перетворити структуровану заготовку на безформну масу, тому ми встановлюємо жорсткі межі для кожної рецептури.

Етап 3 - Ферментаційна карта

Завдання полягає в тому, щоб чітко зафіксувати робочі межі часу, температури та цільового рівня pH для кожної борошняної композиції. Безглютенове бродіння - процес примхливий і значно швидший за традиційний, тому нам потрібна візуальна карта, яка не дасть системі піти в перебродження. Це дозволяє вчасно зупинити процес і відправити хліб у піч саме тоді, коли пористість досягла свого піка, а кислотність ще не зіпсувала смаковий профіль.

Етап 4 - Пілотна валідація

Тут ми проводимо контрольну випічку та оцінюємо структуру, еластичність і швидкість кришіння м'якуша через 24, 48 та 72 години після виходу з печі. Свіжий хліб майже завжди виглядає привабливо, але справжню якість показує саме динаміка ретроградації крохмалю на другу-третю добу. Ми фіксуємо, чи тримає м'якуш свою форму при нарізанні та чи не стає він надто сухим, що дозволяє підтвердити ефективність обраної системи стабілізаторів.

Етап 5 - SOP та масштабування

На фінальному етапі ми стандартизуємо всі критичні контрольні точки (SOP) і навчаємо персонал роботі з покроковими чек-листами. Щоб отримати ідентичний результат на великих обсягах, кожна зміна має діяти як один злагоджений механізм, розуміючи, де і що саме треба перевірити. Це перетворює успішний лабораторний експеримент на стабільний виробничий процес, де людський фактор зведений до мінімуму, а якість продукту є незмінною.

Таблиця 4. Контрольні точки процесу

Контрольна точка	Параметр	Критичний ризик	Коригувальна дія
Гідратація	Фактичне поглинання води	Щільний або липкий м'якуш	Корекція об'єму води на конкретну партію
Замішування	Час та інтенсивність	Руйнування структурної матриці тіста	Впровадження двостадійного режиму
Ферментація	pH, тривалість	Перебродження або слабкий об'єм	Адаптивне коригування часу бродіння
Випікання	Температурний профіль	Деформований або нестабільний каркас	Корекція режиму енергоподачі
Охолодження та пакування	Температура ядра та волога	Ризик конденсату, швидке черствіння	Стандартизований протокол стабілізації

Обмеження дослідження

Робота має прикладний характер. До обмежень належать:

- партійна варіативність рослинних загущувачів;
- відсутність єдиного міжлабораторного протоколу оцінки еластичності безглютенового тіста;
- залежність результату від дисципліни процесу на етапах охолодження й пакування.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. За відсутності глютену структура тіста визначається керованою взаємодією крохмалю, полісахаридів, білків і води; ключовим параметром стає в'язкопружний стан матриці.
2. Найвищий потенціал підвищення еластичності демонструють комбіновані рослинні системи загущення, насамперед «псиліум + пектин».
3. Подовження свіжості без синтетичних консервантів досягається лише комплексно: ферментація + рецептура + охолодження + пакування.
4. Для виробництв доцільно впроваджувати SOP-карти з контролем гідратації, pH і післявипікальної стабілізації.
5. Перспективи подальших досліджень пов'язані з математичним моделюванням реології безглютенових систем, персоналізованими композиціями загущувачів і предиктивними моделями терміну свіжості в clean label-сегменті.

Література

1. Renzetti, S., & Arendt, E. K. (2009). Effect of protease treatment and sourdough fermentation on the quality of gluten-free breads. European Food Research and Technology, 229, 307-314.
2. Moroni, A. V., Dal Bello, F., & Arendt, E. K. (2009). *Sourdough in gluten-free bread-making: An ancient technology to solve a novel issue?* Food Microbiology, 26(7), 676-684.
3. Arendt, E. K., & Gallagher, E. (Eds.). (2011). Gluten-free cereal products and beverages. Academic Press.
4. Hager, A.-S., Wolter, A., Jacob, F., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2012). Nutritional properties and ultra-structure of commercial gluten-free flours. Journal of Cereal Science, 56(2), 239-247.
5. Zannini, E., Pontonio, E., Waters, D. M., & Arendt, E. K. (2012). *Applications of microbial fermentations for production of gluten-free products and perspectives.* Applied Microbiology and Biotechnology, 93(2), 473-485.
6. Ziobro, R., Witczak, T., Juszczak, L., & Korus, J. (2016). Supplementation of gluten-free bread with non-gluten proteins. Food Hydrocolloids, 51, 170-179.
7. Roman, L., Gomez, M., Hamaker, B. R., & Martinez, M. M. (2019). Bioprocessing of rice flour to improve gluten-free bread quality. Journal of Cereal Science, 89, 102804.