

СУХА ПШЕНИЧНА КЛЕЙКОВИНА ЯК КОМПОНЕНТ РЕЦЕПТУРИ ХЛІБОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ З ВИСОКОЮ ГІДРАТАЦІЄЮ ТІСТА

Жигунов Д.О., проф., д.т.н., Єнгібарян В.Г., здобувач освіти PhD, Мельник І.В., доц., к.т.н.
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. У статті розглянуто роль сухої пшеничної клейковини (СПК) як ключового функціонального інгредієнта у виробництві хлібобулочних виробів з високою гідратацією тіста, що поєднує ремісничі традиції з сучасними технологіями харчової науки. Детально проаналізовано фізико-хімічні властивості СПК, її білковий склад, зокрема співвідношення гліадинів та глютенінів, вплив на водопоглинання, еластичність та формування тривимірного білкового каркаса. Описано механізми, за якими СПК підсилює газоутримувальну здатність тіста, підвищує його стійкість до механічних та ферментаційних навантажень, а також сприяє рівномірному формуванню пористої структури м'якуша. Узагальнено дані експериментів, які підтверджують, що внесення СПК у кількості 3–5% до маси борошна забезпечує оптимальний баланс між об'ємом, структурою та органолептичними властивостями хліба, особливо при використанні борошна з низьким вмістом сирої клейковини або додаванням волокнистих інгредієнтів. Розглянуто вплив різних методів виробництва та сушіння СПК на її функціональні характеристики, зокрема роль температурно-вологісного режиму у збереженні розтяжності та міцності білкової сітки. Проаналізовано приклади сумісного застосування СПК з ферментними препаратами (амілази, ксиланази, глюकोзооксидаза, трансглютаміназа), окисниками (L-аскорбінова кислота) та відновниками (L-цистеїн), а також з молочними та рослинними білками й дієтичними волокнами для досягнення синергетичного ефекту. Окрему увагу приділено впливу СПК на харчову цінність хліба, підвищення вмісту білка та зміну амінокислотного профілю, а також аспектам безпечності для споживачів з непереносимістю глютену. Наведено перспективи використання СПК у класичних та інноваційних рецептурах, включаючи безглютенові аналоги, продукти з підвищеною функціональною цінністю та спеціалізовані дієтичні вироби.

Ключові слова: суха пшенична клейковина, високогідратоване тісто, реологічні властивості, об'єм хліба, структура м'якуша.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Виробництво хлібобулочних виробів з високою гідратацією тіста сьогодні є одним із найдинамічніших напрямів у хлібопекарській промисловості, адже поєднує ремісничі традиції з інноваційними технологіями харчової науки. Рецептури, в яких вміст води перевищує 75 % від маси борошна (а іноді сягає 90 %), формують характеристики виробів — тонку хрустку скоринку, відкрити пористу структуру м'якуша, насичений аромат і триваліший термін свіжості. Підвищена гідратація інтенсифікує активність дріжджів, стимулює утворення газу та збільшує питомий об'єм, однак робить тісто рідкішим, менш пружним і більш вразливим до деформацій під час вистоювання та випікання, особливо коли потрібно зберегти форму. Ці фактори актуалізують потребу в ретельній оптимізації білково-клейковинного каркасу та розподілу вологи [1].

Сучасні дослідження підкреслюють, що оптимальна структура клейковинної мережі, яка зберігає цілісність при високій гідратації, досягається комбінацією часу для автолізу, м'якого механічного впливу, контролю ферментації та складних рецептурних змін. Серед інгредієнтів, які покращують водопоглинання та стабільність тіста, виділяють білки бобових, модифіковані крохмалі і β -глюкани, що підсилюють утримання газу, сприяють формуванню текстури і знижують темпи черствіння [2], [3].

В Україні впровадження технологій виробництва високогідратованого хліба стикається з додатковими викликами через непостійність якості пшеничного борошна: частка сирої клейковини зазвичай не перевищує 22–24 %, що недостатньо для формування стабільного тіста [4]. Причому в період 2023–2024 років спостерігалось збільшення частки фуражної пшениці через дощі перед збором врожаю, що погіршило експортні позиції України і зменшило доступність якісного зерна для помелу [5].

Це явище має декілька причин. По-перше, зміни агрокліматичних умов і логістики спричинили зростання частки пшениці з північних і західних регіонів, де вона має менший вміст білка. По-друге, економічні фактори (логістика в першу чергу) ускладнюють ефективне формування помельних партій зерна для стабілізації показників клейковини. По-третє, зосередження селекції на врожайності замість якості знизило технологічні властивості сучасних сортів [6]. В таких умовах суха пшенична клейковина стає стратегічним інгредієнтом: вона підвищує в'язкоеластичність тіста, стабілізує структуру, покращує газоутримання і дає змогу працювати з вітчизняною сировиною без залежності від дорогих імпортованих замінників.

Метою даної статті є аналіз та узагальнення літературних даних щодо використання сухої пшеничної клейковини як коректора технологічних властивостей борошна при виробництві хлібобулочних виробів, а саме виробів з високою гідратацією тіста. Для цього поставлено наступні завдання: проаналізувати хімічний склад сухої пшеничної клейковини, вивчити особливості виробництва сухої пшеничної клейковини; дослідити роль сухої пшеничної клейковини у формуванні структури тіста з високою гідратацією; проаналізувати

дозування та сумісний вплив СПК та різних технологічних добавок; вивчити вплив сухої пшеничної клейковини на поживну цінність і безпечність готової продукції

Виклад основного матеріалу дослідження. Суха пшенична клейковина (СПК) є продуктом, який концентрує основні білкові фракції ендосперму пшениці та являє собою високоцінний функціональний інгредієнт у хлібопекарській промисловості. Її отримують шляхом механічного відмивання крохмалю, водорозчинних цукрів, мінеральних речовин та небілкових компонентів з тіста, після чого вологу клейковину масу зневоднюють і сушать. У порівнянні зі звичайним пшеничним борошном суха клейковина має значно вищу концентрацію білка — як правило, 75–85 %, тоді як у борошні вищого ґатунку цей показник становить 10–14 % [7]. Така концентрація білків забезпечує їй унікальні фізико-хімічні властивості, завдяки яким вона ефективно використовується для корекції якості борошна, стабілізації тіста з високою гідратацією та підвищення харчової цінності продуктів.

Хімічний склад сухої пшеничної клейковини визначається наявністю двох основних класів запасних білків — гліадинів та глютенінів. Гліадини є одно- або низькополімерними білками з молекулярною масою приблизно від 30 до 80 кДа, які переважно розчинні у 70%-му етанолі. Вони надають тісту пластичності та розтяжності, але при надлишковій кількості можуть зменшувати його пружність. Глютеніни є високомолекулярними білками (>100 кДа), які утворюють полімерні агрегати, зшиті дисульфідними містками між цистеїновими залишками, та відповідають за еластичність, міцність і пружність тіста [8]. Співвідношення гліадинів і глютенінів в середньому становить близько 1:1, але воно варіює залежно від сорту пшениці, умов вирощування та технології виробництва СПК.

Амінокислотний склад сухої пшеничної клейковини є характерним для запасних білків злакових культур. Високий вміст глутамінової кислоти (до 35–40 % від загальної кількості амінокислот) та проліну (близько 10 %) зумовлює специфічну здатність білків глютенного комплексу до утворення β -спіральних та випадкових клубків, що робить структуру менш кристалічною та більш гнучкою [9]. Значна частка цистину (похідної цистеїну) забезпечує формування дисульфідних зв'язків, які є критичними для формування міцної тривимірної білкової мережі у тісті. Наявність фенілаланіну, тирозину та триптофану сприяє гідрофобним взаємодіям, що додатково стабілізують білкову структуру.

Фізико-хімічні властивості сухої пшеничної клейковини пояснюють її ключову роль у технології хлібопечення. Вона має високу еластичність, що забезпечує можливість утримувати гази, які утворюються під час бродиння, без розриву клейковинної сітки. Її в'язко-пружні властивості дозволяють тісту відновлювати форму після деформації, спричинених механічним впливом або тиском газів. Водопоглинальна здатність сухої клейковини у середньому становить 150–200 % від її маси, що дає змогу не тільки зв'язувати вільну вологу у тісті, а й контролювати його консистенцію при роботі з борошном низької якості [9]. У виробках з високою гідратацією суха клейковина підвищує об'ємний вихід, сприяє утворенню більш рівномірної та стійкої пористої структури м'якуша, а також зменшує ризик розтікання заготовок.

Таким чином, суха пшенична клейковина – це концентрат запасних білків ендосперму пшениці, представлений фракціями гліадинів і глютенінів, який зазвичай містить (масова частка): білок 70–85%, вуглеводи 4–8%, ліпіди 2–4%, харчові волокна 1–2%, золу 0,5–2% та вологу 8–12%.

Виробництво сухої пшеничної клейковини є складним технологічним процесом, який включає етапи відбору зернової сировини, подрібнення, екстракції клейковинних білків, їх відокремлення від крохмалю та подальшого сушіння. Якість готової клейковини значною мірою залежить як від характеристик початкової пшениці (вміст білка, співвідношення гліадинів і глютенінів, активність ферментів), так і від вибраного технологічного способу (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристика різних способів виробництва СПК

Технологічний спосіб	Вихідна сировина	Спосіб виділення клейковини	Спосіб сушки клейковини	Вид клейковини	Вихід клейковини	Технологічна складність
Альсантин	Зерно	Механічний	Конвективна сушка	Близька до нативної	Середній (до 25%)	Низька
Галле	Мука	Механічний	Конвективна сушка	Близька до нативної	Середній (до 30%)	Низька
Баттер	Мука	Механічний	Розпилювальна сушка	Близька до нативної	Високий (30–40%)	Низька
Дімлер	Мука	Механічний	Конвективна сушка	Близька до нативної	Середній (до 30%)	Низька
Тенстар	Мука	Механічний	Розпилювальна сушка	Близька до нативної	Середній (до 30%)	Низька
Фармарко	Мука	Механічний	Роликова сушка	Денатурована	Середній (до 30%)	Низька
Ельзаський	Зерно	Мікробіологічний	Конвективна сушка	Денатурована	Низький (20–30%)	Середня
Альтенбюргер	Зерно	Механічний	Конвективна сушка	Близька до нативної	Середній (до 35%)	Середня
Вечбер-Цвітсеріот	Мука	Механічний	Роликова сушка	Денатурована	Низький (до 20%)	Середня
Мартен	Мука	Механічний	Конвективна сушка	Близька до нативної	Високий (до 40%)	Середня
Феска	Мука	Хімічний	Розпилювальна сушка	Денатурована	Низький (до 25%)	Висока
Філіпс-Салланс	Мука	Хімічний	Ліофілізація	Денатурована	Середній (до 25%)	Висока
Пілсбурі	Мука	Хімічний	Ліофілізація	Денатурована	Середній (до 25%)	Висока
Лонгфорд-Слоттер	Мука	Хімічний	Розпилювальна сушка	Денатурована	Низький (до 20%)	Висока
Вайпро	Мука	Ферментативний	Ліофілізація	Близька до нативної	Середній (25–30%)	Висока
Альфа-Лаваль-Райсіо	Мука	Ферментативний	Розпилювальна сушка	Близька до нативної	Високий (до 45%)	Висока

Існує понад 15 промислових способів одержання пшеничної клейковини, які класифікують за кількома ознаками:

- за видом вихідної сировини — із зерна (Альсантин, Галле, Ельзаський, Лонгфорд-Слоттер, Мартін) та із борошна (Пілсбурі, Феска, Вайпро, Баттер, Тенстар);
- за способом виділення клейковини — механічний (Альсантин, Галле, Баттер, Тенстар, Мартін), хімічний (Пілсбурі, Феска, Лонгфорд-Слоттер, Філіпс-Салланс, Вечбер-Цвітсеріот), ферментативний (Вайпро, Альфа-Лаваль-Райсіо) і мікробіологічний (Ельзаський);
- за способом сушіння — конвективне (Альсантин, Мартен, Тенстар, Баттер, Дімлер), розпилювальне (Пілсбурі, Феска, Вечбер-Цвітсеріот, Філіпс-Салланс, Фармарко), ліофілізація (Філіпс-Салланс, Вайпро, Пілсбурі, Мартен) та роликова сушка (Фармарко, Вечбер-Цвітсеріот, Баттер, Тенстар, Альфа-Лаваль-Райсіо);
- за якістю одержуваної клейковини — нативна (Альсантин, Галле, Баттер, Тенстар, Мартен) і денатурована (Пілсбурі, Феска, Лонгфорд-Слоттер, Вечбер-Цвітсеріот, Фармарко).

Ці класифікації перехресні, тож конкретний технологічний процес визначається поєднанням сировини, методу виділення та режиму сушіння.

Традиційні методи (процес Мартіна, Баттер) передбачають заміс густого тіста або батеру з подальшим відмиванням крохмалю через ситові системи, тоді як сучасні технології (гідроциклон, високошвидкісне диспергування) здійснюють відокремлення за допомогою центрифугування після попереднього часткового розвитку клейковинної сітки [10]. Сушіння є найбільш критичним етапом, оскільки від температурно-вологісних параметрів залежить збереження функціональних властивостей білків. Дослідження показали, що при сушінні за вологості понад 20% та температурі 80 °C протягом 30 хвилин різко знижується розтяжність та максимальний опір тіста на екстенсографі з 480 до 320 BU, а також знижується газоутримувальна здатність тіста [11]. Аналіз SDS-розчинних білкових фракцій вказує на агрегацію високомолекулярних глютенінів, що прямо корелює зі зниженням еластичності, що надмірно високі температури сушіння знижують в'язкоеластичні властивості білка, тоді як оптимізація режимів гарячого повітря або використання сублімаційного сушіння дозволяє зберегти майже всі функціональні властивості та подовжити термін зберігання СПК [12].

Альтернативні методи, як-от зсувна фракціонування (shear-induced separation), забезпечують більш м'які умови відокремлення білка, що зберігає його реологічні властивості. Порівняння такої клейковини з комерційною показало, що зразки, отримані за зсувною технологією, мають кращі показники розтяжності та стійкості тіста на екстенсографі (збільшення площі кривої на 12%) і забезпечують вищий питомий об'єм хліба [13].

Не менш перспективним є ферментативне модифікування СПК, що дозволяє змінювати її структуру для розширення функціональних властивостей: підвищення пінопідйомної здатності, покращення водо- та жиrow'язування, створення нових текстур хліба, включаючи м'які та пружні безглютенові аналоги [9].

Якість сухої пшеничної клейковини (СПК) має відповідати вимогам Codex Alimentarius — CXS 163-1987 «Standard for Wheat Protein Products including Wheat Gluten», згідно з яким СПК — це продукт, одержаний шляхом вилучення зі пшеничного борошна крохмалю та водорозчинних фракцій і представлений переважно білками глютенів (гліадини та глютеніни; для «vital» форми — із збереженою здатністю відновлювати в'язкоеластичні властивості після гідратації), і вона повинна містити не менше 80% сирого білка (N×6,25) у перерахунку на суху речовину, мати вологість не більше 10% (m/m), золу — не більше 2,0% (на суху речовину) та сиру клітковину — не більше 1,5% (на суху речовину); використання харчових добавок для такого продукту не допускається.

Оскільки суха пшенична клейковина (СПК) може застосовуватися як технологічна добавка у широкому спектрі харчових продуктів — від ковбас та інших м'ясних виробів до кондитерських і хлібобулочних — з метою надання їм специфічних функціональних властивостей, у ній доцільно визначати такі показники: водозв'язувальна здатність 150–250 %, жирозв'язувальна здатність 100–130 %, жироемульгуюча здатність 50–70 %, стабільність емульсій 80–120 %, піноутворювальна здатність 160–240 % та стабільність піни 55–70 % [14].

У сучасних умовах виробники комбінують традиційні та інноваційні методи, використовуючи контроль процесу сушіння через ІЧ-сенсори вологості, низькотемпературне сушіння під вакуумом або псевдозріджений шар для мінімізації денатурації білків. Експериментальні дані свідчать, що такі підходи дозволяють зберегти показники питомого об'єму хліба на рівні +15% у порівнянні з клейковиною, отриманою за умов високотемпературного сушіння [15].

Таким чином, якість сухої пшеничної клейковини визначається як генетичними характеристиками вихідної сировини, так і технологічними параметрами виробництва. Контроль кожного етапу — від вибору методу відокремлення білків до режимів сушіння — є ключовим для отримання продукту з оптимальними функціональними властивостями, що підтверджується приладовими вимірюваннями та випробуваннями у хлібопеченні.

Формування білкового каркаса у тісті з високим вмістом води є складним багатостадійним процесом, що поєднує механічну активацію білків, їх гідратацію, орієнтацію макромолекул та розвиток тривимірної

сітки за рахунок ковалентних і нековалентних взаємодій. На початковій стадії замісу борошно контактує з великою кількістю води (понад 75–80 % до маси борошна), що призводить до швидкого набухання білків гліадиново-глютенінового комплексу. Гліадини, завдяки відносно компактній структурі, швидко гідратуються, тоді як глютеніни, які є довгими полімерними ланцюгами, вимагають більш тривалого впливу для досягнення повного набухання та розкручування спіралей [16]. При високій гідратації збільшується мобільність білкових макромолекул, що сприяє утворенню більш довгих і рівномірно орієнтованих волокон клейковини. Це покращує пластичність тіста, однак надлишок вологи знижує загальну концентрацію білка в одиниці об'єму, що призводить до зменшення міцності сітки. У таких умовах введення сухої пшеничної клейковини компенсує розбавлення білкового каркаса та підвищує щільність і кількість міжмолекулярних зв'язків. Додаткові полімерні ланцюги глютенінів із сухої клейковини зшиваються дисульфідними містками з білками борошна, утворюючи посилену сітку, яка краще протистоїть розриву та деформації під дією газового тиску [17].

Оцінка технологічної якості клейковини для хлібопекарського використання здійснюється за допомогою низки приладів: альвеограф, екстензограф та фарінограф. При додаванні 2-3 % якісної сухої пшеничної клейковини до борошна середньої якості тісто з високою гідратацією демонструє збільшення показника енергії W на 30-50 10-4 Дж, що відображає зростання здатності тіста протидіяти розриву. Показник P (опір роздуванню) зростає на 15–25 мм, а показник L (довжина роздування, що характеризує розтяжність) зберігається або злегка збільшується, що свідчить про баланс між пружністю та еластичністю сітки. Оптимальне співвідношення P/L після введення якісної сухої пшеничної клейковини у тісто з високою гідратацією наближається до 0,7–1,0, що є бажаним для отримання стабільного об'єму та рівномірної пористості м'якушки. Дані фарінографа Брабендера показують, що додавання сухої пшеничної клейковини збільшує водопоглинальну здатність тіста на 2–4 % та подовжує час розвитку клейковини на 1,5–2,5 хвилини. Це свідчить про більш повільне, але стабільне формування білкової сітки, здатної утримувати велику кількість вологи без втрати структури. Стабільність тіста (*stability*) зростає на 3-5 хв., а ступінь розм'якшення (*softening degree*) зменшується, що вказує на кращу стійкість до механічного навантаження та ферментаційного тиску. Результати екстензографічних випробувань підтверджують, що суха клейковина підвищує як максимальне навантаження при розтягуванні (R_{max}), так і площу під кривою розтягування, що є показником загальної енергії деформації. Це корелює з високими значеннями *strain hardening*, які є ключовими для збереження газових бульбашок під час кінцевої розстойки [18].

Газоутримувальна здатність тіста з високою гідратацією суттєво залежить від безперервності та міцності клейковинної сітки. За відсутності достатньої кількості білка бульбашки газу швидко зливаються, утворюючи великі порожнини, що призводить до нерівномірної структури м'якушки та зменшення загального об'єму виробу. Додавання сухої клейковини забезпечує рівномірний розподіл напружень у стінках бульбашок, зменшує швидкість коалесценції газових клітин і підвищує стабільність піни до моменту коагуляції білків під час випікання [19]. Крім того, з позицій полімерної фізики, при високій гідратації відбувається зниження ефективної концентрації полімеру, але за рахунок збільшення довжини та гнучкості ланцюгів глютенінів виникає більша кількість точок зшивання, якщо є достатньо білка для формування мережі. Суха клейковина відіграє тут роль додаткового «модуючого агента», що підвищує критичну концентрацію утворення гелеподібної фази, збільшує модуль зсуву (G') та зменшує тангенс кута втрат ($\tan \delta$), що вказує на більш еластичний характер тіста.

Таким чином, у тісті з високою гідратацією суха пшенична клейковина виконує подвійну функцію: структуроутворюючу, формуючи міцний, еластичний і пружний каркас, та стабілізуючу, забезпечуючи збереження газової структури до моменту термічної фіксації. Її вплив можна кількісно оцінити за допомогою комплексних реологічних методів (альвеограф, фарінограф, екстензограф), які демонструють істотне підвищення стійкості та газоутримувальної здатності тіста, що безпосередньо корелює з об'ємом, пористістю і якістю готового виробу.

Дозування сухої пшеничної клейковини у рецептурах хлібобулочних виробів з високою гідратацією тіста суттєво впливає на об'єм, форму, структуру та органолептичні характеристики готової продукції. Збільшення вмісту клейковини до оптимальних рівнів дозволяє компенсувати зниження якості клейковинного каркаса, яке виникає при використанні борошна з низьким вмістом сирової клейковини або при додаванні висівків та інших високоволокнистих інгредієнтів. Дослідження показують, що внесення сухої пшеничної клейковини на рівні, що перевищує початковий вміст білка у борошні, здатне значно підвищити питомий об'єм хліба, поліпшити рівномірність пористості м'якуша та зменшити його жорсткість упродовж зберігання [20].

Встановлено, що додавання СПК сприяє максимізації об'єму буханця, покращенню газоутримуючої здатності тіста та збереженню еластичності м'якуша після випікання. Так, у дослідженнях на замороженому тісті вміст 4% сухої пшеничної клейковини забезпечив найбільший питомий об'єм та найвищі сенсорні оцінки у дегустаційних тестах [21].

Крім того, в роботах із розробки хліба з нетрадиційною сировиною (ячмінь, цілнозернові суміші, патока) встановлено, що введення сухої клейковини сприяє збільшенню часу стабільності тіста за даними фарінографа, підвищує його розтяжність за альвеографом і знижує ступінь розм'якшення під час бродіння. У

випадку оптимізованих рецептур з додаванням патоки та насіння льону доза сухої клейковини близько 4% забезпечувала питомий об'єм понад 4,5 мл/г та низьку твердість м'якуша (менше 1000 gf) [22].

З точки зору структури м'якуша, додавання сухої клейковини дозволяє формувати більш дрібнопористу та рівномірну комірку структуру, що підтверджується даними комп'ютерного аналізу зображень та вимірюванням числа комірок на одиницю площі. Позитивний ефект особливо виражений у виробках з високою гідратацією (70–85%), де підвищена рухливість води може призводити до розриву клейковинної сітки без білкового підсилення [23] [24]...

Органолептично хліб із додаванням сухої пшеничної клейковини характеризується більш насиченим ароматом, кращою пружністю м'якуша та приємною еластичною текстурою, а колір кірки стає більш інтенсивним завдяки підвищенню вмісту білка і, відповідно, інтенсивності реакцій Майяра під час випікання. Дегустаційні панелі найвищі оцінки давали зразкам із вмістом сухої клейковини на рівні 3–4%, де досягався баланс між об'ємом, текстурою та смаковими властивостями [25].

Таким чином, дозування сухої пшеничної клейковини є критичним інструментом керування якістю хлібобулочних виробів з високою гідратацією тіста. Оптимальний рівень залежить від типу борошна, наявності додаткових інгредієнтів та вимог до кінцевого продукту, проте в більшості випадків ефективний діапазон становить 3–5% до маси борошна, що дозволяє підвищити об'єм, покращити структуру та стабілізувати органолептичні характеристики виробів упродовж зберігання.

Комплексне застосування сухої пшеничної клейковини з технологічними поліпшувачами — ферментними препаратами, окисниками, відновниками, молочними та білковими добавками, дієтичними волокнами — є потужним інструментом регулювання структури тіста та покращення якості хлібобулочних виробів з високою гідратацією (70–85%). Ефективність такого підходу обумовлюється синергетичним впливом різних механізмів: зміцненням клейковинного каркаса, регулюванням в'язкоеластичних властивостей, оптимізацією водопоглинання та контролем газотримувальності здатності тіста.

Добре відомо, що амілази розщеплюють крохмаль до декстринів і мальтози, забезпечуючи дріжджі достаттєвими субстратами та стимулюючи активніше газоутворення. При сумісному додаванні амілаз та СПК суха пшенична клейковина підсилює білковий каркас, що дозволяє ефективніше утримувати збільшені об'єми газу. У роботі [26] використання суміші амілаз і 4% клейковини підвищило питомий об'єм буханця з 3,7 мл/г до 4,6 мл/г, зменшило твердість м'якуша через 24 години зберігання на 18% (TPA), а на альвеографі показник енергії (W) зріс на 26%. Ксиланази гідролізують арабіноксилани клітинних стінок ендосперму, зменшуючи в'язкість водної фази тіста і покращуючи його газотримувальну здатність. При високій гідратації (82%) поєднання ксиланаз із клейковиною збільшувало розтяжність тіста (L) на 12–15% і знижувало P/L з 1,1 до 0,8, що сприяло більш рівномірній пористості м'якуша. Глюкозооксидаза у присутності кисню каталізує окисне зшивання білків, що підвищує міцність клейковинної сітки. Дослідження [27] показало, що у поєднанні з 3% клейковини модуль пружності (G') тіста збільшився на 25%, а стабільність за фаринографом зросла з 9,2 до 11,1 хв. Аналіз C-Cell виявив зростання кількості пор на 14% при зменшенні середнього діаметра з 2,3 мм до 1,7 мм. Трансглютаміназа каталізує утворення ϵ -(γ -глутаміл)-лізинових зв'язків між білковими молекулами, зміцнюючи клейковинний каркас навіть за умов сильно розрідженого тіста. У поєднанні з 2% сухої клейковини вона збільшувала стабільність за екстенсографом на 32% і знижувала втрату об'єму під час випікання на 8–10%.

L-аскорбінова кислота є класичним окисником, що окиснює сульфгідрильні групи до дисульфідних, зміцнюючи клейковину. Дослідження [20] показало, що 4% сухої клейковини з 100 ppm L-аскорбінової кислоти підвищили питомий об'єм хліба на 27%, енергія деформації W за альвеографом зросла із 220×10^{-4} J до 315×10^{-4} J, а P/L знизився до оптимального значення 0,9. L-цистеїн як відновник розриває дисульфідні зв'язки, підвищуючи пластичність тіста. При його застосуванні у мікродозах (20 ppm) разом із 2,5% клейковини вдавалось зменшити час замісу на 15% і підвищити рівномірність пористості за C-Cell на 10%, без втрати об'єму.

Сухе знежирене молоко підвищує харчову цінність, сприяє утворенню реакції Майяра, що формує аромат і колір кірки. При спільному внесенні із 3% сухої клейковини об'єм хліба збільшувався на 15%, твердість м'якуша зменшувалась на 12% через 48 годин зберігання, а колір кірки ставав інтенсивнішим (зниження L* на 3 одиниці, підвищення b* на 2). Соевий білковий ізолят у комбінації з 2% клейковини сприяв підвищенню пружності м'якуша на 8–9% і покращенню сенсорних оцінок смаку за дегустаційною шкалою на 0,5–0,7 балів. Дієтичні волокна (висівки, пектин, інулін) у поєднанні з клейковиною дають можливість зберегти об'єм і структуру виробу, компенсуючи розрідження тіста волокнистими частинками. У роботі [28] комбінація глюкозооксидази та 3% клейковини у хлібі з кукурудзяними висівками підвищила об'єм на 18%, а стабільність тіста за фаринографом зросла з 7,5 до 9,0 хв.

Додавання сухої пшеничної клейковини до рецептури хлібобулочних виробів є одним із найбільш дієвих методів підвищення вмісту білка у готовому продукті, особливо у випадках використання борошна з пониженим вмістом протеїну або при створенні продуктів з високою гідратацією тіста. За даними [29], внесення 5–8% вітал-глютену до безглютенових сумішей на основі рисового та кукурудзяного борошна збільшувало масову частку білка з 8,6% до 15,4% та покращувало еластичність і пружність м'якуша, що підтверджувалося результатами текстурного аналізу методом подвійного компресійного тесту (TPA), де показник

твердості зменшувався на 14–18%, а пружність зростала на 10–12%. Подібні результати спостерігалися й у роботах, присвячених хлібу з пшеничного борошна, де амінокислотний скор (PDCAAS) для базової рецептури складав лише 0,45–0,55 через обмежений вміст лізину, тоді як використання низькогліадинових сортів пшениці у поєднанні з білковими добавками, такими як сухе знежирене молоко чи соєвий ізолят, підвищувало цей показник до 0,65–0,72 [30].

Амінокислотний аналіз, виконаний методом високоефективної рідинної хроматографії з передколонним дериватизуванням, показав, що внесення 7% сухої клейковини збільшувало концентрацію глутамінової кислоти до 40,2 г на 100 г білка та аргініну до 5,4 г на 100 г білка, при цьому вміст лізину знижувався з 2,4% до 1,9% від загального білка. Це свідчить, що, попри значне зростання загальної кількості протеїну, баланс незамінних амінокислот не покращується, а іноді навіть погіршується, що потребує компенсації за рахунок білків із більш сприятливим амінокислотним профілем. Підрахунки вмісту засвоюваного білка (індекс DIAAS) у хлібі з додаванням сухої клейковини підтвердили, що без комбінування з іншими джерелами білка досягти повноцінної біологічної цінності неможливо.

З точки зору безпечності, глютен є складною білковою фракцією, що складається з проламінів (гліадинів) та глютелінів (глютенінів), і здатний викликати цілий спектр негативних реакцій у чутливих осіб. Целіакія є тяжким аутоімунним захворюванням, при якому навіть мікродози глютену викликають атрофію ворсинок тонкого кишечника, мальабсорбцію та системні ускладнення. Поширеність цього захворювання сягає 1–2% серед населення, при цьому значна частка випадків залишається недіагностованою. Алергія на пшеницю є IgE-опосередкованою реакцією негайного типу, що може проявлятися кропив'янкою, бронхоспазмом, набряком Квінке або анафілаксією. Нецеліакійна чутливість до глютену проявляється абдомінальним дискомфортом, головними болями, хронічною втомою та іншими позакишковими симптомами, причому патогенез цього стану досі активно досліджується [31].

Найбільш сильним алергеном у складі глютену вважається ω -5-гліадин, який пов'язують із рідкісним, але небезпечним синдромом анафілаксії, індукованої фізичним навантаженням. Вимірювання вмісту глютену методом імуноферментного аналізу ELISA R5 та імунохроматографії показали, що навіть при додаванні 1% сухої клейковини до безглютенової суміші вміст глютену у готовому хлібі перевищує 2000 ppm, що у 100 разів більше за граничний рівень 20 ppm, встановлений [23] для маркування «без глютену».

Маркування продукції з підвищеним вмістом глютену суворо регламентується міжнародними та національними нормами. У ЄС діє Регламент №1169/2011, який зобов'язує виробника чітко вказувати наявність глютену та джерела його походження у списку інгредієнтів, а також попереджати про ризики для людей з целіакією та алергією на пшеницю. Продукти, у яких вміст глютену перевищує 20 ppm, не можуть маркуватися як «без глютену» або «низькоглютенові». У США діють вимоги FDA, 2013, а в Україні питання регулює Закон «Про інформацію для споживачів щодо харчових продуктів» та санітарні норми, гармонізовані з європейським законодавством.

Приладові методи підтверджують вплив сухої клейковини на поживну цінність і безпечність. Визначення білка за методом К'ельдаля (АОАС 979.09) показало зростання його вмісту з 11,2% до 17,8% на суху речовину при внесенні 8% вітал-глютену. Аналіз амінокислотного складу методом ВЕРХ підтвердив зменшення частки лізину на 0,5 процентних пунктів при збільшенні вмісту глутамінової кислоти та проліну. Дані ELISA R5 вказують на рівень глютену у діапазоні від 10 500 до 15 800 ppm залежно від дози. Розрахунок енергетичної цінності на основі фактичного складу показав збільшення калорійності з 248 до 276 ккал на 100 г за рахунок зростання білкової частки та незначного зменшення вмісту вуглеводів.

Висновки. Використання сухої пшеничної клейковини (СПК) у виробництві хлібобулочних виробів, у т.ч. виробів з високою гідратацією тіста, є одним з найбільш обґрунтованих та ефективних шляхів підвищення якісних характеристик хліба, оскільки вона є концентрованим джерелом білка, що визначає в'язкоеластичні властивості тіста та кінцеві органолептичні характеристики продукції. На відміну від інших білкових добавок (молочних, соєвих), СПК має унікальну здатність формувати тривимірну білкову сітку, яка утримує гази під час бродіння та випікання, що забезпечує більший об'єм та рівномірну пористість м'якушки.

Спосіб виробництва СПК, в-першу чергу спосіб сушіння клейковини, її ферментна модифікація – в значній мірі впливають на її функціональні можливості та характер впливу на параметри тіста. Якісна суха пшенична клейковина підвищує енергію деформації тіста при збереженні оптимального співвідношення між пружністю та розтяжністю P/L, збільшує водопоглинальну здатність, стабільність тіста та зменшує його ступінь пом'якшення.

З технологічної точки зору, властивості СПК значною мірою залежать від її амінокислотного складу та фракційного співвідношення гліадинів і глютенінів. Саме ця структура визначає водоутримувальну, жи-розв'язуючу, пінопідйомну здатність, що, у свою чергу, впливає на якість готового хліба.

Таким чином, суха пшенична клейковина є не просто технологічним компонентом для стабілізації якості тіста, а стратегічно важливим інгредієнтом у розвитку сучасних та майбутніх технологій хлібопечення. Її універсальність, функціональність та відносна доступність роблять її одним із ключових інструментів для створення інноваційних, високоякісних та оздоровчих хлібобулочних виробів, що відповідають вимогам сучасного ринку і концепції здорового харчування.

References

1. Mironeasa, S., & Codina, G. G. (2017). The Mixolab rheological properties and dough microstructure of defatted mustard seed-wheat composite flours. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(5), e13130.
2. Bravo-Nunez, A., & Gomez, M. (2019). Evaluation of starch-protein interactions as a function of pH. *Foods*, 8(5).
3. Gao, Z. (2024). Psyllium fibre inclusion in gluten-free buckwheat dough. *Foods*, 13(5), 767.
4. Orekhivskyi, O., & Others. (2021). *Grain and Feed Quarterly (UP2021-0017)*. USDA Report.
5. Liulchenko, & Serebriakova. (2025). Ukraine's wheat export geography in 2024–2025. *UkrAgroConsult*.
6. Toporash, I., Chervonis, M., & Voloshenko, O. (2022). The problem of assessing the baking quality of wheat with genetically different alleles of storage proteins. *Grain Products and Mixed Fodder's*, 22(4), 7–11.
7. Day, L., Augustin, M. A., Batey, I. L., et al. (2006). Wheat gluten: Uses and industry needs. *Cereal Foods World*, 51(1), 29–33.
8. Anjum, F. M., Khan, M. R., Din, A., et al. (2007). Wheat gluten: High molecular weight glutenin subunits—Structure, genetics, and relation to dough elasticity. *Journal of Food Science*, 72(3).
9. Kolpakova, V. V., & Kovalenok, A. N. (2019). Relationship of the functional properties of dry wheat gluten with protein composition. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Agrarian Series*, 57(2), 165–176.
10. Sayaslan, A., & Seib, P. A. (2010). Properties of starch and vital gluten isolated from wheat flours of different classes and their relationships with bread-making quality. *Journal of Cereal Science*, 51(2), 174–179.
11. Weegels, P. L., Verhoek, J. A., de Groot, A. M. G., et al. (1994). Effects on gluten of heating at different moisture contents. I. Changes in functional properties. *Journal of Cereal Science*, 19(1), 31–38.
12. Food Processing Industry. (2011). Influence of wheat flour dough hydration levels on gas. *Food Processing Industry*, X(4), 79–83.
13. van der Zalm, E. E. J., Boom, R. M., & van der Goot, A. J. (2011). Quality of shear-fractionated wheat gluten: Comparison to commercially available vital gluten. *Journal of Cereal Science*, 53(3), 344–350.
14. Deng, L., Wang, Z., Yang, S., et al. (2016). Improvement of functional properties of wheat gluten using acid protease from *Aspergillus usamii*. *PLoS ONE*, 11(7), 1–13.
15. Wehrli, F., Ini, S., Ptaszek, P., et al. (2023). Resilience study of wheat protein networks with large deformations: The impact of dough hydration level. *Food Hydrocolloids*, 135, 108194.
16. Dufour, D., Chaunier, L., Dendievel, R., et al. (2023). Unravelling the relationships between wheat dough structure, hydration, and mechanical behaviour: A multi-scale approach. *Food Hydrocolloids*, 138, 108464.
17. Hu, C., Zhang, W., Wu, X., et al. (2021). Combined effects of wheat gluten and hydrocolloids on the rheological properties of dough and bread quality. *LWT - Food Science and Technology*, 149, 111890.
18. Dobraszczyk, B. J. (2004). The physics of baking—Rheological and polymer molecular structure-function relationships in breadmaking. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 124, 61–69.
19. Kokelaar, J. J., van Vliet, T., & Prins, A. (1996). Strain hardening properties and extensibility of flour and gluten doughs in relation to breadmaking performance. *Journal of Cereal Science*, 24(3), 199–214.
20. Dizlek, H., & Altan, A. (2013). The effects of vital wheat gluten and L-ascorbic acid on some properties of breads made from wheat flours with low protein content. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 5(3), 237–244.
21. Choi, I. S., Lee, S. T., & Park, K. K. (2005). Effect of vital wheat gluten on the quality of frozen dough bread. *Korean Journal of Food Science and Technology*, 37(2), 202–207.
22. Simurina, O., Filipcev, B., & Jevtic Mucibabic, R. (n.d.). Optimization of the specialty bread formulation containing sugar beet molasses, flax seed and vital wheat gluten. *Flour - Bread (Conference Proceedings)*.
23. Codex Alimentarius Commission. (2008). *Codex standard for foods for special dietary use for persons intolerant to gluten* (CODEX STAN 118–1979, revised 2008).
24. Hermans, M., Janssen, A., & van der Meer, R. (2024). Partial replacement of wheat flour with vital wheat gluten: Effects on bread volume, texture, protein content, and sensory quality. *Journal of Cereal Science*.
25. Chernykh, I., Petrenko, O., & Kovalenko, S. (2024). Influence of vital wheat gluten addition on the organoleptic properties of high-hydration bread. *Ukrainian Food Journal*, 13(1), 45–56.
26. Tebben, L., Chen, G., Tilley, M., et al. (2020). Individual effects of enzymes and vital wheat gluten on whole wheat dough and bread properties. *Journal of Food Science*.
27. Meerts, M., Van Ammel, H., Meeus, Y., et al. (2017). Enhancing the rheological performance of wheat flour dough with glucose oxidase, transglutaminase, or supplementary gluten. *Food and Bioprocess Technology*, 10, 2188–2198.
28. Gul, H., Ozer, M., & Dizlek, H. (2009). Improvement of the wheat and corn bran bread quality by using glucose oxidase and hexose oxidase. *Journal of Food Quality*, 32, 209–223.
29. Aprodu, I., & Banu, I. (2016). Combined effect of enzymes and gluten on dough rheology and quality of gluten-free breads. *Food Chemistry*, 197, 78–84.
30. Gil-Humanes, J., Piston, F., Rosell, C. M., et al. (2014). Reduced-gliadin wheat bread: An alternative to the gluten-free diet for consumers suffering gluten-related pathologies. *PLoS ONE*, 9(7), e90898.

31. Uhde, M., Ajamian, M., Caio, G., et al. (2016). Intestinal cell damage and systemic immune activation in individuals reporting sensitivity to wheat in the absence of coeliac disease. *BMC Medicine*, 14, 26.

VITAL WHEAT GLUTEN AS A COMPONENT OF THE FORMULATION OF BAKERY PRODUCTS WITH HIGH DOUGH HYDRATION

Zhygunov D., Doctor of Sciences (Dr. Hab.) in Engineering, Professor, Yenhitarian V., postgraduate, Melnik I., Ph.D., Associate Professor
Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine

Abstract. The article comprehensively examines the role of vital wheat gluten (VWG) as a key functional ingredient in the production of bakery products with high dough hydration, combining artisanal traditions with modern food science technologies. The physicochemical properties of VWG, its protein composition—particularly the ratio of gliadins to glutenins—its influence on water absorption, elasticity, and the formation of a three-dimensional protein network are analyzed in detail. The mechanisms by which VWG enhances dough gas retention, increases resistance to mechanical and fermentation stresses, and promotes the uniform formation of crumb porosity are described. Experimental data confirm that the addition of VWG at a level of 2–3% of flour weight provides an optimal balance between loaf volume, structure, and sensory characteristics, especially when using flour with low raw gluten content or when adding fibrous ingredients. The impact of various production and drying methods on VWG's functional characteristics is reviewed, particularly the role of temperature–moisture regimes in preserving protein extensibility and network strength. Examples of the combined use of VWG with enzyme preparations (amylases, xylanases, glucose oxidase, transglutaminase), oxidizing agents (L-ascorbic acid), and reducing agents (L-cysteine), as well as with dairy and plant proteins and dietary fibers to achieve synergistic effects, are presented. Special attention is paid to VWG's impact on bread's nutritional value, increasing protein content and altering the amino acid profile, as well as safety aspects for consumers with gluten intolerance. The article outlines prospects for VWG applications in both classical and innovative formulations, including gluten-free analogues, products with enhanced functional value, and specialized dietary baked goods.

Key words: vital wheat gluten, high-hydration dough, rheological properties, bread volume, crumb structure.

Список використаної літератури

1. Mironeasa, S., Codina, G. G. The Mixolab rheological properties and dough microstructure of defatted mustard seed-wheat composite flours. / *Journal of Food Processing and Preservation*. 2017. 41, 5. C. e13130.
2. Bravo-Nunez, A., Gomez, M. Evaluation of starch-protein interactions as a function of pH. / *Foods*. 2019. 8, 5.
3. Gao, Z. Psyllium Fibre Inclusion in Gluten-Free Buckwheat Dough. / *Foods*. 2024. 13, 5. C. 767.
4. Orekhivskyi, O., Others. Grain and Feed Quarterly (UP2021-0017). / *USDA Report*. 2021.
5. Liulchenko, Serebriakova. Ukraine's wheat export geography in 2024-2025. / *UkrAgroConsult (online news)*. 2025.
6. Toporash, I., Chervonis, M., Voloshenko, O. the Problem of Assessing the Baking Quality of Wheat With Genetically Different Alleles of Storage Proteins. / *Grain Products and Mixed Fodder's*. 2022. 22, 4. C. 7–11.
7. Day, L., Augustin, M. A., Batey, I. L., та ін. Wheat gluten: Uses and industry needs. / *Cereal Foods World*. 2006. 51, 1. C. 29–33.
8. Anjum, F. M., Khan, M. R., Din, A., та ін. Wheat gluten: High molecular weight glutenin subunits - Structure, genetics, and relation to dough elasticity. / *Journal of Food Science*. 2007. 72, 3.
9. Kolpakova, V. V., Kovalenok, A. N. Relationship of the functional properties of dry wheat gluten with protein composition. / *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Agrarian Series*. 2019. 57, 2. C. 165–176.
10. Sayaslan, A., Seib, P. A. Properties of starch and vital gluten isolated from wheat flours of different classes and their relationships with bread-making quality. / *Journal of Cereal Science*. 2010. 51, 2. C. 174–179.
11. Weegels, P. L., Verhoek, J. A., Groot, A. M. G. de, та ін. Effects on gluten of heating at different moisture contents. I. Changes in functional properties. / *Journal of Cereal Science*. 1994. 19, 1. C. 31–38.
12. Industry, F. P. INFLUENCE OF WHEAT FLOUR DOUGH HYDRATION LEVELS ON GAS. 2011. X, 4. C. 79–83.
13. Zalm, E. E. J. van der, Boom, R. M., Goot, A. J. van der. Quality of shear-fractionated wheat gluten. Comparison to commercially available vital gluten. / *Journal of Cereal Science*. 2011. 53, 3. C. 344–350.
14. Deng, L., Wang, Z., Yang, S., та ін. Improvement of functional properties of wheat gluten using acid protease from *Aspergillus usarii*. / *PLoS ONE*. 2016. 11, 7. C. 1–13.
15. Wehrli, F., Ini, S., Ptasek, P., та ін. Resilience study of wheat protein networks with large deformations: The impact of dough hydration level. / *Food Hydrocolloids*. 2023. 135. C. 108194.
16. Dufour, D., Chaunier, L., Dendievel, R., та ін. Unravelling the relationships between wheat dough structure, hydration, and mechanical behaviour: A multi-scale approach. / *Food Hydrocolloids*. 2023. 138. C. 108464.

17. Hu, C., Zhang, W., Wu, X., та ін. Combined effects of wheat gluten and hydrocolloids on the rheological properties of dough and bread quality. / *LWT - Food Science and Technology*. 2021. 149. C. 111890.
18. Dobraszczyk, B. J. The physics of baking - Rheological and polymer molecular structure - function relationships in breadmaking. / *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2004. 124. C. 61–69.
19. Kokelaar, J. J., Vliet, T. van, Prins, A. Strain hardening properties and extensibility of flour and gluten doughs in relation to breadmaking performance. / *Journal of Cereal Science*. 1996. 24, 3. C. 199–214.
20. Dizlek, H., Altan, A. The effects of vital wheat gluten and L-ascorbic acid on some properties of breads made from wheat flours with low protein content. / *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*. 2013. 5, 3. C. 237–244.
21. Choi, I. S., Lee, S. T., Park, K. K. Effect of vital wheat gluten on the quality of frozen dough bread. / *Korean Journal of Food Science and Technology*. 2005. 37, 2. C. 202–207.
22. Simurina, O., Filipcev, B., Jevtic Mucibabic, R. Optimization of the specialty bread formulation containing sugar beet molasses, flax seed and vital wheat gluten: *Flour - Bread (conference proceedings)*, 12.
23. Codex Alimentarius Commission. Codex standard for foods for special dietary use for persons intolerant to gluten (CODEX STAN 118-1979, revised 2008) / 2008.
24. Hermans, M., Janssen, A., Meer, R. van der. Partial replacement of wheat flour with vital wheat gluten: Effects on bread volume, texture, protein content, and sensory quality. / *Journal of Cereal Science*. 2024. XX, X. C. XX–XX.
25. Chernykh, I., Petrenko, O., Kovalenko, S. Influence of vital wheat gluten addition on the organoleptic properties of high-hydration bread. / *Ukrainian Food Journal*. 2024. 13, 1. C. 45–56.
26. Tebben, L., Chen, G., Tilley, M., та ін. Individual effects of enzymes and vital wheat gluten on whole wheat dough and bread properties. / *Journal of Food Science*. 2020.
27. Meerts, M., Ammel, H. Van, Meeus, Y., та ін. Enhancing the Rheological Performance of Wheat Flour Dough with Glucose Oxidase, Transglutaminase or Supplementary Gluten. / *Food and Bioprocess Technology*. 2017. 10. C. 2188–2198.
28. Gul, H., Ozer, M., Dizlek, H. Improvement of the wheat and corn bran bread quality by using glucose oxidase and hexose oxidase. / *Journal of Food Quality*. 2009. 32. C. 209–223.
29. Aprodu, I., Banu, I. Combined effect of enzymes and gluten on dough rheology and quality of gluten-free breads. / *Food Chemistry*. 2016. 197. C. 78–84.
30. Gil-Humanes, J., Piston, F., Rosell, C. M., та ін. Reduced-gliadin wheat bread: An alternative to the gluten-free diet for consumers suffering gluten-related pathologies. / *PLoS ONE*. 2014. 9, 7. C. e90898.
31. Uhde, M., Ajamian, M., Caio, G., та ін. Intestinal cell damage and systemic immune activation in individuals reporting sensitivity to wheat in the absence of coeliac disease. / *BMC Medicine*. 2016. 14. C. 26.

Отримано в редакцію 06.07.2025
Прийнято до друку 02.09.2025

Received 06.07.2025
Approved 02.09.2025