

Научная статья

УДК 664.663

DOI: 10.17586/2310-1164-2025-18-3-3-11

Влияние овсяного и грибного бета-глюканов на показатели теста из безглютеновой мучной смеси на основе муки тефф

Г.А. Йимер^{1*}, Н.В. Баракова^{1,2}, М.Н.Г. Ибрахим³, А.Л. Майтаков⁴, А.К. Дозорцева², Е.И. Саевич²¹Университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург, *getnetddu7@gmail.com²Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Россия, Санкт-Петербург³Центр пищевых и ферментативных технологий (ТФТАК), Эстония, Таллинн⁴Кемеровский государственный университет, Россия, Кемерово

Аннотация. Исследовали влияние овсяного и грибного бета-глюканов на реологические показатели водно-мучной суспензии, приготовленной из безглютеновой мучной смеси на основе муки тефф (БМСТ), и на показатели брожения теста, приготовленного из БМСТ без и с добавлением овсяного и грибного бета-глюканов. Безглютеновая мучная смесь состояла из муки тефф (60%), нутовой муки (20%) и картофельного крахмала (20%). Водно-мучную суспензию готовили из БМСТ и воды в соотношении 1:1, бета-глюканы вносили в количестве 0,2 г на 100 г БМСТ. Для анализа ее вязкости использовали ротационный вискозиметр, измерение количества выделяющегося диоксида углерода в процессе брожения теста определяли на реоферментометре при температуре 28°C. Для анализа влияния овсяных и грибных бета-глюканов на газообразующие свойства БМСТ приготовили три образца теста. Контрольным являлся образец, приготовленный из БМСТ без добавления бета-глюканов. Установлено, что вязкость водно-мучной смеси БМСТ с грибным бета-глюканом выше, чем с овсяным. Показано, что максимальный подъем теста при ферментации у образца, приготовленного из БМСТ с добавлением грибного бета-глюкана (10 мм), наступил через 40 мин от начала брожения, с добавлением овсяного бета-глюкана (9,9 мм) – через 60 мин от начала брожения, теста из БМСТ без бета-глюканов (8,4 мм) – через 75 мин. Максимальное количество выделившегося и удержанного тестом диоксида углерода зафиксировано при ферментации теста, приготовленного из БМСТ с добавлением овсяного бета-глюкана. Анализ полученных результатов предполагает, что хлеб, выпеченный из теста, приготовленного из БМСТ с добавлением овсяного бета-глюкана будет обладать лучшими показателями по объему готового изделия и пористости мякиша.

Ключевые слова: хлебобулочные изделия; безглютеновая мучная смесь; мука тефф; овсяный β-глюкан; грибной β-глюкан; реология; газообразующая и газодерживающая способность

Original article

Effect of oat and mushroom beta-glucans on the properties of dough prepared from a gluten-free flour mixture based on teff flour

Getnet A. Yimer^{1*}, Nadezhda V. Barakova^{1,2}, Monika N.G. Ibrahim³, Anatoly L. Maytakov⁴,
Alexandra K. Dozortseva², Evgenii I. Saevich²¹ITMO University, St. Petersburg, Russia, *getnetddu7@gmail.com²Saint-Petersburg State Institute of Technology, St. Petersburg, Russia³Center of Food and Fermentation Technologies (TFTAK), Tallinn, Estonia⁴Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

Abstract. The article concerns the effect of oat and mushroom beta-glucans on the rheological properties of a water-flour suspension prepared from a gluten-free flour mixture based on teff flour and on the fermentation properties of dough prepared from a gluten-free flour mixture based on teff with and without the addition of oat and mushroom beta-glucans. The gluten-free flour mixture consisted of 60% teff flour, 20% chickpea flour, and 20% potato starch. The teff flour was obtained from the grain grown in Ethiopia, harvested in 2023. The chickpea flour was produced by LLC "Garnets", Russia, and the potato starch by LLC "Russian Food Company", Russia. The effect of oat and mushroom beta-glucans on the viscosity of the gluten-free flour mixture based on teff flour (GFM-T) was studied using a water-flour suspension in a 1:1 ratio. Beta-glucans were added at a concentration of 0.2 g per 100 g of flour mixture. Viscosity was measured using a rotational viscometer. The dynamic viscosity coefficient of the water-flour suspension was measured using two spindles – R2 and R3 with different rotation speeds (RPM). The dough from gluten-free flour was prepared according to the following recipe: 100 g БМСТ, 2 g dry baker's yeast (previously activated in a small amount of water), 1.9 g salt, 5 g vegetable oil, 60 cm³ water and 0.7 g oat or mushroom beta-glucan. The amount of carbon dioxide released during fermentation was measured with a rheofermentometer at 28°C. It was found that the viscosity of the GFM-T water-flour mixture with mushroom beta-glucan was higher than that with oat beta-glucan. The study of the fermentation process

of dough prepared from GFM-T with and without the addition of oat and mushroom beta-glucan showed that the maximum dough rise with mushroom beta-glucan (10 mm) occurred 40 minutes after the start of fermentation, with oat beta-glucan (9.9 mm) after 60 minutes, and without beta-glucans (8.4 mm) after 75 minutes. The highest amount of carbon dioxide released and retained in the dough was observed in the sample with oat beta-glucan. The obtained results allow us to assume that bread baked from dough prepared from GFM-T with the addition of oat beta-glucan will have higher indicators for the volume of the finished product and crumb porosity.

Keywords: bakery products; gluten-free flour mix based; teff flour; oat beta-glucan; mushroom beta-glucan; rheology; gas-forming and gas-retaining capacity

Введение

Разработка рецептур безглютеновых хлебобулочных изделий, в том числе на основе муки тефф, требует обеспечения характеристик готового продукта, соответствующих потребительским ожиданиям по объему, текстуре и вкусу. Отсутствие в муке тефф глютена [1] снижает газодерживающую способность теста, что негативно сказывается на его реологических свойствах и подъемном потенциале при выпечке [2].

Глютен играет ключевую роль в формировании эластичной структуры теста, способной удерживать углекислый газ, образующийся в процессе брожения. Это создает объем теста и формирует пористую структуру мякиша [3]. В безглютеновых матрицах, таких как тесто из муки тефф, этих свойств не хватает, что приводит к низкому объему готового изделия. Возникает потребность в создании рецептур безглютеновых мучных смесей с целью имитации структурообразующих свойств [4].

К структурообразующим компонентам муки, помимо глютена, относится крахмал (в пшеничной муке) и некрахмалистые полисахариды (в ржаной муке) [5]. Используя крахмал в пищевых системах необходимо учитывать, что при взаимодействии с водой и термической обработке происходит набухание и растворение крахмала, и эти его свойства зависят от ботанического происхождения и важны для структуры теста. Например, гранулы картофельного крахмала способны увеличиться в размерах без разрыва крахмальной гранулы до 100 раз, что обусловлено наличием в нем большого количества фосфатных групп [6]. Благодаря высокому содержанию амилопектина картофельный крахмал при термической обработке образует вязкую гелеобразную структуру, способную удерживать газ [7].

Для обеспечения стабильности теста и способности удерживать газ при разработке рецептуры безглютеновой мучной смеси предлагается использовать муку нута [8]. Важно отметить, что мука нута может также содержать ферменты, например амилазы, способные гидролизовать крахмал до декстринов и простых сахаров, что способствует улучшению ферментации и увеличению газообразования. Такая ферментативная активность может быть особенно полезной в безглютеновых системах, где важно стимулировать активность дрожжей для подъема теста [9]. Мука нута повышает общее содержание белка в смеси и улучшает структурные свойства теста, что способствует повышению его стабильности и способности к удержанию газа [10].

Выраженное улучшение наблюдается при добавлении β -глюканов, выделенных из овса и грибов. Эти водорастворимые пищевые волокна способны увеличивать вязкость, удерживать воду и частично имитировать структуру, аналогичную глютенной, тем самым улучшая газодержание и объем конечного изделия [11]. Были исследованы функционально-технологические свойства овсяных и грибных β -глюканов и их влияние на реологические и газообразующие свойства теста из муки тефф [12], произведены выпечки теста из муки тефф с добавлением β -глюканов, но нужного объема хлеба получено не было. В связи с этим целесообразно проанализировать реологические и газообразующие свойства БМСТ с добавлением картофельного крахмала и муки нута с включением овсяного и грибного β -глюканов.

Цель данного исследования – изучить влияние грибного и овсяного β -глюканов на реологические показатели и процесс ферментации теста, приготовленного из безглютеновой мучной смеси на основе муки тефф.

Объекты и методы исследований

В исследованиях использовали муку тефф (Эфиопия, урожай 2023 г.) – углеводы 55,7 \pm 0,4%; нутовую муку (ООО Гарнец, Россия) – белки 20%, жиры 4%, углеводы 48%; картофельный крахмал Магета (ООО «Русская Бакалейная Компания», Россия) – углеводы 78%; овсяный бета-глюкан PromOat (Lantmannen Oats, Швеция) – массовая доля влаги 7,0 \pm 0,2%, содержание овсяного β -глюкана

32,0 ±0,2% в пересчете на сухое вещество; β-глюкан, извлеченный из гриба *Pleurotus ostreatus* (ООО «НПФ БИОС», Россия) – содержание грибного β-глюкана 31,2 ±0,1% в пересчете на сухое вещество, содержание водорастворимого белка 19 ±2%, углеводов 76 ±3%.

На основе муки тефф готовили безглютеновую мучную смесь с разным соотношением муки тефф, картофельного крахмала и муки нута: по итогам серии контрольных выпечек (по объему полученного хлеба 91,35 см³ и результатам органолептического анализа – 4,5 из 5 баллов) лучшим выбран образец, содержащий муку тефф 60%, муку нута 20% и картофельный крахмал 20%.

Для определения реологических характеристик безглютеновой мучной смеси на основе муки тефф без и с добавлением 0,2 г овсяного и грибного бета-глюканов готовили водно-мучную суспензию из 100 г БМСТ и 100 см³ дистиллированной воды.

Коэффициент динамической вязкости водно-мучной смеси измеряли на ротационном вискозиметре Visco Basic Plus (Fungilab S.A., Испания) с двумя шпинделями – R2 и R3 – с разной скоростью вращения (RPM). Выбранные параметры и результаты отображались на ЖК-экране прибора. Шпиндели погружали в образцы водно-мучной смеси до отметки, указанной на шпинделе, после чего регистрировали значения вязкости.

Для анализа влияния овсяных и грибных β-глюканов на газообразующие свойства БМСТ подготовили три образца теста:

образец 1 – БМСТ с добавлением 0,2 г грибного β-глюкана;

образец 2 – БМСТ с добавлением 0,2 г овсяного β-глюкана;

образец 3 – БМСТ без добавления β-глюканов (контрольный образец).

Тесто готовили по следующей рецептуре: 100 г БМСТ, 2 г сухих пекарских дрожжей (предварительно активированных в небольшом количестве воды), 1,9 г соли, 5 г растительного масла, 60 см³ воды и 0,2 г овсяного или грибного β-глюкана.

Количество выделяющегося при брожении теста углекислого газа измеряли с помощью реоферментометра Rheofermentometer F3 (Chopin Technologies, Франция) при температуре 28°C. Выпекали тесто при температуре 180°C в течение 45 мин в конвекционной печи DiLa (Германия).

Для обработки результатов, полученных на реоферментометре, и построения графиков использовали библиотеку Matplotlib версии 3.10. Для статистического анализа применили критерий Стьюдента (4,3). Все расчеты и статистические выкладки выполнялись с помощью Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение

Результаты измерения вязкости водно-мучной суспензии из БМСТ с добавлением овсяного и грибного β-глюканов при различных режимах измерения представлены в таблице.

Таблица. Коэффициент динамической вязкости водно-мучной суспензии из БМСТ в образцах
Table. Dynamic viscosity coefficient of water-flour suspension from BMST in the samples

Скорость вращения шпинделя, об/мин	Коэффициент динамической вязкости, мПа·с					
	Шпиндель R-2			Шпиндель R-3		
	образец 3	образец 2	образец 1	образец 3	образец 2	образец 1
6	6705,3	6843,2	6890,6	8111,3	10749,5	12305,5
10	3667,2	3724,8	3621,3	6947,6	7106,5	7123
12	2910,2	3010,5	2429,5	5331,4	5984	6288
20	2069,5	1957,5	2019,8	2991,1	4262,5	4290
30	1335,9	1245,7	1413,5	2800	3050	2997,5
50	827,3	772,5	842,7	1554,7	1949,5	1975,5
60	696,9	569,6	628,6	1216,6	1618	1673,5
100	366,4	301,5	348,6	666,3	1025	828,5

Анализ данных демонстрирует, что добавление овсяного и грибного β-глюканов оказывает значимое влияние на реологические свойства водно-мучной суспензии БМСТ, при этом эффект зависит от типа добавки, скорости сдвига (вращения шпинделя) и используемого измерительного оборудования (шпинделя R-2 или R-3). Для всех образцов характерно псевдопластичное поведение: вязкость снижается с ростом скорости вращения. Это подтверждает, что суспензия разжижается при увеличении

механического воздействия. Овсяный β -глюкан проявляет себя как стабильный загуститель, особенно в условиях высоких скоростей (шпиндель R-3), увеличивая вязкость на 25–54% даже при 100 об/мин. Это делает его перспективным для применения в процессах, требующих сохранения структуры при интенсивной обработке. Для технологических процессов с низкими скоростями (хранение, транспортировка) предпочтение следует отдавать грибному β -глюкану, обеспечивающему максимальное загущение. В условиях высоких скоростей (механическая обработка, перемешивание) овсяный β -глюкан сохраняет стабильность, предотвращая излишнее разжижение суспензии. Грибной β -глюкан максимально эффективен при низких скоростях (шпиндель R-3: +51.7% при 6 об/мин), но его влияние менее стабильно при высоких нагрузках, что может быть связано с особенностями его молекулярной структуры. Однако при увеличении скорости сдвига (10–50 об/мин) эта структура разрушается быстрее, чем у овсяного аналога из-за различий в молекулярной архитектуре и взаимодействии с компонентами смеси (мука нута, картофельный крахмал) [13, 14]. Овсяный бета-глюкан благодаря линейным цепям (β -(1,3/1,4)-глюканы) образует более стабильные псевдопластичные системы, сохраняющие вязкость в широком диапазоне скоростей [15].

Повышение вязкости водно-мучной суспензии, приготовленной из БМСТ с добавлением овсяного и грибного β -глюканов, отражается на процессе приготовления теста, что видно на графике, представленном на рисунке 1.

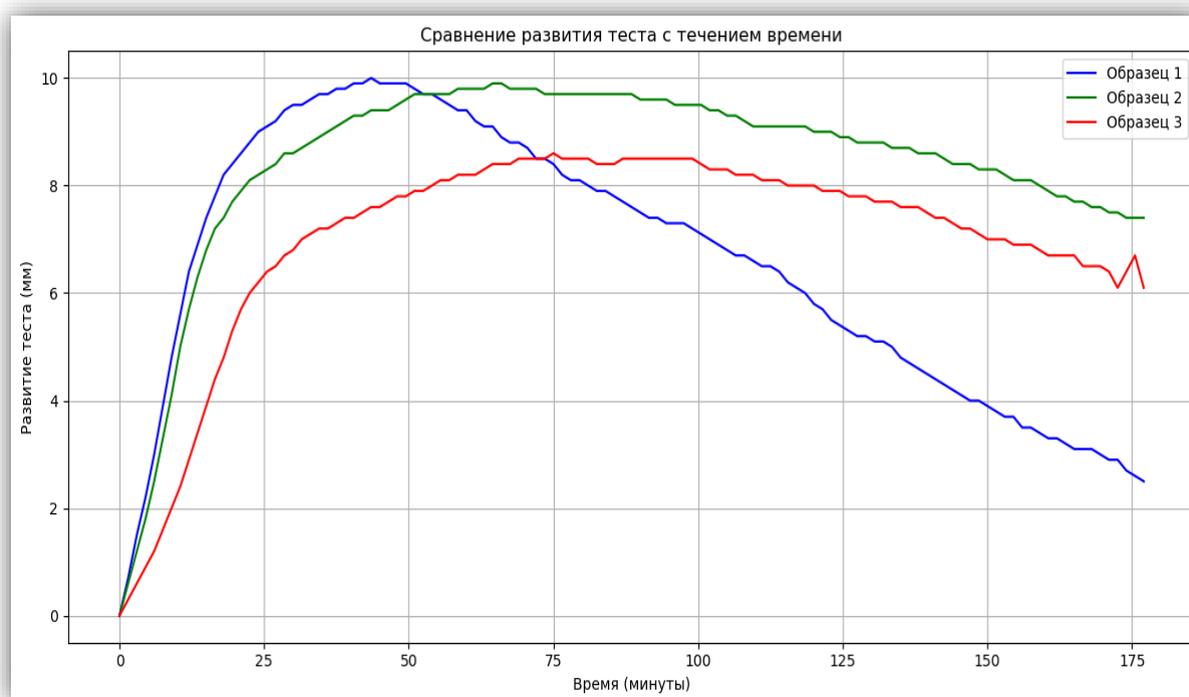


Рисунок 1 – Развитие теста из БМСТ без и с добавлением овсяного и грибного β -глюканов
Figure 1. Development of BMST dough depending on the addition of oat and mushroom β -glucans

Анализ результатов исследования показал, что тип β -глюкана существенно влияет на реологические и технологические свойства теста. Грибной β -глюкан ускоряет брожение (пик подъема теста — 10 мм за 40 мин), но вызывает быстрое разрушение структуры (спад через 10 мин). Подходит для продуктов с коротким циклом брожения, где важна скорость, но не требуется долгая стабильность. Овсяный β -глюкан замедляет брожение (максимальный подъем — 9,9 мм к 60 мин), сохраняя стабильность теста благодаря высокой вязкости [16]. Оптимален для изделий с пролонгированной ферментацией и плотной текстурой (например, бездрожжевой хлеб). Контроль без добавок демонстрирует меньший подъем (8,4 мм) и более поздний пик (75 мин), что подтверждает роль β -глюканов в модификации процессов брожения. Таким образом, для обеспечения показателей готового хлебобулочного изделия из БМСТ желательно применять овсяный β -глюкан.

Важным показателем готового хлеба является структура его мякиша. Для получения хлеба с хорошо

разрыхленным мякишем важно количество выделяемого во время брожения диоксида углерода. Динамика его выделения в процессе брожения всех образцов представлена на рисунке 2.

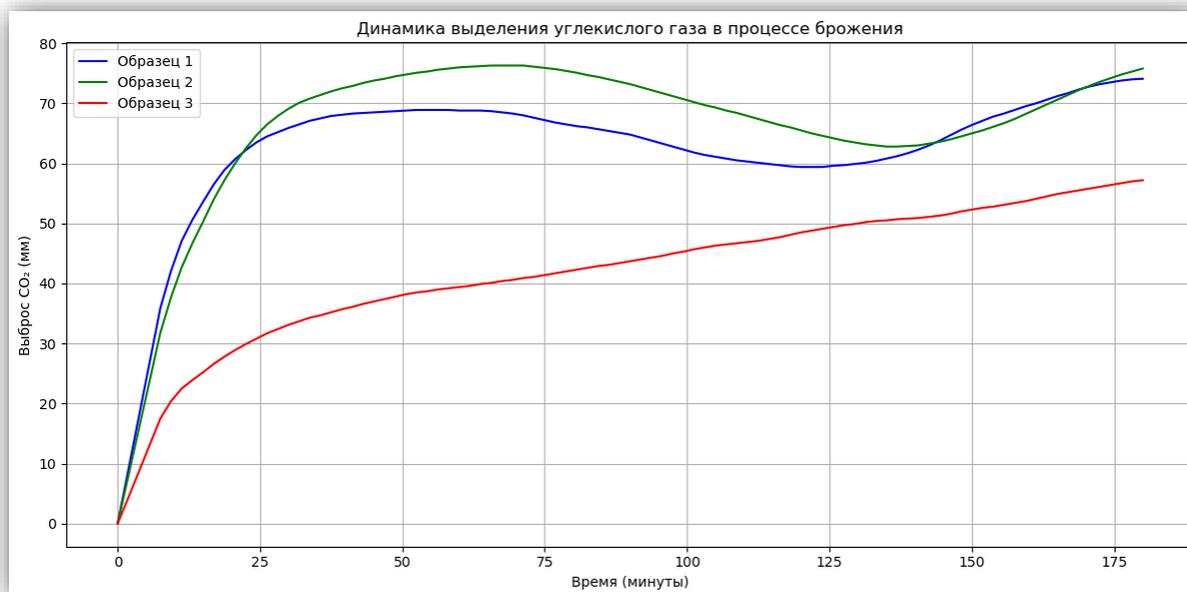


Рисунок 2 – Динамика выделения CO_2 при ферментации всех образцов теста из БМСТ
Figure 2. Dynamics of CO_2 emission during fermentation of all samples of BMST dough

Наибольшее количество диоксида углерода в процессе ферментации выделяется в образце 2 (75 мм на 65 мин от начала брожения). В образце 1 максимальное количество выделившегося диоксида углерода составляет 69 мм на 50 мин от начала брожения, что на 8% меньше, чем в образце 2. Высокие показатели CO_2 в процессе ферментации контрольного образца соответствуют 58 мм на 175 мин от начала брожения, что на 23 и 16% меньше, чем в образце 2 и 1 соответственно.

Количество выделяемого диоксида углерода в процессе брожения теста характеризует амилолитическую активность мучных смесей, из которых готовится тесто. Внесение в БМСТ овсяного β -глюкана усиливает амилолитическую активность больше, чем грибного. Но необходимо отметить, что на 125-й мин от начала созревания теста в обоих образцах с добавлением β -глюканов наблюдается временное снижение количества выделяемого диоксида углерода, что обусловлено рядом факторов: в ходе ферментации происходит накопление органических кислот (в частности, молочной и уксусной), что может приводить к уменьшению pH среды и временному снижению способности β -глюканов взаимодействовать с ферментами [17], либо наступает частичная инактивация ферментов. Кроме того, β -глюканы обладают гидрофильными свойствами и способны связывать воду. На 125-й мин происходит перераспределение влаги в тесте, что ограничивает доступ ферментов к субстратам [18]. Дополнительно на этом этапе могут активироваться такие ферменты, как протеазы, или возможен автолиз дрожжевых клеток, что временно нарушает биохимическое равновесие в системе [19]. Однако после 125-й мин ферментативная активность может быть восстановлена. Это связано с дальнейшим гидролизом крахмала, осуществляемым амилолитическими ферментами (например, β -амилазой, которая активна как раз при низкой pH), что приводит к образованию мальтозы – ключевого субстрата для дрожжевой ферментации, усиливающего активность ферментов [20]. Буферные свойства компонентов теста, включая белки и минеральные вещества, способствуют стабилизации pH, создавая благоприятную среду для функционирования ферментов [21]. Кроме того следует учитывать способность ферментов адаптироваться к таким изменениям внешней среды, как колебания температуры и кислотности, что позволяет им сохранять активность в течение продолжительного времени [22].

Ключевым показателем в хлебопечении, напрямую влияющим на структуру, текстуру и качество мякиша, является способность теста удерживать диоксид углерода. Вырабатываемый дрожжами во время ферментации теста, CO_2 попадает в матрицу клейковины, образуя газовые ячейки, которые расширяются

во время расстойки и подъема в печи. Таким образом, удержание диоксида углерода выступает в качестве ключевого фактора, определяющего качество мякиша, влияя как на визуальную привлекательность (ячеистость), так и на сенсорные свойства (мягкость и жевательность). Удержание диоксида углерода во время ферментации теста из БМСТ без и с добавлением β -глюканов показаны на рисунке 3.

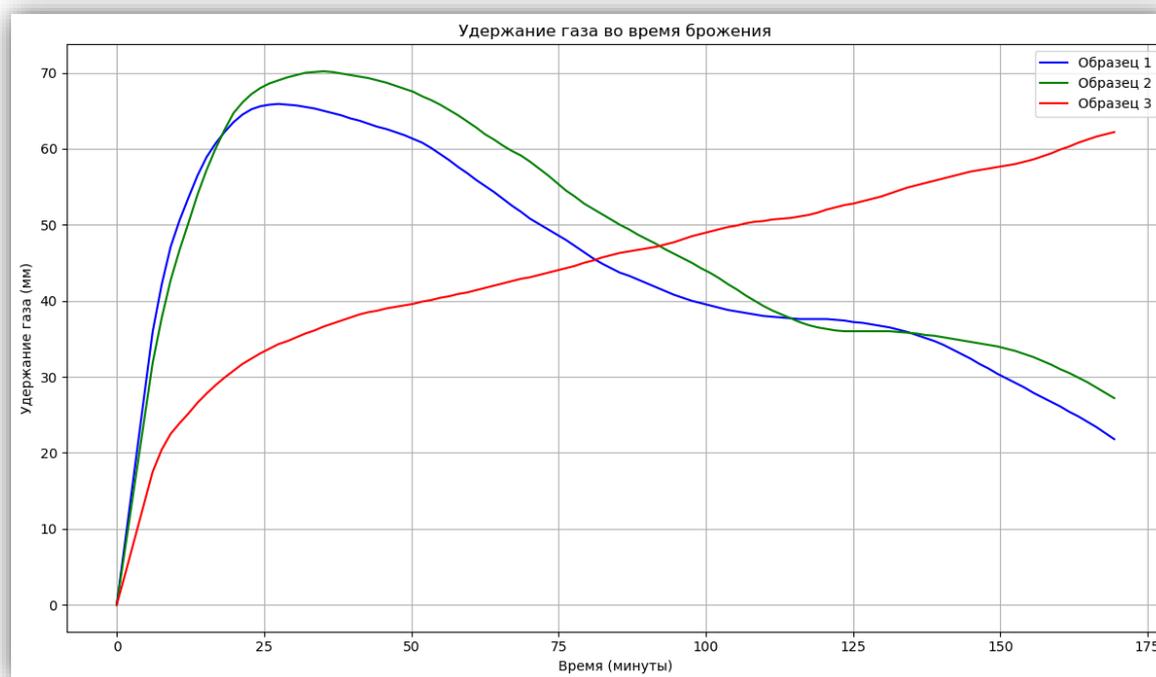


Рисунок 3 – Удержание CO_2 во время ферментации теста, приготовленного из БМСТ без и с добавлением β -глюканов

Figure 3. Carbon dioxide retention during fermentation of dough prepared from BMST with and without the addition of β -glucans

Анализ графика показывает, что образец 3 на протяжении всего времени ферментации теста лучше удерживает диоксид углерода, чем остальные образцы, при этом максимальное количество удержанного диоксида углерода (70 мм) в образце 2 на 8% выше, чем в образце 1. Скорость удержания CO_2 зависит от таких физико-химических свойств среды ферментации, как вязкость и структура среды. Бета-глюканы, будучи полисахаридами, увеличивают вязкость теста (таблица) или могут образовывать гелевые структуры, что затрудняет стабилизацию пузырьков CO_2 [23], приводя к их быстрому высвобождению из среды.

Эффективное удержание CO_2 обеспечивает равномерное распределение газовых ячеек, создавая открытый, аэрированный мякиш с желаемой пористостью. Плохое удержание, наоборот, приводит к схлопыванию или неравномерности пор, а следовательно, к плотной, грубой текстуре [24, 25].

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует значимое влияние овсяного и грибного β -глюканов на реологические и ферментативные свойства безглютеновой мучной смеси на основе тефф. Установлено, что грибной β -глюкан обеспечивает более высокую вязкость водно-мучной суспензии в сравнении с овсяным, что возможно связано с его структурными особенностями, способствующими усилению связывания воды. Однако, ключевые различия проявились в процессе брожения – добавление грибного β -глюкана ускорило достижение максимального подъема теста (40 мин против 75 мин в контроле), в то время как овсяный β -глюкан обеспечил наибольшее выделение и удержание диоксида углерода, что критически важно для формирования пористой структуры мякиша. Полученные данные свидетельствуют, что использование овсяного β -глюкана в составе БМСТ улучшает газодерживающую способность теста, потенциально повышая объем и пористость готового хлеба. Грибной β -глюкан, напротив, может быть предпочтителен для продуктов, требующих повышенной

плотности и стабильности структуры.

Результаты исследования подчеркивают важность целенаправленного выбора типа β -глюканов в зависимости от желаемых технологических и качественных характеристик безглютеновых изделий. Для подтверждения практической эффективности рекомендуется проведение дополнительных исследований, включающих выпечку хлеба и оценку его потребительских свойств.

Литература

1. Alaunyte I., Stojceska V., Plunkett A., Ainsworth P., Derbyshire E. Improving the quality of nutrient-rich Teff (*Eragrostis tef*) breads by combination of enzymes in straight dough and sourdough breadmaking. *Journal of Cereal Science*. 2012, V. 55, no. 1, pp. 22–30. DOI: 10.1016/j.jcs.2011.09.005
2. Inglett G., Chen D., Liu S. Physical properties of gluten free sugar cookies containing teff and functional oat products. *J Food Res*. 2016, V. 5, no. 3, pp. 72–84. DOI: 10.5539/jfr.v5n3p72
3. Sciarini L.S., Ribotta P.D., León A.E., Pérez G.T. Influence of gluten-free flours and their mixtures on batter properties and bread quality. *Food and Bioprocess Technology*. 2010, V. 3, no. 4, pp. 577–585. DOI: 10.1007/s11947-008-0098-2
4. Быкова И.Д., Снетков А.С. Функции глютена, варианты замены глютена и обработка безглютеновых ингредиентов // Инновации. Наука. Образование. 2020. № 23. С. 795–803
5. Барсукова Н.В., Решетников Д., Красильников В.Н. Пищевая инженерия: технологии безглютеновых мучных изделий // Процессы и аппараты пищевых производств. 2011. №2. С.51–60
6. Ягофаров Д.Ш., Канарский А.В., Сидоров Ю.Д., Поливанов М.А. Физико-химические свойства картофельного крахмала // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 12. С. 212–215.
7. Dueñas M., Sánchez-Acevedo T., Alcalde-Eon C., Escribano-Bailón M.T. Effects of different industrial processes on the phenolic composition of white and brown teff (*Eragrostis tef* (Zucc.) Trotter). *Food Chem*. 2021, V. 335, article 127331. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.127331
8. Vinod B.R., Asrey R., Rudra S.G., Urhe S.B., Mishra S. Chickpea as a promising ingredient substitute in gluten-free bread making: An overview of technological and nutritional benefits. *Food Chem Adv*. 2023, V. 3, article 100473. DOI: 10.1016/j.focha.2023.100473
9. Sáez G.D., Saavedra L., Hebert E.M., Zárate G. Identification and biotechnological characterization of lactic acid bacteria isolated from chickpea sourdough in northwestern Argentina. *LWT*. 2018, V.93, pp. 249–256. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.03.040
10. Parenti O., Assaf N., Alinovi M., Rinaldi M., Caligiani A., Chiavaro E. Physico-chemical characterisation of whole meal flours from three wild chickpea varieties and their technological performance in Gluten Free Bread. *Curr Res Food Sci*. 2024, V. 9, article 100816. DOI: 10.1016/j.crf.2024.100816
11. Cavallero A., Empilli S., Brighenti F., Stanca A.M. High (1→3,1→4)- β -glucan barley fractions in bread making and their effects on human glycemic response. *J Cereal Sci*. 2002, V. 36, Is. 1, pp. 59–66. DOI: 10.1006/j.crs.2002.0454
12. Йимер Г.А., Фрцун М., Баракова Н.В., Шамиян М.М., Майтаков А.Л., Басковцева А.С., Дозорцева А.К. Функционально-технологические свойства растительных и грибных бета-глюканов и их влияние на реологические и газообразующие свойства теста из муки тефф // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2024. № 4. С. 12–17. DOI: 10.17586/2310-1164-2024-17-4-12-17
13. Li Y., Zhu K., Guo X., Peng W., Zhou H. Interaction of barley β -d-glucan with wheat starch: Effect on the pasting and rheological properties. *Int J Biol Macromol*. 2016, V. 92, pp. 70–76. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2016.06.085
14. Sun T., Li J., Qin Y., Xie J., Xue B., Li X., Gan J., Bian X., Shao Z. Rheological and functional properties of oat β -glucan with different molecular weight. *J Mol Struct*. 2020, V. 1209, article 127944. DOI: 10.1016/j.molstruc.2020.127944
15. Edo G.I., Ndudi W., Makia R.S., et al. Beta-glucan: An overview in biological activities, derivatives, properties, modifications and current advancements in food, health and industrial applications. *Process Biochem*. 2024, V. 147, pp. 347–370. DOI: 10.1016/j.procbio.2024.09.011
16. Cardoso P.I.F.C., Grisi C.V.B., Vieira É.A., de Almeida D.K.L., Cardarelli H.R. Cereal flours with *Bacillus coagulans* and beta-glucan: Technological properties and sensory acceptability. *Food Chem*. 2024, V. 448, article 139146. DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.139146
17. Ganzle M.G. Enzymatic and bacterial conversions during sourdough fermentation. *Food Microbiology*. 2014, V. 37, pp. 2–10. DOI: 10.1016/j.fm.2013.04.007.
18. Lazaridou A., Biliaderis C.G. Molecular aspects of cereal β -glucan functionality: Physical properties, technological applications and physiological effects. *Journal of Cereal Science*. 2007, V. 46, no. 2, pp. 101–118. DOI: 10.1016/j.jcs.2007.05.003.
19. Chochkov R., Savova-Stoyanova D., Papageorgiou M., Rocha J.M., Gotcheva V., Angelov A. Effects of teff-based sourdoughs on dough rheology and gluten-free bread quality. *Foods*. 2022, V. 11, Is. 7, article 1012. DOI: 10.3390/foods11071012

20. Liszkowska W., Berłowska J. Yeast fermentation at low temperatures: Adaptation to changing environmental conditions and formation of volatile compounds. *Molecules*. 2021, V. 26, Is. 4, article 1035. DOI: 10.3390/molecules26041035
21. van Rooyen J., Simsek S., Oyeyinka S.A., Manley M. Wheat starch structure–function relationship in breadmaking: A review. *Compr Rev Food Sci Food Saf*. 2023, V. 22, Is. 3, pp. 2292–2309. DOI: 10.1111/1541-4337.13147
22. Singh R., Kumar M., Mittal A., Mehta P.K. Microbial enzymes: Industrial progress in 21st century. *3 Biotech*. 2016, V. 6, article 174. DOI: 10.1007/s13205-016-0485-8
23. Hu X., Zhao J., Zhao Q., Zheng J. Structure and characteristic of β -glucan in cereal: A review. *J Food Process Preserv*. 2015, V. 39, Is. 6, pp. 3145–3153. DOI: 10.1111/jfpp.12384
24. Bloksma A.H., Bushuk W. Rheology and chemistry of dough. In: Pomeranz Y. (Ed) *Wheat: Chemistry and Technology*. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, pp. 131–217.
25. Campbell G.M., Mougeot E. Creation and characterisation of aerated food products. *Trends in Food Science & Technology*. 1999, V. 10, no. 9, pp. 283–296. DOI: 10.1016/S0924-2244(00)00008-X

References

1. Alaunyte I., Stojceska V., Plunkett A., Ainsworth P., Derbyshire E. Improving the quality of nutrient-rich Teff (*Eragrostis tef*) breads by combination of enzymes in straight dough and sourdough breadmaking. *Journal of Cereal Science*. 2012, V. 55, no. 1, pp. 22–30. DOI: 10.1016/j.jcs.2011.09.005
2. Inglett G., Chen D., Liu S. Physical properties of gluten free sugar cookies containing teff and functional oat products. *J Food Res*. 2016, V. 5, no. 3, pp. 72–84. DOI: 10.5539/jfr.v5n3p72
3. Sciarini L.S., Ribotta P.D., León A.E., Pérez G.T. Influence of gluten-free flours and their mixtures on batter properties and bread quality. *Food and Bioprocess Technology*. 2010, V. 3, no. 4, pp. 577–585. DOI: 10.1007/s11947-008-0098-2
4. Bykova I.D., Snetkov A.S. Functions of gluten, gluten replacement options and processing of gluten-free ingredients. *Innovatsii, nauka, obrazovanie*. 2020, no. 23, pp. 795-803. (In Russian)
5. Barsukova N.V., Reshetnikov D., Krasilnikov V.N. Food engineering: technologies of gluten-free flour products. *Processes and Food Production Equipment*. 2011, no. 2, pp. 51-60. (In Russian)
6. Yagofarov D.Sh., Kanarsky A.V., Sidorov Yu.D., Polivanov M.A. Physicochemical properties of potato starch. *Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo Universiteta*. 2012, V. 15, no. 12, pp. 212–215. (In Russian)
7. Dueñas M., Sánchez-Acevedo T., Alcalde-Eon C., Escribano-Bailón M.T. Effects of different industrial processes on the phenolic composition of white and brown teff (*Eragrostis tef* (Zucc.) Trotter). *Food Chem*. 2021, V. 335, article 127331. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.127331
8. Vinod B.R., Asrey R., Rudra S.G., Urhe S.B., Mishra S. Chickpea as a promising ingredient substitute in gluten-free bread making: An overview of technological and nutritional benefits. *Food Chem Adv*. 2023, V. 3, article 100473. DOI: 10.1016/j.focha.2023.100473
9. Sáez G.D., Saavedra L., Hebert E.M., Zárate G. Identification and biotechnological characterization of lactic acid bacteria isolated from chickpea sourdough in northwestern Argentina. *LWT*. 2018, V.93, pp. 249–256. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.03.040
10. Parenti O., Assaf N., Alinovi M., Rinaldi M., Caligiani A., Chiavaro E. Physico-chemical characterisation of whole meal flours from three wild chickpea varieties and their technological performance in Gluten Free Bread. *Curr Res Food Sci*. 2024, V. 9, article 100816. DOI: 10.1016/j.crfs.2024.100816
11. Cavallero A., Empilli S., Brighenti F., Stanca A.M. High (1→3,1→4)- β -glucan barley fractions in bread making and their effects on human glycemic response. *J Cereal Sci*. 2002, V. 36, Is. 1, pp. 59–66. DOI: 10.1006/jcrs.2002.0454
12. Yimer G.A., Frioui M., Barakova N.V., Shamtsyan M.M., Maytakov A.L., Baskovtceva A.S., Dozortseva A.K. The effect of plant and fungal beta-glucan on the rheology of teff dough and the quality of bakery products. *Processes and Food Production Equipment*. 2024, no. 4, pp. 12–17. DOI: 10.17586/2310-1164-2024-17-4-12-17. (In Russian)
13. Li Y., Zhu K., Guo X., Peng W., Zhou H. Interaction of barley β -d-glucan with wheat starch: Effect on the pasting and rheological properties. *Int J Biol Macromol*. 2016, V. 92, pp. 70–76. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2016.06.085
14. Sun T., Li J., Qin Y., Xie J., Xue B., Li X., Gan J., Bian X., Shao Z. Rheological and functional properties of oat β -glucan with different molecular weight. *J Mol Struct*. 2020, V. 1209, article 127944. DOI: 10.1016/j.molstruc.2020.127944
15. Edo G.I., Ndudi W., Makia R.S., et al. Beta-glucan: An overview in biological activities, derivatives, properties, modifications and current advancements in food, health and industrial applications. *Process Biochem*. 2024, V. 147, pp. 347–370. DOI: 10.1016/j.procbio.2024.09.011
16. Cardoso P.I.F.C., Grisi C.V.B., Vieira É.A., de Almeida D.K.L., Cardarelli H.R. Cereal flours with *Bacillus coagulans* and beta-glucan: Technological properties and sensory acceptability. *Food Chem*. 2024, V. 448, article 139146. DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.139146
17. Ganzle M.G. Enzymatic and bacterial conversions during sourdough fermentation. *Food Microbiology*. 2014, V. 37, pp. 2–10. DOI: 10.1016/j.fm.2013.04.007.

18. Lazaridou A., Biliaderis C.G. Molecular aspects of cereal β -glucan functionality: Physical properties, technological applications and physiological effects. *Journal of Cereal Science*. 2007, V. 46, no. 2, pp. 101–118. DOI: 10.1016/j.jcs.2007.05.003.
19. Chochkov R., Savova-Stoyanova D., Papageorgiou M., Rocha J.M., Gotcheva V., Angelov A. Effects of teff-based sourdoughs on dough rheology and gluten-free bread quality. *Foods*. 2022, V. 11, Is. 7, article 1012. DOI: 10.3390/foods11071012
20. Liszkowska W., Berlowska J. Yeast fermentation at low temperatures: Adaptation to changing environmental conditions and formation of volatile compounds. *Molecules*. 2021, V. 26, Is. 4, article 1035. DOI: 10.3390/molecules26041035
21. van Rooyen J., Simsek S., Oyeyinka S.A., Manley M. Wheat starch structure–function relationship in breadmaking: A review. *Compr Rev Food Sci Food Saf*. 2023, V. 22, Is. 3, pp. 2292–2309. DOI: 10.1111/1541-4337.13147
22. Singh R., Kumar M., Mittal A., Mehta P.K. Microbial enzymes: Industrial progress in 21st century. *3 Biotech*. 2016, V. 6, article 174. DOI: 10.1007/s13205-016-0485-8
23. Hu X., Zhao J., Zhao Q., Zheng J. Structure and characteristic of β -glucan in cereal: A review. *J Food Process Preserv*. 2015, V. 39, Is. 6, pp. 3145–3153. DOI: 10.1111/jfpp.12384
24. Bloksma A.H., Bushuk W. Rheology and chemistry of dough. In: Pomeranz Y. (Ed) *Wheat: Chemistry and Technology*. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, pp. 131–217.
25. Campbell G.M., Mougeot E. Creation and characterisation of aerated food products. *Trends in Food Science & Technology*. 1999, V. 10, no. 9, pp. 283–296. DOI: 10.1016/S0924-2244(00)00008-X

Информация об авторах

Гетнет Авоке Йимер – аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы»
Надежда Васильевна Баракова – канд. техн. наук, доцент, ведущий аналитик межфакультетской лаборатории «Трансляционные технологии в образовании»

Моника Набил Гейд Ибрахим – канд. тех. наук, научный сотрудник центра пищевых и ферментативных технологий

Анатолий Леонидович Майтаков – д-р техн. наук, доцент кафедры управления качеством

Александра Константиновна Дозорцева – аспирант кафедры технологии микробиологического синтеза

Евгений Иванович Саевич – магистрант кафедры технологии микробиологического синтеза

Information about the authors

Getnet A. Yimer, Postgraduate Student of the Educational Center "Energy-Efficient Engineering Systems"

Nadezhda V. Barakova, Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Principal Analyst of the Interfaculty Laboratory "Translation Technologies in Education"

Monika Nabil Gayed Ibrahim, Ph. D. (Eng.), Researcher of the Center for Food and Enzymatic Technologies

Anatoly L. Maytakov, D. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Quality Management

Alexandra K. Dozortseva, Postgraduate Student of the Department of the Technology of Microbiological Synthesis

Evgenii I. Saevich, Undergraduate Student of the Department of Microbiological Synthesis Technology

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 21.04.2025

Одобрена после рецензирования 03.06.2025

Принята к публикации 01.07.2025

The article was submitted 21.04.2025

Approved after reviewing 03.06.2025

Accepted for publication 01.07.2025