

Научная статья

УДК 664.661

DOI: 10.17586/2310-1164-2025-18-4-18-25

Реологические и структурно-механические свойства тестового полуфабриката из композиционной смеси на основе пшеничной муки с добавлением муки из виноградных косточек, зеленой гречихи и льна

С.А. Гринвальд^{1*}, Н.В. Баракова^{1,2}, Т.П. Арсеньева¹¹Университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург, *svetagrinald8@gmail.com²Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Россия, Санкт-Петербург

Аннотация. Исследовали реологические и структурно-механические свойства тестового полуфабриката, приготовленного из композиционной смеси. Изучаемый образец содержал 70% пшеничной муки высшего сорта, 10% муки из виноградных косточек, 15% муки зеленой гречихи и 5% льняной муки. Контрольный образец готовился из 100% пшеничной муки высшего сорта. Текстуальные характеристики образцов определяли на структурометре СТ-2 методом одноосного сжатия. Показано, что внесение композиционной смеси привело к существенному изменению структурно-механических свойств теста: зафиксировано увеличение жесткости на 25–30% и снижение эластичности на 15–20% в сравнении с контрольным образцом. Реологические свойства образцов исследовали на реоферментометре ФЗ. Установлено, что образец теста с композиционной смесью характеризовался высокой структурной стабильностью. При этом наблюдалось замедленное развитие тестовой матрицы – время достижения максимальной высоты подъема (T_1) составило 177 мин. Коэффициент удержания газа сохранился на приемлемом технологическом уровне (64,1%), хотя и был ниже контрольных значений, что свидетельствует об изменении структуры тестовой матрицы. Для компенсации снижения пластичности теста предложена модифицированная технологическая схема: повышение времени брожения на 40–60%, предварительная гидратация (автолиз 20–30 мин), увеличение гидратации на 3–5% и оптимизированная расстойка (36–38°C, сокращение времени на 15–20%). Получено, что использование композиционных смесей существенно улучшает питательную ценность хлеба без ущерба для его структурной целостности при условии целенаправленной коррекции технологических параметров.

Ключевые слова: хлебопекарное производство; реологические свойства; структурно-механические свойства; композиционная смесь; мука пшеничная; мука льняная; мука из зеленой гречихи; мука из виноградных косточек

Original article

Rheological and structural-mechanical properties of a test semi-finished product based on wheat flour with added flour from grape seeds, green buckwheat, and lentille

Svetlana A. Grinvald^{1*}, Nadezhda V. Barakova^{1,2}, Tamara P. Arsentyeva¹¹ITMO University, St. Petersburg, Russia, *svetagrinald8@gmail.com²St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), Russia, St. Petersburg

Abstract. The rheological and structural-mechanical properties of a semi-finished dough product prepared from a composite mixture were studied. The test sample contained 70% premium wheat flour, 10% grape seed flour, 15% green buckwheat flour, and 5% flaxseed flour. The control sample was prepared from 100% premium wheat flour. The textural characteristics of the samples were determined on an ST-2 structure analyzer using uniaxial compression. It was shown that the addition of the composite mixture led to a significant change in the structural-mechanical properties of the dough: an increase in rigidity of 25–30% and a decrease in elasticity of 15–20% were recorded compared to the control sample. The rheological properties of the samples were studied on an F3 rheofermentometer. It was found that the dough sample with the composite mixture was characterized by high structural stability. At the same time, slow development of the dough matrix was observed: the time to reach the maximum rise height (T_1) was 177 minutes. The gas retention coefficient remained at an acceptable technological level (64.1%), although it was lower than the control values, indicating a change in the dough matrix structure. To compensate for the decrease in dough plasticity, a modified technological scheme was proposed: increased fermentation time (+40–60%), preliminary hydration (autolysis for 20–30 min), increased hydration by 3–5%, and optimized proofing (36–38°C, time reduction by 15–20%). It was found that the use of composite mixtures significantly improves the nutritional value of bread without compromising its structural integrity, provided that the technological parameters are targeted.

Keywords: bakery production; rheological properties; structural and mechanical properties; composite mixture; wheat flour; flaxseed flour; green buckwheat flour; grape seed flour

Введение

Хлебобулочные изделия являются объектом сложных коллоидных и биохимических процессов, которые напрямую влияют на их структурно-механические и органолептические свойства. Данные признаки характеризуют способность системы противостоять деформации, то есть восстанавливать форму по окончании механического воздействия, удерживать газовую фазу, обеспечивая объем готового изделия, формировать правильную пористость и текстуру мякиша, влияющих на структуру продукта. Изучение этих особенностей позволяет прогнозировать поведение теста при замесе, брожении и выпечке, а также управлять структурой хлебобулочных изделий на стадии разработки рецептуры [1].

Ключевую роль в формировании тестовой матрицы играют глютенновые белки — глиадины и глюteniны, создающие за счет ковалентных (дисульфидных) и нековалентных (водородных, гидрофобных) взаимодействий трехмерную сетку, определяющую такие реологические свойства теста, как растяжимость, эластичность и прочность [2]. Вторым важнейшим компонентом является крахмал, представленный амилозой и амилопектином, который участвует в структурообразовании в процессе клейстеризации при выпечке, а также влияет на реологическое поведение теста в присутствии других ингредиентов [3]. Таким образом, структура и качество хлебобулочного изделия формируются в результате сложного взаимодействия глютена, крахмала и воды на всех стадиях технологического процесса.

Несмотря на высокие технологические качества пшеничной муки высшего сорта в производстве хлебобулочных изделий, ее применение ограничено сниженным содержанием биологически активных веществ и низкой функциональной ценностью, в связи с чем производители используют различные обогащающие добавки. Растительные виды муки становятся наиболее востребованными для повышения пищевой ценности и позволяют решить несколько ключевых вопросов в сфере здорового питания.

Нетрадиционные виды муки (льняная, из зеленой гречихи, амарантовая, нутовая, из виноградных косточек и др.) являются ценными источниками белка с улучшенным аминокислотным профилем, пищевых волокон (растворимых и нерастворимых), витаминов группы В, витамина Е, минералов (магния, железа, цинка, селена) и полиненасыщенных жирных кислот (омега-3 в льняной муке) [4]. Кроме того, они содержат широкий спектр фитохимических веществ: фенольные кислоты, флавоноиды, танины, лигнаны (льняная мука), антоцианы. Научные источники подтверждают, что эти соединения обладают антиоксидантной, противовоспалительной и пребиотической активностью, что позволяет позиционировать обогащенные ими продукты как функциональные [5].

Композиционные смеси из растительных видов муки позволяют не только обогащать пищевую продукцию, но и целенаправленно модифицировать текстурные, структурные и органолептические характеристики готового изделия (например увеличить влажность мякиша, изменить цвет корочки, создать более плотную или, наоборот, хрустящую текстуру) [6].

Использование отечественного нетрадиционного сырья снижает зависимость от импорта пшеницы и рациональное использование вторичных продуктов переработки. Мука из виноградных косточек — яркий пример получения ценного ингредиента из отходов виноделия, что соответствует принципам экономики замкнутого цикла [7].

Наиболее распространенными видами муки, содержащими высокое количество алиментарно-важных веществ, является мука из виноградных косточек, зеленой гречихи и льна. Однако несмотря на все преимущества их использования в хлебопечении, есть ряд технологических изменений, которые стоит изучить и учитывать при разработке рецептуры, так как биохимический состав (полифенолы, слизистые вещества, растительные белки) этих видов муки влияет на водопоглотительную способность, взаимодействие с глютеном и пластичность системы, что в итоге сказывается на упругости, газодерживающей способности и текстуре мякиша.

Из литературных источников [8, 9] известно, что мука из виноградных косточек обогащает тесто полифенольными соединениями, способными укреплять белково-полисахаридную сеть и повышать сопротивляемость деформации. Однако, с другой стороны, при этом происходит уплотнение структуры мякиша из-за присутствия грубых частиц в муке, потемнение окраски продукта за счет природных пигментов и терпкость во вкусе, обусловленная наличием танинов [10]. Льняная мука благодаря слизистым полисахаридам увеличивает вязкость и газодерживающую способность теста, воздействуя на его консистенцию и скорость газообразования. Но данные свойства отрицательно влияют на мякиш

готового изделия, который становится более влажным и липким [11, 12]. Мука из зеленой гречихи, содержащая белки с высоким содержанием лизина и флавоноиды, формирует дополнительные водородные связи в тестовой матрице, повышая ее прочность и эластичность [13, 14].

Для нивелирования негативного воздействия, возникающего при добавлении нетрадиционных видов муки к пшеничной муке, можно применять различные ферментные препараты, например протеазы, – для увеличения эластичности и снижения упругости; гемицеллюлазы – для повышения эластичности теста и газоудерживающей способности, замедления черствения; оксидоредуктазы – для укрепления клейковинного каркаса за счет образования дополнительных дисульфидных связей. Применение ферментных препаратов в целом не оказывает негативного воздействия на организм человека, если сырье соответствует всем требованиям качества. Единственное отрицательное влияние несут термически стабильные ферменты. Некоторые современные (чаще бактериальные) амилазы могут сохранять частичную активность после выпечки. Это приводит к липкому мякишу и может вызывать дискомфорт в области ЖКТ из-за продолжения расщепления крахмала. Кроме того, внесение ферментных препаратов повышает себестоимость готовой продукции, которая для функциональных изделий и так увеличивается за счет внесения композиционной смеси [15], поэтому с экономической точки зрения данное решение является нецелесообразным.

Воздействовать на биотехнологический процесс брожения и выпечки можно и используя технологические приемы, например изменяя параметры приготовления тестового полуфабриката с учетом особенностей вносимых видов муки [16]. Изменение вязкоупругих характеристик, водопоглотительной способности и стабильности тестовой системы позволит установить закономерности формирования структуры при введении смеси из растительных компонентов и обосновать их использование в технологии функциональных хлебобулочных изделий с повышенной антиоксидантной активностью и пролонгированным сроком годности.

Цель данного исследования – изучить влияние композиционной смеси, включающей пшеничную муку высшего сорта, льняную, муку из зеленой гречихи и виноградных косточек на реологические и структурно-механические свойства тестового полуфабриката.

Объекты и методы исследований

Для приготовления образцов композиционных смесей использовали:

- пшеничную муку высшего сорта (ГОСТ 26574, Объединение «Союзпищепром», Россия), пищевая ценность: белки – 10,3 г; жиры – 1,0 г; углеводы – 71,0 г; энергетическая ценность – 1400 кДж/331 ккал;
- льняную муку (СТО 68311059-005-2011, НПО «Компас здоровья», Россия), пищевая ценность: белки – 32,4 г; жиры – 8,80 г; углеводы – 6,9 г; энергетическая ценность – 989 кДж/236 ккал;
- муку из зеленой гречки (ГОСТ ИСО 22000–2007, Агрокомбинат Тамбовкрахмал, Россия), пищевая ценность: белки – 13,6 г; жиры – 1,2 г; углеводы – 71,9 г; энергетическая ценность – 1 497 кДж/353 ккал;
- муку из виноградной косточки (ТУ 10.61.22–008–264135382017, ЗЕТИ, Россия), пищевая ценность: белки – 18,0 г; жиры – 5,0 г; углеводы – 69,9 г; энергетическая ценность – 525,4 кДж/396,6 ккал.

Нетрадиционные виды муки смешивали с мукой пшеничной и готовили смесь в различных пропорциях, указанных в таблице 1.

Таблица 1. Варианты исследования композиционных смесей

Table 1. Research options for composite mixtures

Наименование компонента	Соотношение видов муки, %			
	контрольный образец	Образец 1	Образец 2	Образец 3
пшеничная мука в/с	100	80	70	70
льняная мука	–	10	13	5
мука из зеленой гречихи	–	5	10	15
мука из виноградной косточки	–	5	7	10

По результатам лабораторной выпечки для проведения исследований структурно-механических и реологических свойств был выбран Образец 3, так как его органолептические и физико-химические

показатели оставались в пределах нормативных значений, а микробиологические параметры продемонстрировали положительный результат относительно развития дрожжей и плесени в процессе хранения готовых хлебобулочных изделий.

В результате объектами исследования стали два образца тестовых заготовок: контрольный образец с пшеничной мукой высшего сорта и опытный образец с внесением 30% смеси из муки льняной, зеленой гречихи и виноградных косточек. Соотношение компонентов представлено в таблице 2.

Таблица 2. Рецептное соотношение компонентов для контрольного и опытного образцов
Table 2. Recipe ratio of the components for the control and experimental samples

Наименование компонента	Соотношение компонентов, %	
	контрольный образец	опытный образец
пшеничная мука в/с	100,0	70,0
льняная мука	–	5,0
мука из зеленой гречихи	–	15,0
мука из виноградной косточки	–	10,0
вода	58,0	61,0
соль	2,0	2,0
сахар-песок	8,0	8,0
масло растительное	6,0	6,0
дрожжи прессованные	3,3	3,3

Процесс производства булочек для гамбургеров начинали с замеса опары, которая замешивалась из части муки, воды и дрожжей на первой скорости 5 мин. Температура опары составляла 28–32°C, время ее брожения – 2–2,5 ч. Вторым этапом являлся замес теста: подготовленные предусмотренные рецептурой ингредиенты смешивались в тестомесильной машине 3 мин на первой скорости и 10 мин на второй скорости. Готовое тесто имело температуру 28°C. После этого изделиям придавали круглый вид и отправляли на расстойку, которая включала два этапа – предварительная расстойка (5 мин при температуре 34–36°C) и окончательная расстойка (после придания более плоской формы 45–50 мин при температуре 40°C).

По окончании расстойки оценивали структурно-механические свойства тестовой заготовки на структурометре СТ-2 (Лаборатория качества, Россия) методом одноосного сжатия. Из центральной части заготовки вырезали цилиндрические образцы диаметром 60 и высотой 30 мм с помощью пробойника из нержавеющей стали. Для каждого образца анализ проводили в трехкратной повторности. Основными регистрируемыми параметрами были максимальное усилие сжатия (F_{max} , Н) и деформация.

На реоферментометре Rheofermentometer F3 (Chopin Technologies, Франция) изучали реологические характеристики композиционной смеси. Тесто для опытного образца готовили из 250 г мучной смеси (мука пшеничная высшего сорта – 175 г, мука льняная – 12,5 г, мука из зеленой гречихи – 37,5 г, мука из виноградных косточек – 25 г), 7 г свежих хлебопекарных дрожжей, 5 г соли и воды.

Статистический анализ был проведен с применением критерия Стьюдента при уровне значимости $p \leq 0,05$. Все расчеты и статистические выкладки выполнялись с помощью Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение

Результаты структурно-механических характеристик тестового полуфабриката представлены на рисунках 1 и 2. Анализ кривых усилие–деформация, полученных на структурометре СТ-2, выявил значительные изменения текстурных характеристик: внесение нетрадиционных видов муки существенно влияет на структурные связи при формировании тестового каркаса. Данные показатели важно учитывать при производстве хлебобулочных изделий, так как они позволяют предотвращать расплывания заготовок во время брожения, расстойки и выпечки, исключить излишнюю упругость или растяжимость теста, что приведет к снижению качества готовых булочных изделий – изменение формы, пористости, упругости изделия.

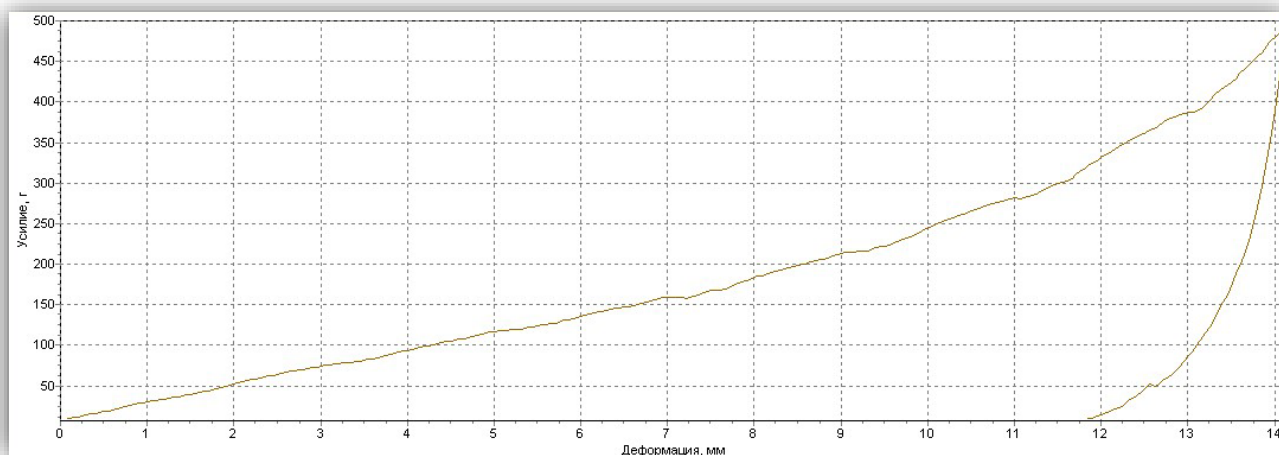


Рисунок 1 – График деформационных изменений контрольного образца
Figure 1. Deformation changes in the control sample

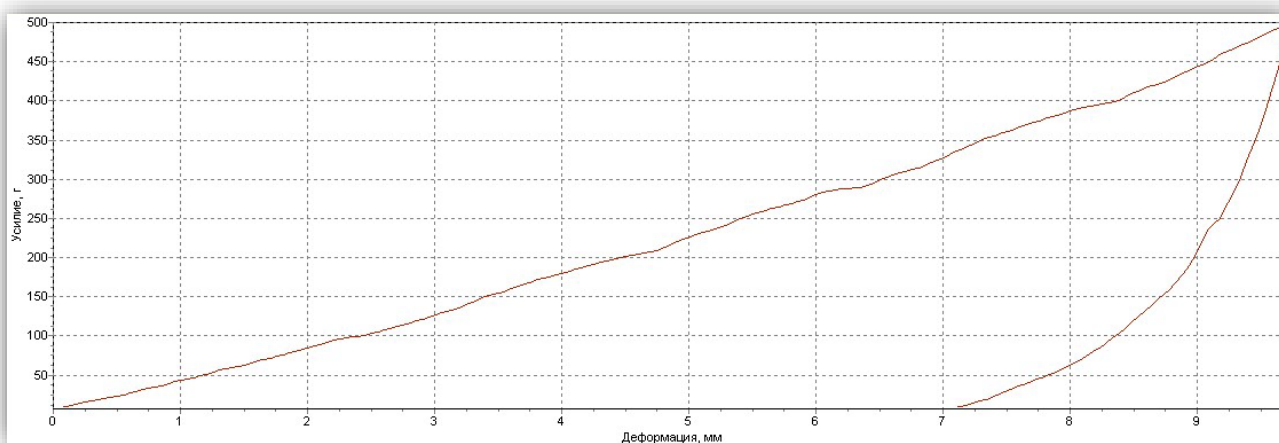


Рисунок 2 – График деформационных изменений опытного образца
Figure 2. Deformation changes in the experimental sample

Для достижения одного и того же пикового усилия в 500 г опытному образцу потребовалась значительно меньшая деформация, то есть он оказался более жестким и хрупким, что привело к разрушению структуры при меньшем сжатии, хотя прочность на разрыв у обоих образцов одинаковая. Мякиш контрольного образца был более эластичным и дольше сопротивлялся деформации до разрушения.

Визуально и численно площадь под первой кривой для контрольного образца существенно больше, чем для опытного, то есть на разрушение структуры контрольного образца требуется больше механической энергии. Это подтверждает, что его мякиш обладает лучшей эластичностью и связностью, плавно поддаваясь деформации, в то время как опытный образец разрушается легче.

Несмотря на более жесткую структуру опытный образец показал лучшую когезивность (способность теста сохранять целостность структуры при механическом воздействии). Это означает, что после первой деформации его структура сохранила целостность в сравнении с контролем, что можно объяснить ролью пищевых волокон и гидроколлоидов (особенно из льняной муки), которые предотвращают полное разрушение, удерживая частицы вместе. Данное свойство показывает, насколько изделие будет сохранять свою форму или крошиться при надавливании или разрезании, что является важной характеристикой при производстве хлебобулочных изделий [17].

Увеличение механической прочности структуры тестового полуфабриката можно объяснить и синергетическим действием компонентов композиционной смеси: проантоцианидины муки из виноградных косточек образуют комплексы с белками клейковины через водородные связи

и гидрофобные взаимодействия [18], слизистые полисахариды льняной муки создают дополнительную структурную сеть [17] и белки зеленой гречихи участвуют в формировании смешанной белковой матрицы [14].

На рисунке 3 представлены данные степени развития теста, общего газообразования, газоудержания, максимального развития теста и газообразования для опытного образца.

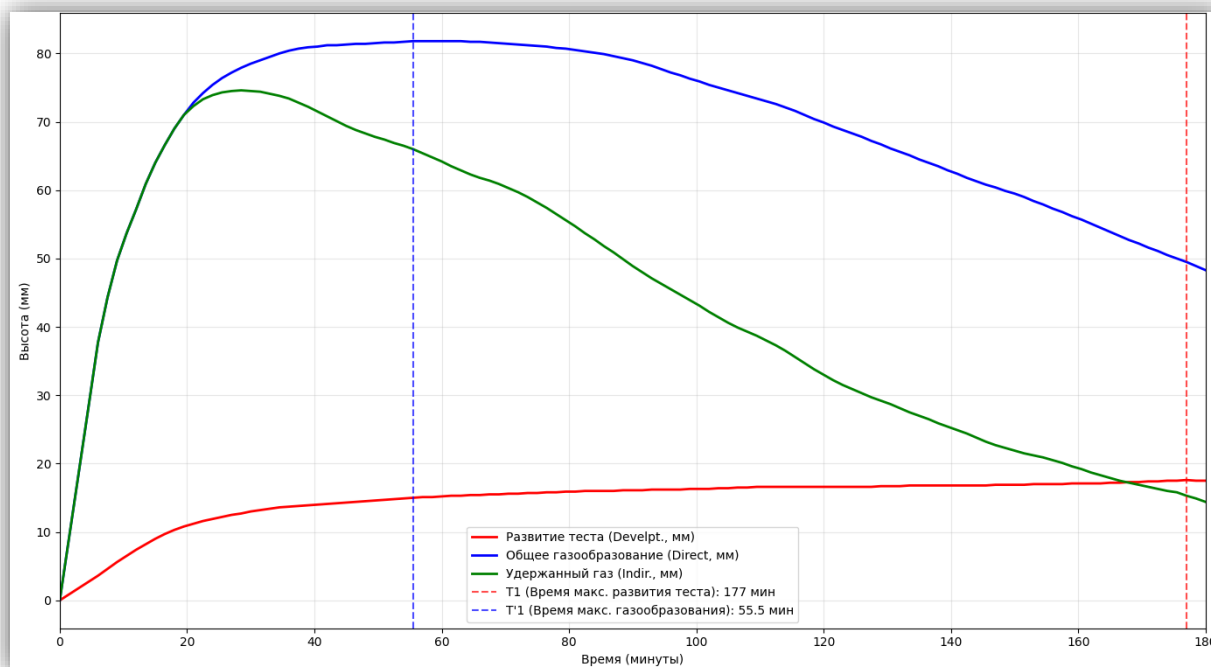


Рисунок 3 – Реоферментометрические кривые опытного образца
Figure 3. Rheoenzymometric test curves of the experimental sample

Анализ реоферментометрических кривых опытного образца показал, что максимальное развитие теста составило 15,6 мм, достигаемое приблизительно на 177-й минуте замеса. Наблюдаемое увеличение времени достижения максимального развития теста (T_1) свидетельствует о формировании более жесткой структурной матрицы. Полученные данные согласуются с литературными источниками, указывающими на способность фенольных соединений муки из виноградных косточек и зеленой гречихи образовывать дополнительные поперечные связи с белками клейковины [14, 17, 18].

Коэффициент удержания газа опытного образца составил 64,1%. Данное значение меньше относительно контрольного образца и литературных данных для пшеничных хлебобулочных изделий, что можно объяснить понижением эластичности тестовой матрицы вследствие образования жесткого каркаса при взаимодействии полифенолов с белковыми компонентами [18].

Представленные данные доказывают, что внесение нетрадиционных видов муки снижает качество тестового полуфабриката, а в дальнейшем и готового изделия. Однако для уменьшения негативного воздействия необходимо скорректировать технологические параметры производства: продлить брожение опары или теста на 40–60% по сравнению со стандартным циклом для пшеничного теста, повысить температуру расстойки до 36–38°C. Как показывают экспериментальные и литературные данные [19], это окажет воздействие на эластичность белково-полисахаридного комплекса и ускорит газообразование, частично компенсируя замедленное развитие.

При наблюдении снижения пластичности и повышения жесткости из-за избыточного поперечного сшивания полифенолами, необходимо применять медленный замес с автолизом. Предварительное смешивание муки и воды (автолиз на 20–30 мин) до внесения дрожжей и соли позволяет гидратировать компоненты и частично снизить прочность связей, развивая эластичность без механического воздействия. При этом стоит повысить гидратацию на 3–5% относительно рецептуры пшеничного хлебобулочного изделия [20]. Дополнительная вода будет пластифицировать матрицу, увеличивая расстояние между макромолекулами и облегчая их скольжение [21, 22].

Для снижения риска повышенной плотности тестовой матрицы и поддержания газодерживающей способности необходимо сократить время окончательной расстойки на 15–20% в сравнении с контрольным образцом, чтобы предотвратить разрыв пор под давлением газа [23]. Применение паровой среды при выпечке (первые 8–12 мин) способствует лучшему растяжению и желатинизации крахмала, позволяя тесту максимально расшириться до формирования жесткой корочки [19–22].

Заключение

В ходе исследования установлено, что внесение 30% композиционной смеси на основе льняной муки, муки из зеленой гречихи и муки из виноградных косточек оказывает комплексное влияние на реологические свойства пшеничного теста: повышает его структурную стабильность (падение высоты за 3 ч составило 0,1 мм), но снижает эластичность и газодерживающую способность (коэффициент удержания газа 64,1%). Выявлено, что композиционная смесь способствует формированию более жесткой и плотной структуры мякиша, что проявляется в увеличении сопротивления сжатию на 25–30% в сравнении с контрольным образцом. Показано, что модификация реологических характеристик обусловлена взаимодействием фенольных соединений (проантоцианидинов виноградных косточек, рутина зеленой гречихи) с белками клейковины, а также влиянием слизистых полисахаридов льняной муки. Разработаны технологические рекомендации по корректировке параметров замеса и расстойки для компенсации снижения пластичности теста.

Литература/References

1. Dufour M., Chaunier L., Lourdin D., Reguerre A., Hugon F., Dugue A., Kansou K., Saulnier L., Della Valle G. Unravelling the relationships between wheat dough extensional properties, gluten network and water distribution. *Food Hydrocolloids*. 2024, V. 146, Part A, article 109214. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2023.109214
2. Sun X., Wu S., Koksel F., Xie M., Fang Y. Effects of ingredient and processing conditions on the rheological properties of whole wheat flour dough during breadmaking – A review. *Food Hydrocolloids*. 2023, V. 135, article 108123. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2022.108123
3. Song Y., Zheng Q. Dynamic rheological properties of wheat flour dough and proteins. *Trends in Food Science & Technology*. 2007, V. 18, Is. 3, pp. 132–138. DOI: 10.1016/j.tifs.2006.11.003
4. Rolandelli G., Farroni A., Buera P. Raw materials. Traditional and non-conventional cereals, pseudo-cereals, oilseeds and legumes. In: de Escalada Pla M.F., Genevois C.E. (Eds.) *Designing Gluten Free Bakery and Pasta Product*. Springer Cham. 2023, pp. 19–61. DOI: 10.1007/978-3-031-28344-4_2
5. Santacroce L., Bottalico L., Charitos A., Castellaneta F., Gaxhja E., Topi S., Palmirotta R., Jirillo E. Exploitation of natural by-products for the promotion of healthy outcomes in humans: special focus on antioxidant and anti-inflammatory mechanisms and modulation of the gut microbiota. *Antioxidants*. 2024, V. 13, no. 7, article 796. DOI: 10.3390/antiox13070796
6. Bojnanska T., Kolesarova A., Ivanišová E., Bojnanský J. The application of non-bakery raw materials to bakery flours, their effect on the technological quality and the cost innovative products. *Journal of Microbiology Biotechnology and Food Sciences*. 2024, V. 13, no. 4, article e10522. DOI: 10.55251/jmbfs.10522
7. Rațu R.N., Veleșcu I.D., Stoica F., Usturoi A., Arsenoaia V.N., Crivei I.C., Postolache A.N., Lipșa F.D., Filipov F., Florea A.M., Chițea M.A., Brumă I.S. Application of agri-food by-products in the food industry. *Agriculture*. 2023, V. 13, Is. 8, article 1559. DOI: 10.3390/agriculture13081559
8. Oprea O.B., Popa M.E., Apostol L., Gaceu L. Research on the potential use of grape seed flour in the bakery industry. *Foods*. 2022, V. 11, no. 11, article 1589. DOI: 10.3390/foods11111589
9. Simora V., Duranová H., Miskeje M., Ivanisová E., Gabríny L., Kacaniová M. Physico-chemical, antioxidant and microbiological characteristics of bread supplemented with 1% grape seed micropowder. *J Food Nutr Res*. 2021, V. 60, no. 1, pp. 9–17.
10. Boff J., Strasburg V., Ferrari G., Schmidt H., Manfroi V., Oliveira V. Chemical, technological, and sensory quality of pasta and bakery products made with the addition of grape pomace flour. *Foods*. 2022, V. 11, no. 23, article 3812. DOI: 10.3390/foods11233812
11. Ferreira D.M., Machado S., Santo L.E., Nunes M.A., Costa A.S.G., Alvarez-Ortí M., Pardo J.E., Alves R.C., Oliveira M.B. Defatted flaxseed flour as a new ingredient for foodstuffs: comparative analysis with whole flaxseeds and updated composition of cold-pressed oil. *Nutrients*. 2024, V. 16, no. 20, article 3482. DOI: 10.3390/nu16203482
12. Krupa-Kozak U., Bączek N., Capriles V.D., Lopusiewicz L. Novel gluten-free bread with an extract from flaxseed by-product: The relationship between water replacement level and nutritional value, antioxidant properties, and sensory quality. *Molecules*. 2022, V. 27, Is. 9, article 2690. DOI: 10.3390/molecules27092690
13. Coțovanu I., Mironeasa S. Influence of buckwheat seed fractions on dough and baking performance of wheat bread. *Agronomy*. 2022, V. 12, no. 1, article 137. DOI: 10.3390/agronomy12010137

14. Biduski B., Maças M., Vahedikia N., O'Connor P.M., Hussey K., Simpson J.C., Mysior M.M., Gallagher E. Dough rheology and internal structure of bread produced with wheat flour partially substituted by buckwheat flour: A step towards enhancing nutritional value. *Food Structure*. 2024, V. 39, article 100364. DOI: 10.1016/j.foostr.2023.100364
15. Bock J.E. *Enzymes in breadmaking*. In: Yada R.Y., Dee D.R. (Eds.) Improving and tailoring enzymes for food quality and functionality. Elsevier. 2024, Ch. 9, pp. 217–236. DOI: 10.1016/B978-0-443-15437-9.00003-3
16. Jagelaviciute J., Cizeikiene D. The influence of non-traditional sourdough made with quinoa, hemp and chia flour on the characteristics of gluten-free maize/rice bread. *LWT – Food Science and Technology*. 2021, V. 137, article 110457. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.110457
17. Lorenc F., Jarosová M., Bedrníček J., Smetana P., Bárta J. Structural characterization and functional properties of flaxseed hydrocolloids and their application. *Foods*. 2022, V. 11, no. 15, article 2304. DOI: 10.3390/foods11152304
18. Guo Z., Huang Y., Huang J., Li S., Zhu Z., Deng Q., Cheng S. Formation of protein-anthocyanin complex induced by grape skin extracts interacting with wheat gliadins: Multi-spectroscopy and molecular docking analysis. *Food Chemistry*. 2022, V. 385, article 132702. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.132702
19. Martinez M., Gomez M. Rheological and microstructural evolution of the most common gluten-free flours and starches during bread fermentation and baking. *Journal of Food Engineering*. 2017, V. 197, pp. 78–86. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2016.11.008.
20. Cappelli A., Oliva N., Cini E. A systematic review of gluten-free dough and bread: Dough rheology, bread characteristics, and improvement strategies. *Appl Sci*. 2020, V. 10, Is. 18, article 6559. DOI: 10.3390/app10186559
21. Cauvain S.P. *Technology of Breadmaking*. Springer Cham., 2015. 408 p. DOI: 10.1007/978-3-319-14687-4
22. Dobraszczyk B.J., Morgenstern M. Review: dough rheology and breadmaking. *Journal of Cereal Science*. 2003, V. 38, Is. 3, pp. 229–245. DOI: 10.1016/S0733-5210(03)00059-6.
23. Zhang D. Effect of proofing on the rheology and moisture distribution of corn starch-hydroxypropylmethylcellulose gluten-free dough. *Foods*. 2023, V. 12, Is. 4, article 695. DOI: 10.3390/foods12040695.

Информация об авторах

Гринвальд Светлана Александровна – аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы»
Надежда Васильевна Баракова – канд. техн. наук, доцент, ведущий аналитик межфакультетской лаборатории
Тамара Павловна Арсеньева – д-р техн. наук, профессор, профессор факультета экотехнологий

Information about the authors

Svetlana A. Grinvald, Postgraduate Student, Educational Center "Energy-Efficient Engineering Systems"
Nadezhda V. Barakova, Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Principal Analyst of the interfaculty laboratory
Tamara P. Arsenyeva, D. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Faculty of Environmental Technologies

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

Статья поступила в редакцию 20.10.2025

Одобрена после рецензирования 19.11.2025

Принята к публикации 24.11.2025

The article was submitted 20.10.2025

Approved after reviewing 19.11.2025

Accepted for publication 24.11.2025