

МРНТИ 65.29.31

Н. Онгарбаева¹ – основной автор, | ©
А.И. Изтаев², Е.Н. Урбанчик³, М.А. Якияева⁴, Н.К. Акишев⁵



ORCID

¹Д-р техн. наук, профессор, ²Д-р техн. наук, профессор, академик НАН РК,
³Канд. техн. наук, доцент, ⁴PhD, ассоц. профессор, ⁵Канд. техн. наук
¹<https://orcid.org/0000-0001-7908-5091> ²<https://orcid.org/0000-0002-7385-482X>
³<https://orcid.org/0009-0001-8267-4767> ⁴<https://orcid.org/0000-0002-8564-2912>
⁵<https://orcid.org/0009-0003-4514-8957>



^{1,2,4}Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан

³Белорусский государственный университет пищевых и химических
технологий, Могилев, Республика Беларусь

⁵Назарбаев Университет, Астана, Казахстан



⁴yamadina88@mail.ru

<https://doi.org/10.55956/VQJH9380>

ПРОТЕОЛИТИЧЕСКАЯ И ОКИСЛИТЕЛЬНО- ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ МУКИ КАЗАХСТАНСКИХ СОРТОВ ТРИТИКАЛЕ КАК ФАКТОР ЕЁ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ

Аннотация. Тритикале является перспективным зерновым сырьём для хлебопекарной отрасли Казахстана. Цель исследования – оценить протеолитическую и окислительно-восстановительную активность муки сортов «Кожа», «Таза» и «Азиада» и их связь с состоянием клейковинного комплекса. Определяли влажность, содержание протеина, стекловидность, натуру зерна, количество и качество клейковины (ИДК), протеолитическую активность (метод Ансона), активность пероксидазы и о-дифенолоксидазы спектрофотометрическим методом. Рассчитывали средние значения, стандартные отклонения и коэффициенты корреляции Пирсона. Сорт «Азиада» характеризовался наибольшим содержанием клейковины (26,3%), «Таза» – максимальной протеолитической активностью (0,76 усл. ед.), активностью пероксидазы (9,15 усл. ед.) и о-дифенолоксидазы (0,65 усл. ед.), а также наихудшим качеством клейковины (ИДК 81,6 ед., II группа). Для «Кожа» и «Азиада» протеолитическая активность составила 0,71 и 0,69 усл. ед. Корреляция протеолитической активности с ИДК составила $r = 0,88$, с количеством клейковины – $r = -0,71$. Активность ферментов является информативным критерием технологической оценки муки.

Ключевые слова: тритикале, тритикалевая мука, казахстанские сорта, протеолитическая активность, пероксидаза, о-дифенолоксидаза, клейковинный комплекс, ИДК, технологическая оценка.



Онгарбаева, Н. Протеолитическая и окислительно-восстановительная активность муки казахстанских сортов тритикале как фактор её технологической оценки [Текст] / Н. Онгарбаева, А.И. Изтаев, Е.Н. Урбанчик, М.А. Якияева, Н.К. Акишев // Механика и технологии / Научный журнал. – 2026. – №3(93). – С.84-100.
<https://doi.org/10.55956/VQJH9380>

Введение. Тритикале представляет интерес как зерновое сырьё с выраженным технологическим потенциалом для хлебопекарной отрасли.

Значимость сортов казахстанской селекции определяется не только их адаптацией к региональным условиям возделывания, но и возможностью получения муки с различными функциональными характеристиками. В хлебопекарном процессе свойства такой муки формируются под влиянием комплекса факторов, среди которых важное место занимают белковый состав, состояние клейковины и активность ферментных систем [1,2].

В современных исследованиях технологическая оценка тритикалевой муки рассматривается как комплексная задача, включающая анализ физико-химических, ферментативных и структурно-механических показателей. При этом отмечается, что критерии, применяемые для оценки пшеничной муки, не всегда полностью отражают особенности тритикале, что требует расширения набора исследуемых показателей [2,3].

Такой подход обусловлен тем, что хлебопекарные свойства тритикалевой муки формируются не только под влиянием процессов гидролиза крахмала, но и в результате ферментативных изменений белковых и фенольных компонентов сырья. В связи с этим особое значение приобретает оценка протеолитической и окислительно-восстановительной активности, поскольку данные группы ферментов могут влиять на состояние клейковины, реологические свойства теста и качество готовых изделий [4-6].

Протеолитические ферменты участвуют в преобразовании белковых веществ муки и способны изменять прочность, упругость и растяжимость клейковинного каркаса. При умеренном уровне активности они могут способствовать повышению пластичности теста, тогда как избыточное протеолитическое воздействие приводит к ослаблению белковой структуры, снижению формоудерживающей способности и ухудшению хлебопекарных свойств. В связи с этим определение протеолитической активности является важным показателем при сравнительной оценке муки разных сортов тритикале, особенно при наличии различий по содержанию белка, количеству клейковины и её качеству.

Особое значение имеет состояние белково-протеиназного комплекса, от которого зависят количество и качество клейковины, устойчивость тестовой системы и технологическое поведение муки. Протеолитические ферменты воздействуют на белковые вещества и могут изменять прочность, упругость и растяжимость клейковины, поэтому их оценка является важным элементом характеристики тритикалевой муки [1,2,4].

Окислительно-восстановительные ферменты также имеют технологическое значение, поскольку связаны с окислительными превращениями компонентов муки, изменением окраски мякиша и формированием органолептических характеристик хлебобулочных изделий. Повышенная активность отдельных ферментов данной группы, в частности полифенолоксидаз, может усиливать процессы потемнения и снижать потребительскую привлекательность готовой продукции. Поэтому их учёт дополняет характеристику ферментного комплекса муки и позволяет более объективно прогнозировать её поведение в хлебопекарном процессе [4,5].

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью комплексной оценки ферментативных особенностей муки казахстанских сортов тритикале с позиции её хлебопекарного применения. Сравнительное изучение сортов «Қожа», «Таза» и «Азиада» позволяет выявить различия в состоянии белково-протеиназного комплекса, активности окислительно-восстановительных ферментов и определить возможные технологические ограничения при переработке данного сырья.

Цель исследования – изучить протеолитическую и окислительно-восстановительную активность муки казахстанских сортов тритикале и оценить их связь с показателями клейковинного комплекса как одного из факторов технологической пригодности муки.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

- провести сравнительную характеристику исходных физико-химических показателей зерна исследуемых сортов;
- оценить количество и качество клейковины тритикалевой муки;
- определить уровень протеолитической активности муки;
- изучить активность окислительно-восстановительных ферментов;
- установить технологическую значимость выявленных различий для хлебопекарного использования муки тритикале.

Научная новизна работы состоит в выявлении сортовых особенностей ферментативного профиля муки казахстанских сортов тритикале «Қожа», «Таза» и «Азиада» с акцентом на белково-протеиназную, пероксидазную и о-дифенолоксидазную системы. Установлена связь этих показателей с состоянием клейковинного комплекса, что позволяет расширить технологическую характеристику муки тритикале.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования полученных данных для технологической оценки муки казахстанских сортов тритикале и обоснования направлений её применения в хлебопечении. Уровень протеолитической активности может служить ориентиром для прогнозирования состояния клейковинного комплекса, а показатели окислительно-восстановительных ферментов – для оценки риска изменения окраски мякиша и отдельных органолептических характеристик готовых изделий.

Материалы и методы исследования. Экспериментальные исследования проводили на зерне и муке тритикале казахстанской селекции сортов «Қожа», «Таза» и «Азиада». Выбор данных сортов обусловлен различиями в физико-химических характеристиках зерна, содержании белковых веществ и качестве клейковины. Это позволило провести сравнительную оценку протеолитической и окислительно-восстановительной активности муки и определить их связь с состоянием клейковинного комплекса как одного из ключевых факторов технологической пригодности муки.

В исходном зерне определяли влажность, содержание протеина, количество клейковины, качество клейковины по показателю ИДК, стекловидность, натуру и массу 1000 зерен. Влажность зерна определяли методом высушивания по ГОСТ 13586.5-2015 [7]; содержание белка – по ГОСТ 10846-91 [8]; натуру – по ГОСТ 10840-2017 [9]; массу 1000 зерен – по ГОСТ ISO 520-2014 [10]. Стекловидность определяли по ГОСТ 10987-76 [11] с учётом применимости метода к исследуемому зерновому сырью (стандарт распространяется на пшеницу и рис, однако метод может быть адаптирован для тритикале при сравнительных исследованиях).

Для последующих исследований использовали муку, полученную из подготовленных образцов зерна тритикале сортов «Қожа», «Таза» и «Азиада» по единой сокращённой лабораторной схеме помола. Такой подход обеспечивал сопоставимость результатов между сортами и позволял оценивать различия, связанные преимущественно с ферментативным профилем муки. В муке определяли количество и качество клейковины,

протеолитическую активность, а также активность окислительно-восстановительных ферментов. Количество и качество клейковины определяли по ГОСТ 27839-2013 [12] с оценкой упруго-эластичных свойств на приборе ИДК-1М. Результаты выражали в процентах для количества сырой клейковины и в единицах прибора ИДК для показателя качества (шк. ИДК от 0 до 150 ед.).

Общую протеолитическую активность муки определяли методом Ансона [13] в модификации для зерновых культур. Метод основан на гидролизе казеина при pH 4,7 (ацетатный буфер) в течение 60 мин при температуре 37 °С. Реакцию останавливали добавлением трихлоруксусной кислоты, затем определяли количество образовавшихся низкомолекулярных продуктов по реакции с реактивом Фолина–Чиокальтеу. Данный показатель характеризует суммарное действие кислых протеиназ (преимущественно катепсиноподобных ферментов) на белковые компоненты муки. Результаты выражали в условных единицах активности (изменение оптической плотности при 660 нм за 1 ч в пересчёте на 1 г муки). Все определения проводили в трёхкратной повторности. Активность окислительно-восстановительных ферментов определяли спектрофотометрическим методом по скорости окисления специфических субстратов. Активность пероксидазы (КФ 1.11.1.7) оценивали по скорости окисления пирогаллола в присутствии перекиси водорода при длине волны 420 нм [14]. Активность о-дифенолоксидазы (КФ 1.14.18.1) определяли по скорости окисления дигидроксифенилаланина (ДОФА) при длине волны 475 нм [15]. Реакцию проводили при температуре 30 °С в течение 5 мин. Изменение оптической плотности реакционной смеси регистрировали спектрофотометрически (спектрофотометр ПЭ-5400В, Россия) и использовали как критерий интенсивности ферментативной реакции. Результаты выражали в условных единицах активности ($\Delta D/\text{мин} \cdot \text{г}$ муки). Все определения проводили в трёхкратной повторности; для контроля использовали реакционную смесь без ферментного экстракта.

Полученные экспериментальные данные использовали для сравнительной оценки сортовых различий муки тритикале по уровню протеолитической и окислительно-восстановительной активности. Особое внимание уделяли сопоставлению ферментативных показателей с количеством и качеством клейковины, поскольку данные характеристики определяют технологическую устойчивость теста и хлебопекарную пригодность муки. Статистическую обработку результатов проводили с использованием программного пакета Microsoft Excel. Все определения выполняли в повторности, предусмотренной соответствующими методиками. Результаты представляли в виде средних арифметических значений и стандартных отклонений ($M \pm \sigma$). Исследования выполнены в 2024–2026 гг. на базе Научно-исследовательского института пищевых технологий Алматинского технологического университета (АТУ), Алматы, Казахстан.

Результаты исследований и их обсуждение. Для характеристики исходного сырья были проанализированы показатели качества зерна сортов «Қожа», «Таза» и «Азиада». В таблице 1 представлены данные, отражающие белково-углеводный состав, состояние клейковины и физические признаки зерна. Эти показатели использованы как основа для последующей оценки качества муки и её ферментативного профиля.

Таблица 1

Исходные показатели качества зерна сортов тритикале

Показатель	Единица измерения	Сорта зерна тритикале		
		«Кожа»	«Таза»	«Азиада»
Влажность	%	1,3 ± 0,2	11,3 ± 0,2	10,7 ± 0,2
Протеин	%	13,0 ± 0,3	14,4 ± 0,3	15,5 ± 0,3
Крахмал	%	62,7 ± 0,5	62,7 ± 0,5	60,3 ± 0,5
Количество клейковины	%	6,3 ± 0,5	23,5 ± 0,5	20,7 ± 0,5
ИДК	ед. прибора	79 ± 2	84 ± 2	89 ± 2
Группа качества	—	II	II	II
Характеристика клейковины	—	Удовлетворительно слабая	Удовлетворительно слабая	Удовлетворительно слабая
Стекловидность	%	39 ± 2	63 ± 2	50 ± 2
Натура	г/л	617 ± 5	632 ± 5	615 ± 5
Масса 1000 зерен	г	37,5 ± 0,3	39,0 ± 0,3	36,9 ± 0,3

Данные таблицы 1 показывают, что исследуемые сорта различались по содержанию протеина, количеству клейковины и физическим признакам зерна. Наибольшее содержание протеина отмечено у сорта «Азиада» – 15,5%, тогда как максимальное количество клейковины установлено у сорта «Таза» – 23,5%. У сортов «Кожа» и «Азиада» данный показатель составил 16,3 и 20,7% соответственно.

Качество клейковины всех образцов соответствовало II группе. Значения ИДК варьировали от 79 до 89 ед. прибора, что характеризует клейковину как удовлетворительно слабую. Более высокое значение ИДК у сорта «Азиада» указывает на менее прочную структуру клейковины на уровне исходного зерна.

Сорт «Таза» выделялся по стекловидности, натуре и массе 1000 зерен, значения которых составили 63%, 632 г/л и 39,0 г соответственно. Однако для оценки технологической пригодности муки этих показателей недостаточно, поэтому дальнейший анализ был направлен на изучение состояния клейковинного комплекса и ферментативного профиля муки.

Для уточнения технологической оценки муки исследуемых сортов были рассмотрены показатели, характеризующие состояние клейковинного комплекса, кислотность и число падения (табл. 2). Количество клейковины, ИДК и группа качества отражают функциональное состояние белковых веществ муки, тогда как кислотность и число падения дополняют характеристику её технологической пригодности. В данном разделе содержание протеина отдельно не приводится, поскольку основной акцент сделан на сформированной клейковине и показателях, непосредственно связанных с поведением муки в технологическом процессе.

Данные таблицы 2 показывают, что мука из зерна исследуемых сортов различалась по количеству и качеству клейковины. Наибольшее содержание клейковины установлено в муке сорта «Азиада» – 26,3%, тогда как у сортов «Кожа» и «Таза» данный показатель составил 23,9 и 23,0% соответственно.

Таблица 2

Характеристика качества муки исследуемых сортов тритикале

Показатель	Единица измерения	Мука из сорта		
		«Кожа»	«Таза»	«Азиада»
Количество клейковины	%	23,9 ± 0,4	23,0 ± 0,4	26,3 ± 0,4
ИДК	ед. прибора	75,4 ± 1,5	81,6 ± 1,5	76,5 ± 1,5
Группа качества	—	I	II	I
Характеристика клейковины	—	хорошая	удовлетворительно слабая	хорошая
Кислотность	град.	3,0 ± 0,1	2,4 ± 0,1	2,4 ± 0,1
Число падения	с	123 ± 5	101 ± 5	96 ± 5

По показателю ИДК более благоприятные значения отмечены для муки сортов «Кожа» и «Азиада» – 75,4 и 76,5 ед. прибора соответственно. Эти значения соответствуют I группе качества и характеризуют клейковину как хорошую. Мука сорта «Таза» имела более высокий показатель ИДК – 81,6 ед. прибора, относилась ко II группе качества и характеризовалась как удовлетворительно слабая, что указывает на менее устойчивое состояние белковых веществ.

Кислотность муки находилась в пределах 2,4–3,0 град. Число падения варьировало от 96 до 123 с; наиболее низкие значения отмечены для сортов «Азиада» и «Таза». В настоящем исследовании число падения рассматривается как дополнительная технологическая характеристика муки, тогда как основной акцент дальнейшего анализа направлен на оценку протеолитической и окислительно-восстановительной активности.

После характеристики качества муки был проведён анализ её протеолитической активности как одного из факторов, влияющих на состояние белковых веществ. Ферменты данной группы способны изменять прочность, упругость и устойчивость клейковинного комплекса. В связи с этим полученные значения сопоставляли с количеством клейковины и показателем ИДК, что позволило уточнить технологическую характеристику муки исследуемых сортов.

Таблица 3

Протеолитическая активность и показатели клейковины муки исследуемых сортов тритикале

Показатель	Единица измерения	Мука из сорта		
		«Кожа»	«Таза»	«Азиада»
Протеолитическая активность	усл. ед.	0,71 ± 0,05	0,76 ± 0,06	0,69 ± 0,04
Количество клейковины	%	23,9 ± 0,4	23,0 ± 0,4	26,3 ± 0,4
ИДК / группа качества	ед. прибора / группа	75,4 ± 1,5 / I	81,6 ± 1,5 / II	76,5 ± 1,5 / I
Характеристика клейковины	—	хорошая	удовлетворительно слабая	хорошая

Для наглядной оценки различий между сортами данные по протеолитической активности и показателю ИДК представлены на рисунке 1.

В графическом виде отражено соотношение ферментативной активности муки и качества клейковины, выраженного через индекс деформации.

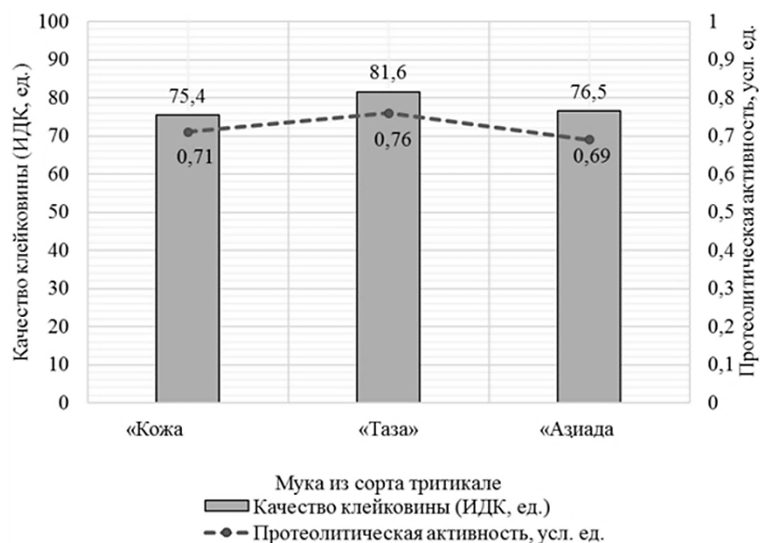


Рис. 1. Протеолитическая активность и показатель ИДК муки исследуемых сортов тритикале

Данные рисунка 1 показывают, что повышение протеолитической активности сопровождается увеличением показателя ИДК, что свидетельствует об ослаблении клейковинного комплекса. Наиболее выраженная зависимость отмечена у муки сорта «Таза», где максимальная протеолитическая активность – 0,76 усл. ед. – сочеталась с наиболее высоким значением ИДК – 81,6 ед. прибора. Это подтверждает значимость протеолитической активности как показателя, характеризующего состояние белкового комплекса и технологическую устойчивость тритикалевой муки.

Количество клейковины является одним из основных показателей, характеризующих белковую основу муки. Для наглядного представления различий между исследуемыми сортами данные по данному показателю приведены на рисунке 2.

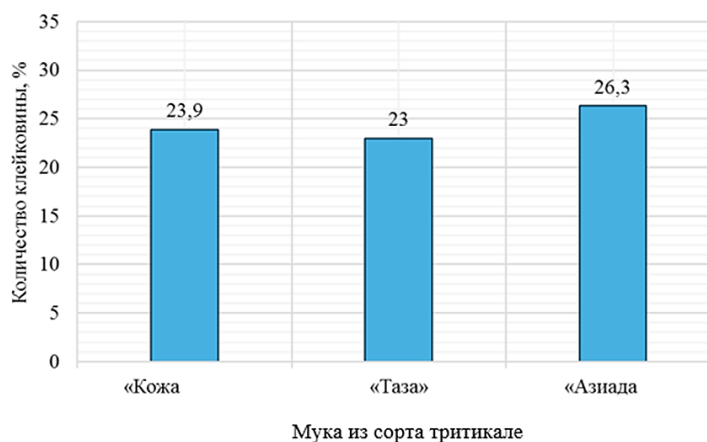


Рис. 2. Количество клейковины в муке исследуемых сортов тритикале

Как видно из рисунка 2, наибольшее количество клейковины установлено в муке сорта «Азиада» – 26,3%. У сортов «Кожа» и «Таза» данный показатель составил 23,9 и 23,0% соответственно. Полученные данные показывают, что количественное содержание клейковины не всегда определяет её качество, поэтому данный показатель необходимо рассматривать совместно с ИДК и протеолитической активностью.

Из данных таблицы 3 и рисунков 1 и 2 следует, что протеолитическая активность муки исследуемых сортов тритикале связана с состоянием клейковинного комплекса. Наибольшее значение установлено у сорта «Таза» – 0,76 усл. ед., что сопровождалось повышенным ИДК – 81,6 ед. прибора – и отнесением клейковины ко II группе качества. У сортов «Кожа» и «Азиада» данный показатель был ниже – 0,71 и 0,69 усл. ед. соответственно, при этом клейковина относилась к I группе. Полученные результаты позволяют рассматривать протеолитическую активность как информативный показатель технологической оценки тритикалевой муки.

Наряду с протеолитическими ферментами, влияющими преимущественно на состояние белкового комплекса, важное технологическое значение имеют окислительно-восстановительные ферменты. Они участвуют в окислении фенольных соединений и могут влиять на окраску муки, теста и мякиша готовых изделий. В связи с этим на следующем этапе исследования была проведена оценка активности пероксидазы и о-дифенолоксидазы как ферментов, связанных с окислительными процессами и возможным ферментативным потемнением продукта. Полученные данные представлены в таблице 4. Для наглядного представления различий между сортами активность пероксидазы и о-дифенолоксидазы отражена на рисунке 3.

Таблица 4

Активность окислительно-восстановительных ферментов муки
исследуемых сортов тритикале

Показатель	Единица измерения	Мука из сорта		
		«Кожа»	«Таза»	«Азиада»
Активность пероксидазы	усл. ед.	8,45 ± 0,35	9,15 ± 0,40	8,20 ± 0,30
о-Дифенолоксидаза	усл. ед.	0,58 ± 0,08	0,65 ± 0,09	0,61 ± 0,07

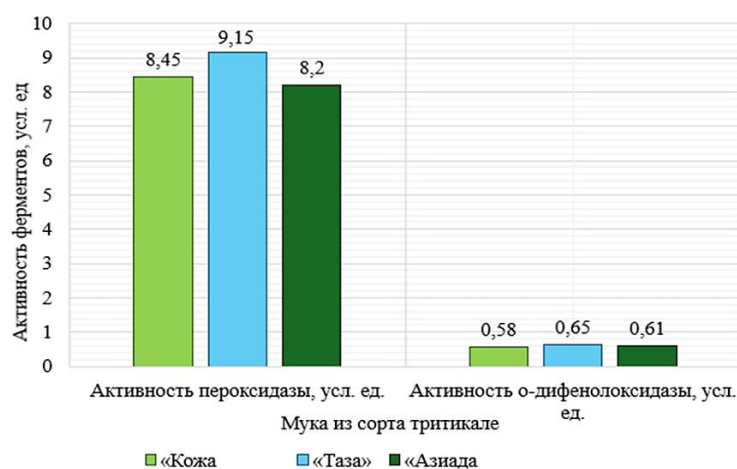


Рис. 3. Активность пероксидазы и о-дифенолоксидазы муки исследуемых сортов тритикале

Данные таблицы 4 и рисунка 3 показывают, что мука исследуемых сортов тритикале различалась по уровню активности окислительно-восстановительных ферментов. Наибольшая активность пероксидазы установлена у сорта «Таза» – $9,15 \pm 0,40$ усл. ед. У сортов «Қожа» и «Азиада» данный показатель был ниже и составил $8,45 \pm 0,35$ и $8,20 \pm 0,30$ усл. ед. соответственно.

Аналогичная тенденция отмечена по активности о-дифенолоксидазы. Максимальное значение выявлено у сорта «Таза» – $0,65 \pm 0,09$ усл. ед., тогда как у сортов «Азиада» и «Қожа» показатель составил $0,61 \pm 0,07$ и $0,58 \pm 0,08$ усл. ед. соответственно. Более высокая активность о-дифенолоксидазы у сорта «Таза» может указывать на повышенную склонность муки к окислительным превращениям фенольных соединений, что технологически важно при оценке вероятности потемнения мякиша готовых изделий.

Полученные результаты позволяют рассматривать окислительно-восстановительную активность как дополнительный показатель технологической оценки тритикалевой муки.

В сочетании с ранее установленной более высокой протеолитической активностью сорт «Таза» характеризуется наиболее выраженным ферментативным фоном, требующим технологического контроля. Мука сортов «Қожа» и «Азиада» проявила более умеренные значения активности указанных ферментов, что может рассматриваться как более благоприятный признак с позиции стабильности цвета и качества готовой продукции.

Полученные данные свидетельствуют о сортовой специфике окислительно-восстановительной активности тритикалевой муки. Наиболее выраженные значения активности пероксидазы и о-дифенолоксидазы отмечены у сорта «Таза», что указывает на большую интенсивность окислительных процессов и возможную склонность к изменению окраски мякиша. У сортов «Қожа» и «Азиада» данные показатели были ниже, что характеризует их как более стабильные по этому элементу ферментативного профиля.

Проведённые исследования позволили выявить сортовые различия ферментативного профиля муки казахстанских сортов тритикале «Қожа», «Таза» и «Азиада» и установить их связь с состоянием клейковинного комплекса. Комплексный анализ протеолитической и окислительно-восстановительной активности дополнил традиционные физико-химические показатели и дал возможность более объективно оценить технологическую пригодность исследуемой муки для хлебопекарного производства.

Анализ протеолитической активности муки (табл. 3, рис. 1) показал, что её наиболее высокое значение ($0,76$ усл. ед.) отмечено у сорта «Таза», который одновременно характеризовался наибольшим показателем ИДК ($81,6$ ед. прибора) и отнесением клейковины ко II группе качества (удовлетворительно слабая). У сортов «Қожа» и «Азиада» протеолитическая активность была ниже ($0,71$ и $0,69$ усл. ед. соответственно), а клейковина соответствовала I группе качества с более низкими значениями ИДК ($75,4$ и $76,5$ ед. прибора). Полученные данные согласуются с результатами Ghendov-Mosanu и соавторов [1], которые показали, что повышенная протеолитическая активность в тритикалевой муке является одной из основных причин ослабления клейковинного каркаса и снижения формоудерживающей способности теста.

Для количественной оценки взаимосвязей между показателями нами была построена матрица коэффициентов корреляции Пирсона (рис. 4).

Установлена сильная положительная корреляция между протеолитической активностью и ИДК ($r = 0,88$), что свидетельствует о прямом влиянии протеаз на деструкцию белковых веществ и увеличение деформируемости клейковины. Кроме того, выявлена отрицательная связь протеолитической активности с количеством клейковины ($r = -0,62$), а также ИДК с количеством клейковины ($r = -0,71$).

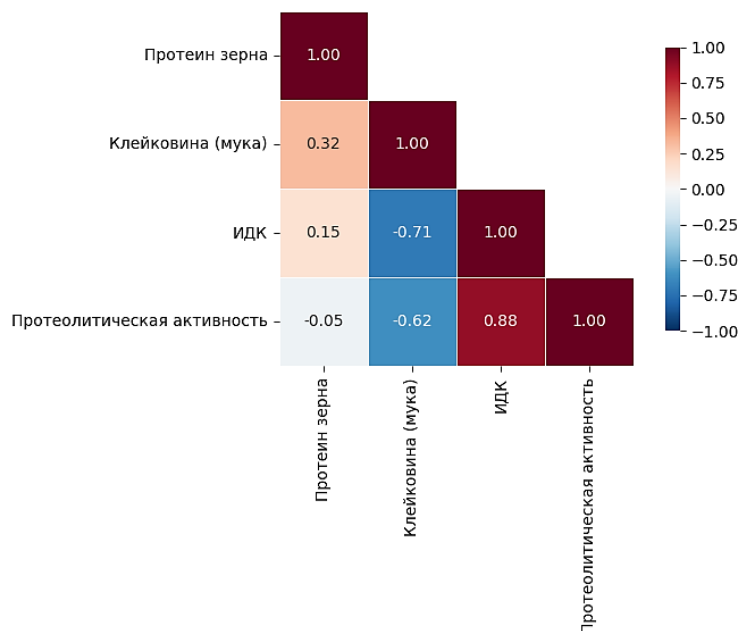


Рис. 4. Матрица коэффициентов корреляции Пирсона между показателями качества зерна и муки тритикале (синим цветом обозначена положительная корреляция, красным/оранжевым – отрицательная)

Эти данные подтверждают, что избыточный протеолиз не только ухудшает качество клейковины, но и может снижать её выход при отмывании. Содержание протеина в зерне, напротив, не показало значимой корреляции с ферментативными показателями ($r = -0,05$ с протеолитической активностью и $r = 0,15$ с ИДК), что указывает на независимость протеиназной активности от валового содержания белка. Данный факт ранее отмечался Kaszuba и соавторами [2], которые подчеркивали, что для зерна тритикале более важна не общая белковость, а сбалансированность белково-протеиназного комплекса.

Для наглядного сравнения трёх сортов по комплексу ферментативных показателей мы построили радарную диаграмму нормализованных значений (рис. 5). Этот график позволяет визуальнo оценить «ферментативный портрет» каждого сорта относительно максимального уровня активности по каждому ферменту. Сорт «Таза» занимает лидирующие позиции по всем трём показателям: 100% по протеолитической активности, пероксидазе и о-дифенолоксидазе. Сорта «Кожа» и «Азиада» имеют близкие, но более низкие нормализованные значения (90–94%). Такая дифференциация указывает на то, что сорт «Таза» обладает наиболее выраженным ферментативным фоном, что может создавать технологические риски при переработке без дополнительной коррекции.

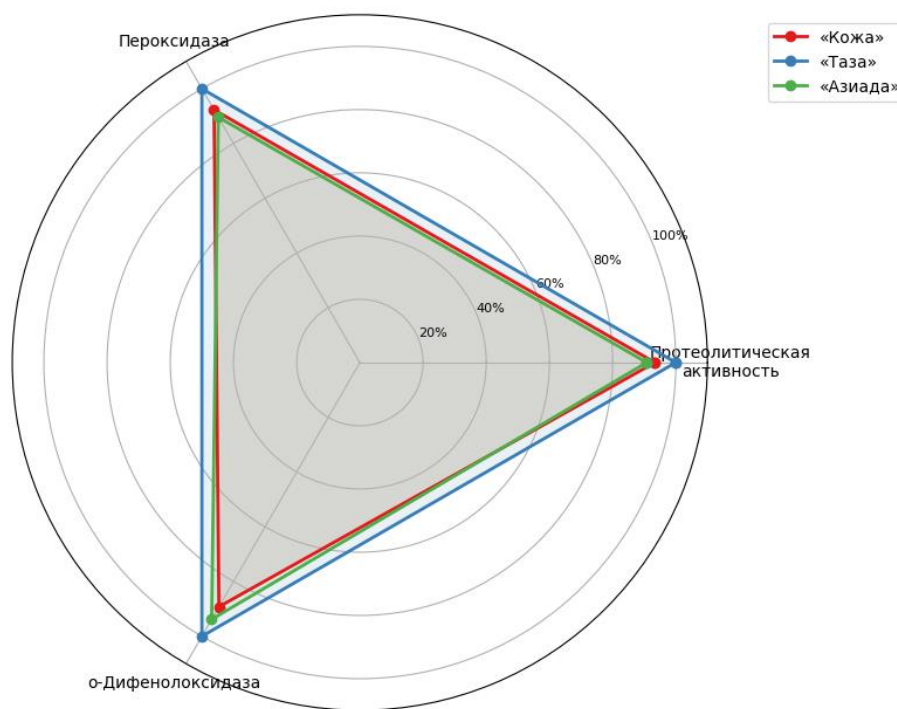


Рис. 5. Нормализованный профиль ферментативной активности муки сортов тритикале (значения переведены в проценты от максимума по каждому ферменту)

Полученные результаты согласуются с данными Messina и соавторов [3], которые показали, что сорта тритикале с повышенной ферментативной активностью требуют применения заквасок или ферментных препаратов для стабилизации реологических свойств теста. В нашем исследовании именно сорт «Таза» с максимальной протеолитической активностью также проявил наибольшие значения пероксидазы и о-дифенолоксидазы, что делает его наиболее «ферментативно нагруженным» среди изученных.

Оценка окислительно-восстановительных ферментов (табл. 4, рис. 3) показала, что активность пероксидазы варьировала от 8,20 до 9,15 усл. ед., а о-дифенолоксидазы – от 0,58 до 0,65 усл. ед. Наиболее высокие значения обоих ферментов также отмечены у сорта «Таза». С технологической точки зрения повышенная активность о-дифенолоксидазы имеет двойственное значение. С одной стороны, она может способствовать укреплению клейковины за счёт окислительной сшивки белковых молекул, как отмечают Harisha и соавторы [5]. С другой стороны, избыточная активность этого фермента приводит к окислению фенольных соединений с образованием темноокрашенных продуктов – меланинов, что ухудшает цвет мякиша готовых изделий. Filip и соавторы [4] также подчеркивают, что для хлебопекарной муки предпочтительна умеренная активность полифенолоксидаз.

В нашем исследовании сорт «Таза» с максимальной активностью о-дифенолоксидазы (0,65 усл. ед.) может быть склонен к ферментативному потемнению, особенно при длительном стоянии теста или использовании гидротермической обработки. Мука сортов «Кожа» (0,58 усл. ед.) и «Азиада» (0,61 усл. ед.) имеет более низкие значения, что делает их предпочтительными

для производства хлебобулочных изделий с высокими требованиями к цвету мякиша.

Хотя основной акцент исследования был направлен на протеолиз и окислительно-восстановительные ферменты, показатель числа падения (табл. 2) предоставляет важную информацию об амилалитической активности. Наиболее низкое число падения отмечено у сорта «Азиада» (96 с), затем у «Таза» (101 с) и наиболее высокое – у «Кожа» (123 с). Низкое число падения (менее 100 с) свидетельствует о высокой активности α -амилазы, что может приводить к избыточному гидролизу крахмала, липкости мякиша и снижению формоустойчивости хлеба.

Для выявления возможной взаимосвязи между протеолитической и амилалитической активностью мы построили точечную диаграмму зависимости числа падения от протеолитической активности (рис. 6). Наблюдается тенденция к снижению числа падения при повышении уровня протеолиза, хотя связь не является строго линейной ($R^2 = 0,33$). Наиболее низкое число падения (96 с) зафиксировано у сорта «Азиада» при умеренной протеолитической активности (0,69 усл. ед.), тогда как сорт «Таза» с максимальной ПА (0,76 усл. ед.) имеет число падения 101 с. Это может указывать на то, что в разных сортах активация протеолитических и амилалитических ферментов не всегда сопряжена и может регулироваться независимо. Galoburda и соавторы [6] отмечали, что для тритикале характерна одновременная активация нескольких гидролаз при прорастании или стрессовых условиях возделывания, что требует комплексного контроля.

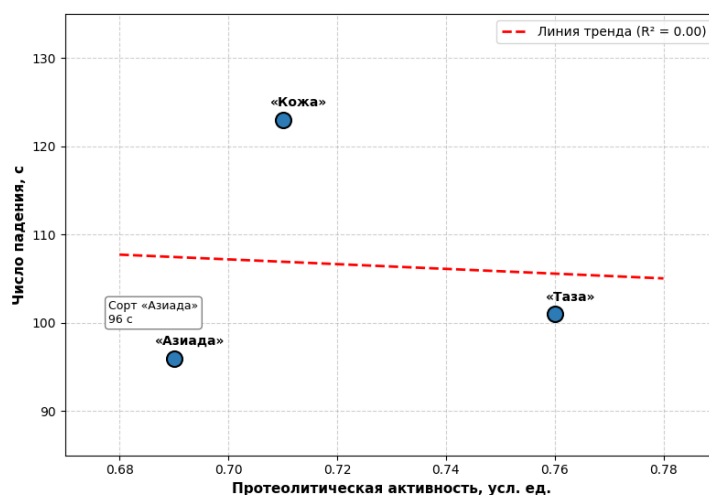


Рис. 6. Взаимосвязь протеолитической активности и числа падения муки тритикале

Интеграция полученных данных позволяет сформулировать дифференцированные рекомендации по использованию исследуемых сортов:

– сорт «Таза» характеризуется наиболее выраженным ферментативным фоном (максимальная протеолитическая, пероксидазная и о-дифенолоксидазная активность) при удовлетворительно слабой клейковине (II группа). Данный сорт рекомендуется использовать в смеси с пшеничной мукой сильной или улучшенной клейковиной, а также применять технологические

приёмы, снижающие активность ферментов (кратковременный замес, кислотосодержащие добавки, термическая обработка муки);

– сорт «Азиада» имеет наибольшее количество клейковины (26,3%) с хорошим качеством (I группа), умеренную протеолитическую активность (0,69 усл. ед.), но самое низкое число падения (96 с). Это указывает на высокую амилолитическую активность. При использовании данного сорта целесообразно вносить улучшители, стабилизирующие крахмал (например, ферментные препараты с амилазной активностью регулирующего действия), или применять заварные технологии;

– сорт «Қожа» проявляет наиболее сбалансированный ферментативный профиль: умеренная протеолитическая активность (0,71 усл. ед.), хорошая клейковина I группы, наиболее высокое число падения (123 с) и умеренные значения окислительно-восстановительных ферментов. Этот сорт можно рекомендовать для самостоятельного хлебопекарного использования без существенной технологической коррекции.

Полученные результаты хорошо согласуются с современными представлениями о технологической оценке тритикалевой муки. Kaszuba и соавторы [2] показали, что для тритикале характерна более слабая клейковина по сравнению с пшеницей, и ключевую роль в этом играет повышенная активность эндогенных протеиназ. Наши данные подтверждают этот вывод: даже при высоком содержании клейковины (26,3% у сорта «Азиада») её качество может быть снижено при активации протеолиза.

Messina и соавторы [3] и Galoburda и соавторы [6] отмечали эффективность применения заквасок для стабилизации тритикалевого теста. Согласно нашим результатам, наиболее остро в такой стабилизации нуждается сорт «Таза» с максимальной ферментативной активностью. Для сортов «Қожа» и «Азиада» могут быть достаточны более мягкие технологические приёмы.

Narisha и соавторы [5] подчеркивают необходимость контроля полифенолоксидазной активности для сохранения цвета продуктов из нетрадиционных видов муки. Наши данные показывают, что у сорта «Таза» активность о-дифенолоксидазы максимальна (0,65 усл. ед.), что должно учитываться при производстве хлебобулочных изделий с длительным циклом приготовления.

Следует отметить, что в работе оценивалась суммарная протеолитическая активность при pH 4,7, что соответствует кислой среде, характерной для брожения теста. Однако в зерне тритикале могут присутствовать протеиназы с различным оптимумом pH (нейтральные и щелочные), что требует дальнейших исследований. Кроме того, активность о-дифенолоксидазы оценивалась по одному субстрату (дигидроксифенилаланину), тогда как специфичность фермента может варьировать в зависимости от сорта.

Перспективным направлением является изучение влияния технологических факторов (влажности, температуры, продолжительности брожения) на ферментативную активность тритикалевой муки, а также разработка сортоспецифических рекомендаций по применению ферментных препаратов и улучшителей.

Заключение. В результате проведённых исследований установлены существенные сортовые различия протеолитической и окислительно-восстановительной активности муки казахстанских сортов тритикале «Қожа», «Таза» и «Азиада». Показано, что ферментативный профиль муки тесно связан

с состоянием клейковинного комплекса и может служить дополнительным критерием технологической оценки при хлебопекарном использовании данного сырья.

Протеолитическая активность муки варьировала от 0,69 до 0,76 усл. ед. Наиболее высокое значение отмечено у сорта «Таза» ($0,76 \pm 0,06$ усл. ед.), что сопровождалось максимальным показателем ИДК ($81,6 \pm 1,5$ ед. прибора) и отнесением клейковины ко II группе качества (удовлетворительно слабая). У сортов «Қожа» и «Азиада» протеолитическая активность была ниже ($0,71 \pm 0,05$ и $0,69 \pm 0,04$ усл. ед. соответственно), а клейковина соответствовала I группе качества. Корреляционный анализ подтвердил сильную положительную связь между протеолитической активностью и ИДК ($r = 0,88$), что доказывает роль протеолиза в ослаблении клейковинного каркаса.

Окислительно-восстановительная активность также проявила сортовую специфику. Максимальные значения пероксидазы и о-дифенолоксидазы установлены у сорта «Таза» ($9,15 \pm 0,40$ и $0,65 \pm 0,09$ усл. ед. соответственно). Сорта «Қожа» и «Азиада» характеризовались более низкими значениями данных ферментов. Повышенная активность о-дифенолоксидазы у сорта «Таза» указывает на возможный риск ферментативного потемнения мякиша готовых изделий, что требует технологического контроля.

На основе полученных данных сформулированы дифференцированные рекомендации. Сорт «Қожа» (протеолитическая активность 0,71 усл. ед., ИДК 75,4 ед., число падения 123 с, умеренные окислительно-восстановительные ферменты) пригоден для самостоятельного хлебопекарного использования. Сорт «Азиада» (клейковина 26,3%, ИДК 76,5 ед., протеолитическая активность 0,69 усл. ед., но низкое число падения 96 с) требует контроля амилолитической активности. Сорт «Таза» (протеолитическая активность 0,76 усл. ед., ИДК 81,6 ед., максимальные пероксидаза и о-дифенолоксидаза, число падения 101 с) нуждается в комплексной технологической коррекции: смешении с сильной пшеничной мукой, применении кислотосодержащих добавок или заквасок.

Таким образом, протеолитическая и окислительно-восстановительная активность являются информативными показателями технологической оценки тритикалевой муки, а выявленные сортовые различия обосновывают необходимость дифференцированного подхода к использованию казахстанских сортов тритикале в хлебопекарном производстве.

Список литературы

1. Ghendov-Mosanu A., Popa N., Paiu S., Boestean O., Bulgaru V., Leatamborg S., Lupascu G., Codină G.G. Breadmaking Quality Parameters of Different Varieties of Triticale Cultivars // Foods. – 2024. – Vol. 13, No. 11. – Art. 1671. – DOI: 10.3390/foods13111671.
2. Kaszuba J., Woś H., Shchipak G.V. Bread making quality parameters of some Ukrainian and Polish triticale cultivars // Euphytica. – 2024. – Vol. 220. – Art. 17. – DOI: 10.1007/s10681-023-03272-4.
3. Messina V., Cano J., Silvio A., Pattison A.L., Roberts T.H. Wholegrain triticale sourdough: Effects of triticale: wheat flour ratio on physical, nutritional, and sensory characteristics // Food Science & Nutrition. – 2024. – Vol. 12, No. 6. – P. 3910–3919. – DOI: 10.1002/fsn3.4050.
4. Filip E., Woronko K., Stępniewska A., Czernik-Kruczek K. An Overview of Factors Affecting the Functional Quality of Common Wheat (*Triticum aestivum* L.) // International Journal of Molecular Sciences. – 2023. – Vol. 24, No. 9. – Art. 8165. – DOI: 10.3390/ijms24098165.

5. Lee Y., Kang J., Hwang J., Shin D.-M., Han S.G., Yoon Y. Elucidating the effects on polyphenol oxidase activity and allelic variation of polyphenol oxidase genes on dough and whole wheat-derived product color parameters // International Journal of Food Properties. – 2023. – Vol. 26, No. 2. – P. 2716–2731. – DOI: 10.1080/10942912.2023.2244690.
6. Galoburda R., Straumite E., Sabovics M., Kruma Z. Dynamics of Volatile Compounds in Triticale Bread with Sourdough: From Flour to Bread // Foods. – 2020. – Vol. 9, No. 12. – Art. 1837. – DOI: 10.3390/foods9121837.
7. ГОСТ 13586.5–2015. Зерно. Метод определения влажности [Текст]. – Введ. 01.07.2016. – М. : Стандартинформ, 2016. – 12 с.
8. ГОСТ 10846–91. Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка [Текст]. Введ. 01.06.93. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 6 с.
9. ГОСТ 10840–2017. Зерно. Метод определения натурности [Текст]. – Введ. 01.01.2019. – М. : Стандартинформ, 2018. – 12 с.
10. ГОСТ ISO 520–2014. Зерновые и бобовые. Определение массы 1000 зерен [Текст]. – Введ. 01.07.2015. – М. : Стандартинформ, 2015. – 12 с.
11. ГОСТ 10987–76. Зерно. Методы определения стекловидности [Текст]. – Введ. 01.06.77. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2001. – 6 с.
12. ГОСТ 27839–2013. Мука пшеничная. Методы определения количества и качества клейковины [Текст]. – Введ. 01.07.2014. – М. : Стандартинформ, 2014. – 16 с.
13. Gegechkori V., Shatilina A., Shchepochkina O., Ramenskaya G. Proposal of the method for quantitative determination of proteolytic activity of a pancreatin reference standard // Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry. – 2023. – P. 25–31. – DOI: 10.29296/25877313-2023-12-03.
14. Ермаков, А.И. Методы биохимического исследования растений [Текст] / А.И. Ермаков, В.В. Арасимович, М.И. Смирнова-Иконникова. – Л. : Агропромиздат, 1987. – 430 с.
15. Мерзляк, М.Н. Активность полифенолоксидазы в растениях [Текст] / М.Н. Мерзляк, В.И. Яценко // Физиология растений. – 1985. – Т. 32, № 4. – С. 800–806.

Исследования выполнены в рамках проекта BR22886613 «Разработка инновационных технологий по переработке и хранению сельскохозяйственной растениеводческой продукции и сырья» (проект №9-2024/2026 «Разработка инновационной технологии хранения и переработки различных сортов тритикале в высокоэффективную продукцию зерноперерабатывающей отрасли», профинансированного Комитетом науки МНВО РК.

Материал поступил в редакцию 18.08.26, принят 18.09.26.

Н. Онгарбаева¹, А.И. Изтаев¹, Е.Н. Урбанчик², М.А. Якияева¹, Н.К. Акишев³

¹Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан

²Беларусь мемлекеттік тамақ және химиялық технологиялар университеті,
Могилев, Беларусь Республикасы

³Назарбаев университеті, Астана, Қазақстан

ҚАЗАҚ ТРИТИКАЛЕ СОРТТАРЫНЫҢ ҰНЫНЫҢ ОНЫ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ БАҒАЛАУДАҒЫ ФАКТОР РЕТІНДЕ ПРОТЕОЛИТИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ТОТЫҒУ-ТОТЫҚСЫЗДАНУ БЕЛСЕНДІЛІГІ

Аңдатпа. Тритикале Қазақстанның нан пісіру өнеркәсібі үшін перспективалы астық шикізаты болып табылады. Зерттеудің мақсаты – «Қожа», «Таза» және «Азиада»

сорттарының ұнының протеолитикалық және тотығу-тотықсыздану белсенділігін және олардың клейковина кешенінің күйімен байланысын бағалау. Астықтың ылғалдылығы, протеин мөлшері, шынылығы, табиғи массасы, ал ұнда клейковинаның мөлшері мен сапасы (ИДК), протеолитикалық белсенділік (Ансон әдісі), пероксидаза және о-дифенолоксидаза белсенділігі спектрофотометриялық әдіспен анықталды. Орташа мәндер, стандартты ауытқулар және Пирсон корреляция коэффициенттері есептелді. «Азиада» сорты клейковинаның ең жоғары мөлшерімен (26,3%) сипатталды, ал «Таза» сортында протеолитикалық белсенділік (0,76 шартты бірлік), пероксидаза (9,15 шартты бірлік) және о-дифенолоксидаза (0,65 шартты бірлік) белсенділігі ең жоғары болды, сондай-ақ клейковина сапасы ең төмен (ИДК 81,6 бірлік, II топ) болды. «Қожа» және «Азиада» сорттарында протеолитикалық белсенділік тиісінше 0,71 және 0,69 шартты бірлікті құрады. Протеолитикалық белсенділік пен ИДК арасында күшті оң корреляция ($r = 0,88$), ал клейковина мөлшерімен теріс корреляция ($r = -0,71$) анықталды. Ферменттердің белсенділігі ұнды технологиялық бағалаудың ақпараттық критерийі болып табылады.

Түйінді сөздер: тритикале, тритикале ұны, қазақ сорттары, протеолитикалық белсенділік, пероксидаза, о-дифенолоксидаза, глютен кешені, ҚДӨ, технологиялық бағалау.

N. Ongarbayeva¹, A.I. Iztayev¹, A.N. Ourbantchik², M.A. Yakiyayeva¹, N.K. Akishev³

¹Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan

²Belarusian State University of Food and Chemical Technologies,
Mogilev, Republic of Belarus

³Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan

PROTEOLYTIC AND OXIDATION-REDUCTION ACTIVITY OF FLOUR OF KAZAKH TRITICALE VARIETIES AS A FACTOR IN ITS TECHNOLOGICAL EVALUATION

Abstract. Triticale is a promising grain raw material for the baking industry in Kazakhstan. The study aimed to assess the proteolytic and redox activity of flour from the 'Kozha', 'Taza', and 'Aziada' varieties and their relationship with the state of the gluten complex. Grain moisture, protein content, vitreousness, and test weight were determined, while flour was analyzed for gluten content and quality (IDK), proteolytic activity (Anson method), and peroxidase and o-diphenol oxidase activity using a spectrophotometric method. Mean values, standard deviations, and Pearson correlation coefficients were calculated. The 'Aziada' variety had the highest gluten content (26.3%), whereas 'Taza' showed the highest proteolytic activity (0.76 conventional units), peroxidase activity (9.15 conventional units), and o-diphenol oxidase activity (0.65 conventional units), as well as the lowest gluten quality (IDK 81.6 units, Group II). Proteolytic activity in the 'Kozha' and 'Aziada' varieties was 0.71 and 0.69 conventional units, respectively. A strong positive correlation was found between proteolytic activity and IDK ($r = 0.88$), while a negative correlation was observed with gluten content ($r = -0.71$). Enzyme activity is an informative criterion for the technological evaluation of flour.

Keywords: triticale, triticale flour, Kazakh varieties, proteolytic activity, peroxidase, o-diphenol oxidase, gluten complex, GSG, technological assessment.

References

1. Ghendov-Mosanu A., Popa N., Paiu S., Boestean O., Bulgaru V., Leatamborg S., Lupascu G., Codină G.G. Breadmaking Quality Parameters of Different Varieties of Triticale Cultivars // Foods. – 2024. – Vol. 13, No. 11. – Art. 1671. – DOI: 10.3390/foods13111671.

2. Kaszuba J., Woś H., Shchipak G.V. Bread making quality parameters of some Ukrainian and Polish triticale cultivars // *Euphytica*. – 2024. – Vol. 220. – Art. 17. – DOI: 10.1007/s10681-023-03272-4.
3. Messina V., Cano J., Silvio A., Pattison A.L., Roberts T.H. Wholegrain triticale sourdough: Effects of triticale: wheat flour ratio on physical, nutritional, and sensory characteristics // *Food Science & Nutrition*. – 2024. – Vol. 12, No. 6. – P. 3910–3919. – DOI: 10.1002/fsn3.4050.
4. Filip E., Woronko K., Stępniewska A., Czernik-Kruczek K. An Overview of Factors Affecting the Functional Quality of Common Wheat (*Triticum aestivum* L.) // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2023. – Vol. 24, No. 9. – Art. 8165. – DOI: 10.3390/ijms24098165.
5. Lee Y., Kang J., Hwang J., Shin D.-M., Han S.G., Yoon Y. Elucidating the effects on polyphenol oxidase activity and allelic variation of polyphenol oxidase genes on dough and whole wheat-derived product color parameters // *International Journal of Food Properties*. – 2023. – Vol. 26, No. 2. – P. 2716–2731. – DOI: 10.1080/10942912.2023.2244690.
6. Galoburda R., Straumite E., Sabovics M., Kruma Z. Dynamics of Volatile Compounds in Triticale Bread with Sourdough: From Flour to Bread // *Foods*. – 2020. – Vol. 9, No. 12. – Art. 1837. – DOI: 10.3390/foods9121837.
7. GOST 13586.5–2015. Zerno. Metod opredeleniya vlazhnosti [Grain. Method for determination of moisture content]. – Introduced 01.07.2016. – Moscow: Standartinform, 2016. – 12 p. [in Russian].
8. GOST 10846–91. Zerno i produkty ego pererabotki. Metod opredeleniya belka [Grain and products of its processing. Method for determination of protein]. – Introduced 01.06.1993. – Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 2002. – 6 p. [in Russian].
9. GOST 10840–2017. Zerno. Metod opredeleniya natury [Grain. Method for determination of test weight]. – Introduced 01.01.2019. – Moscow: Standartinform, 2018. – 12 p. [in Russian].
10. GOST ISO 520–2014. Zernovye i bobovye. Opredelenie massy 1000 zeren [Cereals and pulses. Determination of the mass of 1000 grains]. – Introduced 01.07.2015. – Moscow: Standartinform, 2015. – 12 p. [in Russian].
11. GOST 10987–76. Zerno. Metody opredeleniya steklovidnosti [Grain. Methods for determination of vitreousness]. – Introduced 01.06.1977. – Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 2001. – 6 p. [in Russian].
12. GOST 27839–2013. Muka pshenichnaya. Metody opredeleniya kolichestva i kachestva kleykoviny [Wheat flour. Methods for determination of quantity and quality of gluten]. – Introduced 01.07.2014. – Moscow: Standartinform, 2014. – 16 p. [in Russian].
13. Gegechkori V., Shatilina A., Shchepochkina O., Ramenskaya G. Proposal of the method for quantitative determination of proteolytic activity of a pancreatic reference standard // *Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*. – 2023. – P. 25–31. – DOI: 10.29296/25877313-2023-12-03.
14. Ermakov A.I., Arasimovich V.V., Smirnova-Ikonnikova M.I. Metody biokhimicheskogo issledovaniya rasteniy [Methods of biochemical research of plants]. – Leningrad: Agropromizdat, 1987. – 430 p. [in Russian].
15. Merzlyak M.N., Yatsenko V.I. Aktivnost' polifenoloksidazy v rasteniyakh [Polyphenol oxidase activity in plants] // *Plant Physiology*. – 1985. – Vol. 32, No. 4. – P. 800–806. [in Russian].