Оригинальная статья / Original article
УДК 664.6, 577.151
DOI: https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-3-439-449

Влияние низкотемпературной обработки на активность протеолитических ферментов различных видов муки

© С.В. Китаевская, О.А. Решетник

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Резюме: *Целью работы являлось изучение влияния низкотемпературной обработки на активность протеолитических ферментов различных видов и сортов муки. Настоящее исследование позволило более глубоко представить комплекс механизмов, вызывающих изменение биотехнологических процессов в тестовых полуфабрикатах при низкотемпературном хранении. Результаты исследования по влиянию длительного низкотемпературного воздействия на активность протеолитических ферментов различных видов муки показали, что исследуемый параметр зависит от pH среды, а также видовой принадлежности муки. При низкотемпературном хранении наблюдается тенденция к понижению активности кислых протеаз как традиционных, так и нетрадиционных для хлебопечения видов муки в среднем на 10%. Активность слабокислых и слабощелочных протеаз под действием отрицательных температур при хранении зависит от вида исследуемой муки. По мере увеличения продолжительности низкотемпературного воздействия протеолитическая активность полбяной, пшеничной и гречневой муки при pH=5,5 снижается в среднем на 20, 12,5 и 18% соответственно, тогда как ржаной и овсяной, напротив, увеличивается на 12 и 28% соответственно. Под влиянием замораживания и в ходе низкотемпературного хранения происходит прирост активности слабощелочных протеаз всех исследуемых видов и сортов муки на 15,9%, за исключением гречневой, протеолитическая активность которой по мере хранения снижается в 1,5–2 раза. Установлено, что наибольшую стойкость к длительному хранению в замороженном виде проявляют протеолитические ферменты кукурузной муки. Знание о степени влияния низкотемпературной обработки на активность протеолитических ферментов позволит прогнозировать реологические свойства тестовых полуфабрикатов, структурно-механические и органолептические характеристики готовой продукции, а также более грамотно подойти к разработке рецептур и технологических параметров тестоприготовления нового ассортимента хлебобулочных изделий на основе замороженных полуфабрикатов как из традиционных, так и нетрадиционных для хлебопечения видов муки.*

Ключевые слова: *мука, замороженные полуфабрикаты, низкотемпературное хранение, протеолитическая активность, хлебобулочные изделия*

Информация о статье: *Дата поступления 6 декабря 2019 г.; дата принятия к печати 31 августа 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 сентября 2020 г.*

Для цитирования: Китаевская С.В., Решетник О.А. Влияние низкотемпературной обработки на активность протеолитических ферментов различных видов муки. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология.* 2020. Т. 10. N 3. С. 439–449. https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-3-439-449

Effects of low-temperature treatment on the activity of proteolytic enzymes in various flour types

Svetlana V. Kitaevskaya, Olga A. Reshetnik

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation

Abstract: *This work was aimed at investigating effects of low-temperature processing on the activity of proteolytic enzymes in various flour types. This study allowed an improved understanding of the mechanisms that change biotechnological processes in semi-finished dough products during low-temperature storage. The study of the effect of long-term low-temperature exposure on the activity of proteolytic enzymes in various flour types showed that this parameter depends on the medium pH, as well as on the flour type. During low-temperature storage, the activity of acid proteases tend to decrease by, on average, 10% in both traditional and non-traditional types of flour used for baking. The activity of weakly acidic and weakly alkaline proteases under the influence of low temperatures during storage depends on the flour type. At pH = 5.5, an increase in the duration of low-temperature exposure leads to a decrease in the proteolytic activity of spelt,*

wheat and buckwheat flour by, on average, 20, 12.5, and 18%, respectively. Conversely, this parameter increases in rye and oat flour by 12 and 28%, respectively. Under the influence of freezing and during low-temperature storage, the activity of weakly alkaline proteases in all studied flour types increases by 15.9%, except for buckwheat, the proteolytic activity of which decreases by 1.5–2 times during storage. It was established that proteolytic enzymes of corn flour exhibit the greatest resistance to long-term storage in a frozen form. Knowledge of the effect of low-temperature processing on the activity of proteolytic enzymes is important for predicting the rheological properties of semi-finished dough products and structural-mechanical and organoleptic characteristics of finished products. In addition, this knowledge facilitates the development of recipes and technological parameters for producing new bakery products based on frozen semi-finished products from traditional and non-traditional flour types.

Keywords: *flour, frozen semi-finished products, low-temperature storage, proteolytic activity, bakery products*

Information about the article: *Received December 6, 2019; accepted for publication August 31, 2020; available online September 30, 2020.*

For citation: Kitaevskaya SV, Reshetnik OA. Effects of low-temperature treatment on the activity of proteolytic enzymes in various flour types. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology.* 2020;10(3):439–449. (In Russian) https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-3-439-449

ВВЕДЕНИЕ

Большое внимание сегодня уделяется промышленному использованию достижений криотехнологии в производстве продуктов питания, при этом значительная доля рынка замороженных продуктов приходится на тестовые полуфабрикаты. Во всем мире выпускается широкий ассортимент замороженных полуфабрикатов из пшеничной муки, в нашей стране ведутся исследования по разработке и совершенствованию криотехнологии ржаных и ржано-пшеничных изделий [1–3].

Как отмечают специалисты, при использовании криотехнологии в хлебопечении возникает ряд проблем, которые связаны с нарушением хода биотехнологических процессов, протекающих на стадиях замеса и брожения теста. Длительное воздействие процессов замораживания и хранения тестовых полуфабрикатов в замороженном виде приводит к снижению качества дефростированных полуфабрикатов и готовых изделий из них [4–11]. Многие отечественные и зарубежные исследователи в данной области связывают это с гибелью дрожжей и молочнокислых бактерий – основных участников процесса брожения [4–6, 12–15], в связи с чем предлагаются различные биотехнологические решения названной проблемы [1, 2, 14, 16–21]. Однако в основе процессов брожения теста и формирования качественных показателей хлебобулочных изделий лежат также каталитические превращения компонентов муки под воздействием ферментов протеолитического и амилолитического действия. Протеолитические ферменты муки играют важную роль в процессах созревания тестовых полуфабрикатов, в частности, оказывают влияние на протекание биохимических процессов при брожении теста, определяют его реологические свойства, структурно-механические и органолептические характеристики хлебобулочных изделий.

Протеиназы пшеничной и ржаной муки расщепляют белки по пептидным связям, их относят к протеолитическим ферментам типа папаиназ, для которых характерна способность активироваться соединениями восстанавливающего действия, например, соединениями, содержащими сульфгидрильную группу – SH (цистеин, глютатион), и инактивироваться окислителями, такими как бромат калия, перекись водорода, кислород воздуха и др. [20].

Начальной формой действия протеиназы является дезагрегация белка, нарушение его четвертичной и третичной структур. Действие протеиназы на клейковину и тесто приводит к сильному их разжижению, понижению упругости и увеличению текучести. Принято считать, что протеиназа зерен пшеницы имеет зону оптимума кислотности в пределах pH = 4–5,5 и температурный оптимум около 45 °C. Однако существенную роль могут играть и нейтральные протеиназы с оптимумом pH = 6,75. Оптимальные значения pH для действия протеиназы ржаной муки лежат в пределах 4,0–5,0 [20].

В настоящее время достаточно хорошо изучен белково-протеиназный комплекс пшеничной и ржаной муки, проводятся исследования по изучению фракционного состава белков и определению активности протеаз овсяной, полбяной, кукурузной, ячменной, тритикалевой и других видов муки. Интерес ученых к данным нетрадиционным для хлебопечения видам муки вызван их высокой пищевой ценностью. Особое внимание исследователей привлекают цельнозерновые виды муки, которые отличаются высоким содержанием пищевых волокон, витаминов, минеральных веществ и аминокислот.

Низкотемпературное воздействие на тестовые полуфабрикаты вызывает укрепление их клейковинного каркаса, при этом тесто теряет эластич-

ность и становится малорастяжимым. Однако при длительном хранении тестовых полуфабрикатов в замороженном виде может произойти и перекристаллизация льда, приводящая к механическому разрушению и ослаблению структуры клейковины. Таким образом, криообработка тестовых полуфабрикатов отрицательно влияет на реологические характеристики теста, что в свою очередь приводит к снижению качественных показателей готовых изделий, в частности, ухудшаются структурно-механические свойства мякиша, снижается пористость и удельный объем хлеба [4–9].

В научно-технической литературе практически отсутствует информация о влиянии отрицательных температур на активность ферментов муки и тестовых полуфабрикатов, вырабатываемых на основе криотехнологии, за исключением работ отечественных ученых, где представлены данные об изменении активности протеолитических ферментов в замороженных полуфабрикатах для булочных изделий из пшеничной муки. Настоящее исследование восполняет этот пробел и позволяет более глубоко представить комплекс механизмов, приводящих к изменению биотехнологических процессов в тестовой среде после криообработки. Целью настоящей работы явилось исследование влияния низкотемпературной обработки на активность протеолитических ферментов различных видов и сортов муки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами исследования служили традиционные и нетрадиционные для массового производства хлебобулочных изделий виды и сорта муки, характеристика которых приведена в табл. 1.

Муку перемешивали с водой комнатной температуры и замешивали модельное тесто влажностью 40%, после замеса тесто сразу же разделывали на куски массой 100 г и подвергали низкотемпературной обработке в шкафу шоковой заморозки марки Apach SH03 при температуре минус 25–30 °С. Образцы теста в замороженном виде хранили в течение 4-х недель. Дефростацию проводили при комнатной температуре до достижения температуры в центре образцов 18 °С.

Для выделения протеаз из опытных образцов использовали физиологический раствор с концентрацией NaCl 1%, для чего 10 г теста помещали в керамическую ступку и тщательно растирали с добавлением солевого раствора, а после перемещали в колбу объемом 100 мл. Введение раствора проводили порционно, учитывая при этом потерю влаги заготовками во время замораживания и дефростации, а также содержание влаги в заготовках. Суспензию тщательно перемешивали и выдерживали при температуре 4 °С в течение одного часа для экстракции ферментов. Осадок отделяли центрифугированием в течение 10 мин при 7000 об./мин. Полученную надосадочную жидкость использовали для определения суммарной протеолитической активности объектов исследования. Активность протеаз оценивали методом Ансона, о протеолитической активности судили по количеству высвободившегося тирозина, накопившегося за 1 ч под действием протеаз муки в расчете на 1 мг белка. В качестве субстрата для кислых протеаз использовали 2%-й раствор альбумина на 0,2 М ацетатном буфере, pH = 3,0 и pH = 5,5; для щелочных – 2%-й раствор казеина на 0,2 М фосфатном буфере, pH = 8,0.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Активность протеолитических ферментов муки во многом зависит от вида зерна, из которого она получена, способа получения, сорта муки, значений pH среды, наличия в тесте активаторов и ингибиторов и др. [20, 21]. Результаты исследования активности протеаз анализируемых видов и сортов муки в зависимости от значений pH среды приведены в табл. 2.

Полбяная мука вырабатывается из зерна полбы – полудикой культуры пшеницы. Вследствие данного родства проводится много изысканий, направленных на изучение химического состава зерен полбы, а также полбяной муки в

Таблица 1. Характеристика объектов исследования

Table 1. Characteristics of research objects

Вид и сорт муки	Производитель	Влажность, %	Содержание белка, г/100 г	Содержание белка, г/100 г СВ
Пшеничная высшего сорта	ОАО «Казаньзернопродукт»	13,6	9,94	11,50
Пшеничная 1 сорта	ОАО «Казаньзернопродукт»	14,2	10,12	11,79
Пшеничная обойная	ПАО «Петербургский мельничный комбинат»	14,0	10,20	11,86
Пшеничная цельнозерновая	ПАО «Петербургский мельничный комбинат»	12,8	11,45	13,13
Ржаная обойная	ОАО «Казаньзернопродукт»	13,4	10,29	11,88
Ржаная обдирная	ОАО «Казаньзернопродукт»	14,0	9,17	10,66
Ржаная цельнозерновая	ООО «Гарнец»	13,2	11,06	12,74
Полбяная цельнозерновая	ООО «Гарнец»	11,6	14,32	16,20
Овсяная	ООО «Гарнец»	14,2	12,91	15,05
Кукурузная	ООО «Гарнец»	12,0	9,15	10,40
Гречневая	ООО «Гарнец»	12,6	13,43	15,37

сравнении с пшеничной мукой. Авторами работы [22] показано, что сумма белковых спирторастворимых и щелочерастворимых фракций в полбяной муке почти на 20% меньше аналогичной суммы в пшеничной муке, что может оказать существенное влияние на активность протеаз в тесте. Установлено, что активность протеолитических ферментов полбяной муки увеличивается на 18,5% при повышении значений pH среды от 3,0 до 8,0.

Протеолитические ферменты ржаной муки проявляют большую активность по сравнению с протеазами пшеничной муки высшего и первого сортов. Следует отметить, что активность протеаз в ржаной муке из цельного зерна выше на 14,5% по сравнению с обойной и обдирной. При этом активность протеолитических ферментов ржаной муки зависит от pH среды, наиболее высокую активность протеазы проявляют в кислой среде. В тесте из ржаной муки вследствие способности ее белков неограниченно набухать и переходить в коллоидный раствор, а также высокого содержания альбуминов и глобулинов, атакуемость белков протеолитическими ферментами значительно возрастает [20].

Среди нетрадиционных для хлебопечения видов муки значительно высокую активность проявляют протеолитические ферменты гречневой муки, активность протеаз колеблется в диапазоне 2,624–2,738 мкмоль тирозина/ч и существенно не зависит от pH среды. В кукурузной муке выявлен относительно невысокий уровень активности протеолитических ферментов (0,762 мкмоль тирозина/ч) по сравнению с другими исследуемыми образцами, при этом зависимости значений протеолитической активности кукурузной муки от pH среды не обнаружено. Активность протеаз овсяной муки лежит в диапазоне 1,049–1,174 мкмоль тирозина/ч, при этом активность протеолитических ферментов в слабощелочной среде на 12% больше, чем в кислой.

Таким образом, результаты исследования показали, что кислые протеазы наиболее активны у ржаной и овсяной муки, щелочные – у пшеничной, полбяной, кукурузной и гречневой. Наиболее чувствительными к изменению pH среды являются следующие виды муки: пшеничная обойная, пшеничная цельнозерновая и полбяная. При разработке рецептур из данных сортов муки возможна корректировка активности протеолитических ферментов, что позволит регулировать качественные показатели готовой продукции и выпекать изделия с нужными реологическими характеристиками.

С целью изучения влияния низкотемпературной обработки на активность протеолитических ферментов муки тестовые заготовки замораживали и хранили в замороженном виде в течение 1 мес. Результаты исследования низкотемпературного воздействия (от -25 до -30 ^{o}C) на активность протеаз пшеничной и ржаной муки в зависимости от pH среды представлены на рис. 1.

Установлено, что после низкотемпературного хранения теста из пшеничной муки в течение 1 недели отмечается снижение протеолитической активности у всех исследуемых образцов вне зависимости от сортовой принадлежности. Наибольшее понижение активности протеолитических ферментов наблюдается у пшеничной обойной муки в слабощелочной среде (выявлено понижение активности на 30%). Дальнейшее увеличение продолжительности замораживания не приводит к существенным изменениям активности протеолитических ферментов пшеничной муки в кислой среде при значениях pH = 3,0 и 5,5. Однако по мере увеличения хранения полуфабрикатов в замороженном виде отмечается прирост активности слабощелочных протеаз пшеничной обойной муки.

При изучении влияния отрицательных температур на протеолитическую активность сортов ржаной муки установлено, что активность кислых протеаз в обойной и обдирной муке снижается в среднем на 5–10%, тогда как в слабокислой и слабощелочной реакциях среды отмечается увеличение активности на 12,5 и 8,5% соответственно. При дальнейшем увеличении длительности хранения теста в замороженном виде в

Таблица 2. Протеолитическая активность муки, мкмоль тирозина за 1 ч в расчете на 1 мг белка

Table 2. Proteolytic activity of flour, μmol of tyrosine for 1 hour per 1 mg of protein

Объект исследования	Активность протеаз при pH		
	3,0	5,5	8,0
Пшеничная высшего сорта	0,382±0,018	0,378±0,014	0,386±0,020
Пшеничная 1 сорта	0,571±0,022	0,615±0,017	0,698±0,013
Пшеничная обойная	1,447±0,024	1,510±0,019	1,616±0,021
Пшеничная цельнозерновая	1,511±0,017	1,566±0,020	1,694±0,016
Ржаная обойная	1,575±0,019	1,559±0,022	1,469±0,022
Ржаная обдирная	1,556±0,021	1,513±0,015	1,475±0,019
Ржаная цельнозерновая	1,792±0,023	1,759±0,018	1,733±0,019
Полбяная цельнозерновая	1,215±0,016	1,424±0,013	1,442±0,016
Овсяная	1,049±0,029	1,087±0,021	1,174±0,027
Кукурузная	0,748±0,017	0,763±0,022	0,777±0,025
Гречневая	2,624±0,066	2,720±0,034	2,738±0,054

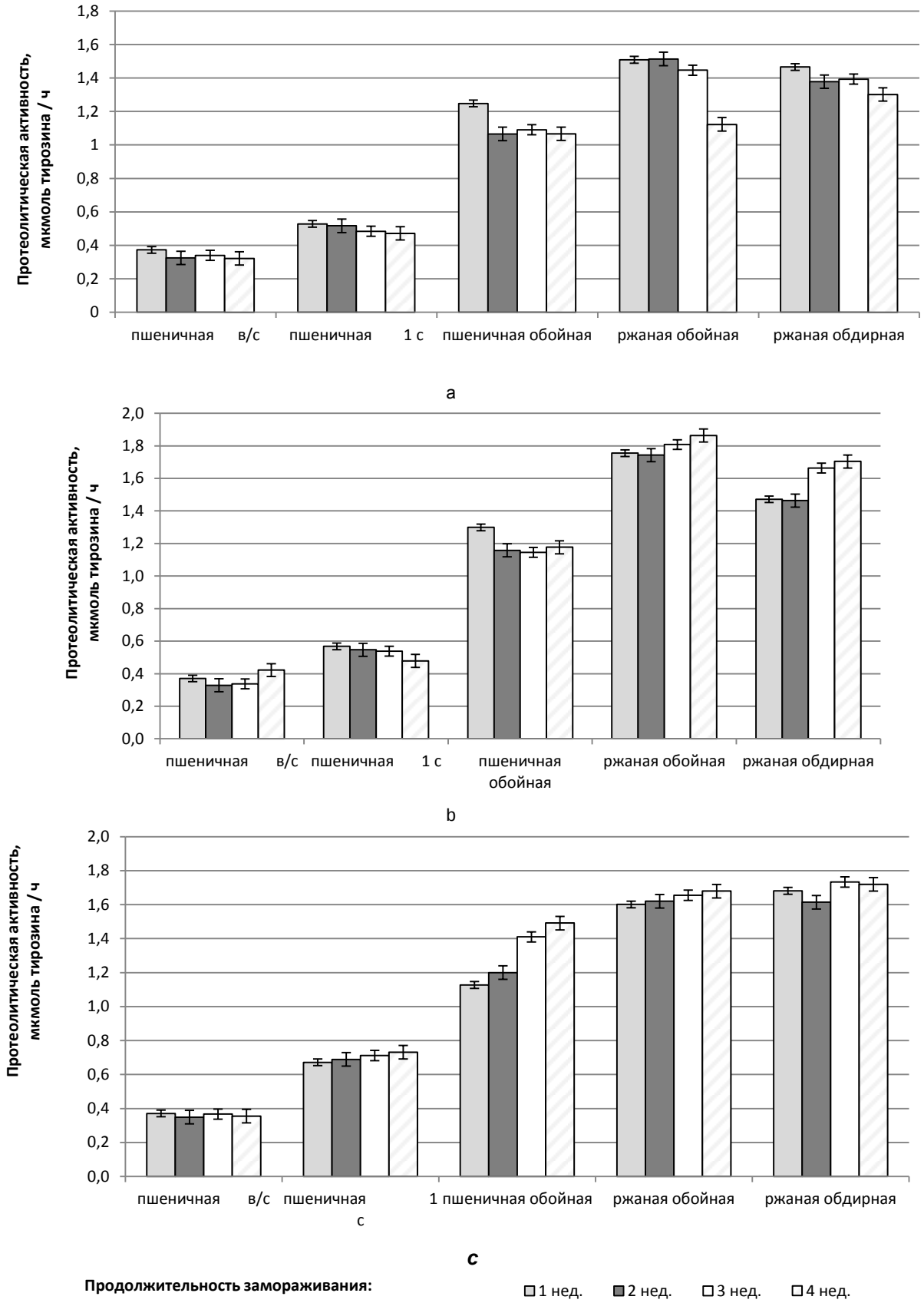

Рис. 1. Влияние процессов замораживания и хранения на активность протеаз пшеничной и ржаной муки различных сортов при pH: 3,0 (a), 5,5 (b), 8,0 (c)

Fig. 1. Effect of freezing and frozen storage on the proteases activity of various varieties of wheat and rye flour at pH: 3,0 (a), 5,5 (b), 8,0 (c)

образцах из ржаной муки происходит постепенное снижение активности протеаз в кислой среде на 26–28%, в слабокислой и слабощелочной средах наблюдается прирост ферментативной активности (увеличение содержания в пробах продуктов гидролиза белков при pH = 5,5 и 8,0 составляет: для ржаной обойной муки – 19,3 и 14,3% соответственно, для обдирной – 12,6 и 16,5%).

Таким образом, на активность протеолитических ферментов пшеничной и ржаной муки после низкотемпературной обработки значительное влияние оказывает pH среды.

Следует отметить, что низкотемпературная обработка образцов из цельнозерновых видов пшеничной и ржаной муки приводит к несущественному снижению активности протеолитических ферментов при низких значениях pH среды (рис. 2). При хранении образцов в замороженном виде наблюдается снижение активности в слабокислой среде (при pH = 5,5) у пшеничной муки на 15,9%, тогда как у образцов из цельнозерновой ржаной муки отмечается прирост активности слабокислых протеаз в процессе хранения образцов в замороженном виде на 13,2%.

Известно, что оптимум активности протеолитических ферментов зерна пшеницы и ржи лежит в слабокислой среде в диапазоне pH = 4,0-5,5 и существенно зависит от наличия в среде активаторов или ингибиторов реакции протеолиза. По-видимому, в процессе низкотемпературного хранения ржаной цельнозерновой муки происходит высвобождение веществ – активаторов протеолиза, чем и объясняется прирост протеолитической активности данных образцов в слабокислой среде.

В присутствии соединений восстанавливающего действия, в частности, содержащих сульфгидрильную группу (SH), например, таких как цистеин, глютатион, активность протеолитических ферментов муки возрастает. Следует отметить, что данные соединения содержатся преимущественно в периферической части зерна и зародыше, которые не удаляются при помоле зерна при получении цельнозерновой муки в отличие от других рассматриваемых сортов.

В ходе исследований не подтвердился предполагаемый прирост активности при изучении влияния низкотемпературных воздействий на активность протеиназ пшеничной муки из цельного зерна при оптимальных значениях pH среды. По-видимому, процессы дезагрегации и дегидратирования молекулы фермента, а также механическое разрушение его структуры крупными кристаллами льда, образующимися при длительном хранении образцов из пшеничной цельнозерновой муки в замороженном виде, преобладают над процессами высвобождения соединений – активаторов протеолиза, в результате чего наблюдается снижение активности протеаз на протяжении всего периода исследований [5, 6].

Результаты исследования показали, что щелочные протеазы пшеничной и ржаной цельнозерновой муки демонстрируют стабильность к низкотемпературному воздействию. Установлено, что показатель активности протеолитических ферментов данных видов муки при pH = 8,0 существенно не зависит от продолжительности хранения образцов в замороженном виде.

Среди цельнозерновых видов муки наибольшее изменение активности протеолитических ферментов во время хранения отмечается у гречневой муки: вне зависимости от pH среды активность протеаз в гречневой муке после однонедельного хранения образцов резко падает (в кислой среде активность снижается на 23,4%, в слабокислой – на 6%, а в слабощелочной – на 20,4%). Следует отметить, что при увеличении низкотемпературной обработки опытных образцов из гречневой муки до четырех недель протеолитическая активность муки снижается в 1,5–2 раза от первоначальных значений.

Выявлено, что при замораживании образцов из полбяной муки происходит снижение активности протеаз как в кислой, так и в слабощелочной среде в среднем на 15–20%. По мере хранения экспериментальных образцов отмечается прирост ферментативной активности при всех исследуемых значениях pH, при этом протеолитическая активность муки после продолжительного хранения образцов в замороженном виде достигает практически исходных значений.

В результате проведенных исследований было установлено, что активность протеаз овсяной цельнозерновой муки при pH = 3,0 под воздействием отрицательных температур существенно не изменяется в течение всего эксперимента. Однако в слабокислой и слабощелочной средах отмечается увеличение ферментативной активности в образцах из овсяной цельнозерновой муки на 31,9 и 43,7% соответственно.

Установлено, что наибольшую устойчивость к длительному низкотемпературному хранению проявляют протеазы кукурузной муки: протеолитическая активность данного вида муки колеблется в диапазоне 0,724–0,824 мкмоль тирозина/ч и не зависит ни от pH среды, ни от продолжительности низкотемпературной обработки.

Понижение активности протеаз при низкотемпературной обработке может быть вызвано несколькими причинами, одной из которых является денатурация белковых молекул муки, а также декстринизация и деструкция крахмала при низкотемпературном хранении, вследствие чего происходит накопление низкомолекулярных сахаристых веществ и декстринов, которые увеличивают эффект ингибирования активности протеолитических ферментов [16].

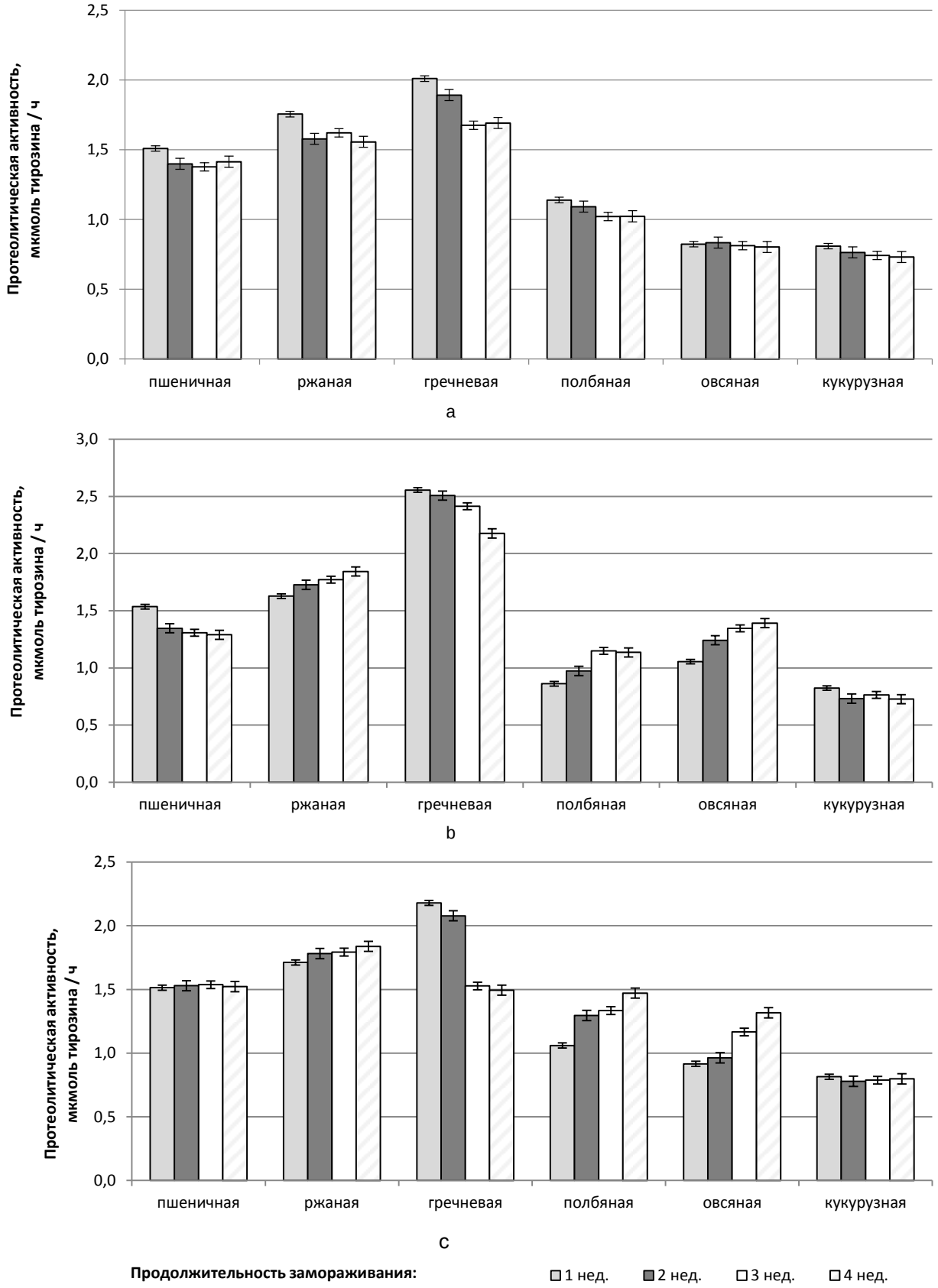

Рис. 2. Зависимость активности протеолитических ферментов цельнозерновых видов муки от продолжительности их низкотемпературной обработки при pH: 3,0 (a); 5,5 (b), 8,0 (c)

Fig. 2. Changes in the proteases activity during frozen storage of various varieties of whole grain flour at pH: 3,0 (a), 5,5 (b), 8,0 (c)

Характер и степень изменения активности протеаз в муке при низкотемпературной обработке могут быть обусловлены также гидролитическим расщеплением белков и разрушением отдельных аминокислот. Известно, что во время замораживания и дефростации тестовых полуфабрикатов происходит денатурация белка, наблюдается декарбоксилирование и дезаминирование свободных аминокислот [4–6]. Данное обстоятельство может привести к повышению кислотности в тесте, что и обусловливает электростатическую неустойчивость белков. Кроме того, замораживание тестовых заготовок приводит к дезагрегации и дегидратированию белковых компонентов муки, в том числе и ферментов [5, 6].

В течение длительного хранения кристаллы льда со временем могут претерпевать рекристаллизацию (оствальдовское созревание) [4, 6], вследствие чего образуются более крупные кристаллы, которые способны механически нарушать целостность белков, что может привести к изменению конформации молекулы фермента, вследствие чего его активность резко снижается.

Повышение активности протеолитических ферментов муки под воздействием отрицательных температур можно объяснить обратимостью денатурации протеаз в слабокислой и слабощелочной средах [10, 11], а также накоплением в тесте при длительном хранении в замороженном виде веществ восстановительного действия – активаторов протеолиза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Протеолитические ферменты муки активно воздействуют на клейковину, тем самым уменьшают вязкость теста, увеличивают его пластичность и эластичность, в связи с чем сокращается продолжительность замеса тестовых полуфабрикатов для формирования оптимальных реологических свойств. Снижение активности протеаз приводит к укреплению клейковинного каркаса, тесто становится плотным, плохо разрыхляется, что приводит в конечном итоге к снижению удельного объема и пористости готовых изделий из пшеничной муки и смеси ее с другими видами муки.

Несмотря на отсутствие в гречневой и кукурузной муке клейковины, в данном сырье отмечается высокое содержание белка и, как показали проведенные нами исследования, достаточный уровень активности собственных протеолитических ферментов. Следует отметить, что данные виды муки находят широкое применение при производстве безглютеновых хлебобулочных изделий, а также при выпечке продукции из смеси их с пшеничной и ржаной мукой. И поскольку протеолиз может оказывать существенное влияние на набухаемость белков при формировании теста, необходимо учитывать активность протеолитических ферментов при выработке замороженных полуфабрикатов из смеси разных видов муки.

Учитывая важность влияния протеаз на ход биохимических процессов, происходящих при созревании теста и обусловливающих структурно-механические и органолептические свойства готовых изделий, необходимы глубокие знания о степени низкотемпературного воздействия на активность протеолитических ферментов муки.

Результаты исследования влияния криообработки на активность протеолитических ферментов различных видов муки показали, что исследуемый параметр зависит от pH среды и от видовой принадлежности муки, что необходимо учитывать при разработке новых рецептур и внедрении технологии хлебобулочных изделий на основе замороженных полуфабрикатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Герасимова Э.О., Лабутина Н.В. Криогенные технологии в хлебопечении // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2019. N 1. С. 6–9.

2. Китаевская С.В., Романова Н.К., Попова Е.В., Камартдинова Д.Р. Оптимизация рецептурного состава ржано-пшеничного хлеба, выработанного на основе замороженных полуфабрикатов // XXI век: Итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2019. Т. 8. N 4. С. 171–176.

3. Козловская А.Э., Лабутина Н.В., Суворов О.А. Влияние хлебопекарных свойств ржаной обдирной муки на теплофизические характеристики ржано-пшеничных полуфабрикатов при замораживании и дефростации // Пищевая промышленность. 2017. N 4. С. 55 - 59.

4. Feng W., Ma S., Wang X. Quality deterioration and improvement of wheat gluten protein in frozen dough // Grain & Oil Science and Technology. 2020. Vol. 3. Issue 1. P. 29–37. https//:doi.org/10.1016/j.gaost.2020.02.001

5. Wang P., Xu L., Nikoo M., Ocen D., Wu F., Yang N., et al. Effect of frozen storage on the conformational, thermal and microscopic properties of gluten: Comparative studies on gluten-, glutenin- and gliadin-rich fractions // Food Hydrocolloids. 2014. Vol. 35. P. 238–246. https//:doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.05.015

6. Wang P., Chen H., Mohanad B., Xu L., Ning Y., Xu J., et al. Effect of frozen storage on physicochemistry of wheat gluten proteins: Studies on gluten-, glutenin- and gliadin-rich fractions // Food Hydrocolloids. 2014. Vol. 39. P. 187–194. https//:doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.01.009

7. Giannou V., Tzia C. Frozen dough bread: Quality and textural behavior during prolonged storage e prediction of final product characteristics // Journal of Food Engineering. 2007. Vol. 79. Issue 3. P. 929–934. https//:doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.03.013

8. Gaikwad S., Arya S.S. Influence of frozen storage on quality of multigrain dough, par baked and ready to eat thalipeeth with additives // LWT – Food Science and Technology. 2018. Vol. 96. P. 350–356. https//:doi.org/10.1016/j.lwt.2018.05.057

9. Ban C., Yoon S., Han J.W., Sang Oh Kim, Han J.S., Lim S., et al. Effects of freezing rate and terminal freezing temperature on frozen croissant dough quality // LWT – Food Science and Technology. 2016. Vol. 73. P. 219–225. https//:doi.org/10.1016/j.lwt.2016.05.045

10. Jia C., Yang W.-D., Yang Z., Ojobi O.J. Study of the mechanism of improvement due to waxy wheat fl our addition on the quality of frozen dough bread // Journal of Cereal Science. 2017. Vol. 75. P. 10–16. https//:doi.org/10.1016/j.jcs.2017.03.007

11. Frauenlob J., Moriano M.E., Innerkofler U., D'Amico S., Lucisano M., Schoenlechner R. Effect of physicochemical and empirical rheological wheat flour properties on quality parameters of bread made from pre-fermented frozen dough // Journal of Cereal Science. 2017. Vol. 77. P. 58–65. https//:doi.org/10.1016/j.jcs.2017.06.021

12. Meziani S., Jasniewski J., Ribotta P.D., Arab-Tehrany E., Muller J.-M., Ghoul M., et al. Influence of yeast and frozen storage on rheological, structural and microbial quality of frozen sweet dough // Journal of Food Engineering. 2012. Vol. 109. P. 538–544. https//:doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.10.026

13. Китаевская С.В. Исследование резистентности молочнокислых бактерий к низкотемпературной обработке // Вестник Казанского технологического университета. 2014. N 17. N 23. С. 214–217.

14. Luo W., Sun D.-W., Zhu Z., Wang Q.-J. Improving freeze tolerance of yeast and dough properties for enhancing frozen dough quality – A review of effective methods // Trends in Food Science & Technology. 2018. Vol. 72. P. 25–33. https//:doi.org/10.1016/j.tifs.2017.11.017

15. Белявская И.Г., Лабутина Н.В., Балыхин М.Г., Юркина К.С., Никифорова Д.С., Матвеева И.В. Технологические аспекты криогенных технологий хлебобулочных изделий с использованием *Carbo activatus* // Пищевая промышленность. 2019. N 3. С. 40–44.

16. Wang X., Pei D., Teng Y., Liang J. Effects of enzymes to improve sensory quality of frozen dough bread and analysis on its mechanism // Journal Food Science & Technology. 2018. Vol. 55. Issue 1. P. 389–398. https//:doi.org/10.1007/s13197-017-2950-8

17. Laaksonen T.J., Roos Y.H. Thermal and dynamic-mechanical properties of frozen wheat doughs with added sucrose, NaCl, ascorbic acid and their mixtures // International Journal of Food Properties. 2001. Vol. 4. Issue 2. P. 201–213. https//:doi.org/10.1081/JFP-100105187

18. Матвеева И.В., Гаццола Д., Страхан С. Биотехнологические решения для замороженных полуфабрикатов и хлебобулочных изделий // Хлебопродукты. 2011. N 9. С. 30–32.

19. Tao H., Han T., Xiao Y., Wu F., Xu X. Optimization of additives and their combination to improve the quality of refrigerated dough // LWT – Food Science and Technology. 2018. Vol. 89. P. 482–488. https//:doi.org/10.1016/j.lwt.2017.11.028

20. Пучкова Л.И., Поландова Р.Д., Матвеева И.В. Технология хлеба; 4-е изд., перераб. и доп. СПб.: ГИОРД, 2005. 259 с.

21. Гридина С.Б., Зинкевич Е.П., Владимирцева Т.А., Забусова К.А. Ферментативная активность зерновых культур // Вестник КрасГАУ. 2014. N 8. С. 57–60.

22. Астахов И.Ю., Курочкин П.П., Игнатов Д.Д. Химический состав и технологические свойства полбяной муки // Инновационная техника и технология. 2015. N 1. С. 59–62.

REFERENCES

1. Gerasimova EO, Labutina NV. Cryogenic technologies in bakery. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Pishhevaya tehnologiya = News of Institutes of Higher Education. Food Technology.* 2019;1:6–9. (In Russian)

2. Kitaevskaya SV, Romanova NK, Popova EV, Kamartdinova DR. Optimisation of composition rye bread that was produced from frozen dough. *XXI vek: Itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plus = XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present plus.* 2019;8(4):171–176. (In Russian)

3. Kozlovskaya AE, Labutina NV, Suvorov OA. Influence of rye flaked flour baking properties on the thermophysical characteristics of rye-wheat semifinished products during freezing and defrosting. *Pishchevaya promyshlennost' = Food Industry.* 2017;4:55–59. (In Russian)

4. Feng W, Ma S, Wang X. Quality deterioration and improvement of wheat gluten protein in frozen dough. *Grain & Oil Science and Technology.* 2020;3(1):29–37. https//:doi.org/10.1016/j.gaost.2020.02.001

5. Wang P, Xu L, Nikoo M, Ocen D, Wu F, Yang N, et al. Effect of frozen storage on the conformational, thermal and microscopic properties of gluten: Comparative studies on gluten-, glutenin- and gliadin-rich fractions. *Food Hydrocolloids.* 2014;35:238–246. https//:doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.05.015

6. Wang P, Chen H, Mohanad B, Xu L, Ning Y, Xu J, et al. Effect of frozen storage on physicochemistry of wheat gluten proteins: Studies on gluten-, glutenin- and gliadin-rich fractions. *Food Hydrocolloids.* 2014;39:187–194. https//:doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.01.009

7. Giannou V, Tzia C. Frozen dough bread:

Quality and textural behavior during prolonged storage e prediction of final product characteristics. *Journal of Food Engineering.* 2007;79(3):929–934. https//:doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.03.013

8. Gaikwad S, Arya SS. Influence of frozen storage on quality of multigrain dough, par baked and ready to eat thalipeeth with additives. *LWT – Food Science and Technology.* 2018;96:350–356. https//:doi.org/10.1016/j.lwt.2018.05.057

9. Ban C, Yoon S, Han JW, Sang Oh Kim, Han JS, Lim S, et al. Effects of freezing rate and terminal freezing temperature on frozen croissant dough quality. *LWT – Food Science and Technology.* 2016;73:219–225. https//:doi.org/10.1016/j.lwt.2016.05.045

10. Jia C, Yang W-D, Yang Z, Ojobi OJ. Study of the mechanism of improvement due to waxy wheat fl our addition on the quality of frozen dough bread. *Journal of Cereal Science.* 2017;75;10–16. https//:doi.org/10.1016/j.jcs.2017.03.007

11. Frauenlob J, Moriano ME, Innerkofler U, D'Amico S, Lucisano M, Schoenlechner R. Effect of physicochemical and empirical rheological wheat flour properties on quality parameters of bread made from pre-fermented frozen dough. *Journal of Cereal Science*. 2017;77:58–65. https//:doi.org/10.1016/j.jcs.2017.06.021

12. Meziani S, Jasniewski J, Ribotta PD, Arab-Tehrany E, Muller J-M, Ghoul M, et al. Influence of yeast and frozen storage on rheological, structural and microbial quality of frozen sweet dough. *Journal of Food Engineering*. 2012;109:538–544. https//:doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.10.026

13. Kitaevskaya SV. Low temperature processing resistance of lactic acid bacteria. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*. 2014;17(23):214–217. (In Russian)

14. Luo W, Sun D-W, Zhu Z, Wang Q-J. Improving freeze tolerance of yeast and dough properties for enhancing frozen dough quality – A review of effective methods. *Trends in Food Science & Technology.* 2018;72:25–33. https//:doi.org/10.1016/j.tifs.2017.11.017

15. Belyavskaya IG, Labutina NV, Balyhin MG, Yurkina KS, Nikiforova DS, Matveeva IV. Technological aspects of cryogenic technologies of bakery products using Carbo activatus. *Pishchevaya promyshlennost' = Food Industry.* 2019;3:40–44. (In Russian)

16. Wang X, Pei D, Teng Y, Liang J. Effects of enzymes to improve sensory quality of frozen dough bread and analysis on its mechanism. *Journal Food Science & Technology.* 2018;55(1):389–398. https//:doi.org/10.1007/s13197-017-2950-8

17. Laaksonen TJ, Roos YH. Thermal and dynamic-mechanical properties of frozen wheat doughs with added sucrose, NaCl, ascorbic acid and their mixtures. *International Journal of Food Properties.* 2001;4(2):201–213. https//:doi.org/10.1081/JFP-100105187

18. Matveeva IV, Gaccola D, Strahan S. Biotechnological solutions for frozen dough and bakery products. *Khleboprodukty.* 2011;9:30–32. (In Russian)

19. Tao H, Han T, Xiao Y, Wu F, Xu X. Optimization of additives and their combination to improve the quality of refrigerated dough. *LWT – Food Science and Technology*. 2018;89:482–488. https//:doi.org/10.1016/j.lwt.2017.11.028

20. Puchkova LI, Polandova RD, Matveeva IV. *Bread technology.* St. Petersburg: GIORD, 2005. 559 p. (In Russian)

21. Gridina SB, Zinkevich EP, Vladimirceva TA, Zabusova KA. Enzymatic activity of crops. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = The Bulletin of KrasGAU.* 2014;8:57–60. (In Russian)

22. Astahov IYu, Kurochkin PP, Ignatov DD. Chemical composition and technological properties of spelt flour. *Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya = Innovative Machinery and Technology.* 2015;1:59–62. (In Russian)

Критерии авторства

Китаевская С.В., Решетник О.А. выполнили экспериментальную работу. Авторы совместно обобщили результаты, написали рукопись, имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Contribution

Svetlana V. Kitaevskaya, Olga A. Reshetnik carried out the experimental work. The authors on the basis of the results summarized the material and wrote the manuscript. All authors have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Китаевская Светлана Владимировна,
к.т.н., доцент кафедры технологии пищевых производств,
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68,
Российская Федерация,
✉ e-mail: kitaevskayas@mail.ru

Решетник Ольга Алексеевна,
д.т.н., профессор,
заведующая кафедрой технологии пищевых производств,
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68,
Российская Федерация,
e-mail: roa.olga@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Svetlana V. Kitaevskaya,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Department of Food Production Technology,
Kazan National Research Technological University,
68, K. Marx St., Kazan, 420015,
Russian Federation,
✉ e-mail: kitaevskayas@mail.ru

Olga A. Reshetnik,
Dr. Sci. (Engineering), Professor,
Head of the Department of Food production technology,
Kazan National Research Technological University,
68, K. Marx St., Kazan, 420015,
Russian Federation,
e-mail: roa.olga@mail.ru