

## Влияние электрохимически активированной воды на показатели качества теста и изделий из пшеничной муки



А. Г. Погорелов<sup>1</sup>, А. И. Панаит<sup>1</sup>, А. Л. Кузнецов<sup>1</sup>,  
Е. Н. Молчанова<sup>2</sup>, О. А. Суворов<sup>1,2,\*</sup>, Л. Г. Ипатова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН<sup>ROR</sup>, Пущино, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет пищевых производств<sup>ROR</sup>, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 08.11.2021

Поступила после рецензирования: 20.01.2022

Принята к публикации: 14.02.2022

\*e-mail: [SuvorovOA@yandex.ru](mailto:SuvorovOA@yandex.ru)

© А. Г. Погорелов, А. И. Панаит, А. Л. Кузнецов,  
Е. Н. Молчанова, О. А. Суворов, Л. Г. Ипатова, 2022



### Аннотация.

Электрохимически активированная вода обладает высокой физико-химической и биологической активностью, взаимодействует с пищевыми ингредиентами и влияет на процесс хлебопечения иначе, чем необработанная вода. Цель работы – изучение влияния анодной и катодной фракций электрохимически активированной воды на показатели качества пшеничной муки, теста и хлеба.

В работе исследовали фракции электрохимически активированной воды, пшеничную муку, дрожжи, тесто и хлеб пшеничный. Применяли общепринятые физико-химические и органолептические методы анализа.

Проанализирована динамика показателей окислительно-восстановительного потенциала и pH электрохимически активированной воды в период релаксации. Показатели возвращались к исходному уровню, но через 72 ч отличались от исходных значений. Установлено влияние электрохимически активированной воды на количество и качество клейковины, растяжимость и гидратацию, водоудерживающую способность муки, подъемную силу дрожжей, титруемую кислотность, быстроту подъема теста и качество готовых изделий. Анолит не изменял качество клейковины, но способствовал уменьшению ее количества на 2,0–3,7 % за счет ослабления гидратации белков. Показаны различия в действии католита на качество клейковины: в более слабой связи между белками укреплялись (показатель измерения деформации клейковины снизился на 11,3 %), в более крепкой – расслаблялись (показатель измерения деформации клейковины повысился на 20 %). Католит повышал водоудерживающую способность слабой муки на 11,7 %, сильной – на 5,3 %, а также активизировал дрожжевые клетки. У образцов хлеба, приготовленных на католите, значения удельного объема выше на 3,7–5,4 %, пористости – на 2,3–4,6 % по сравнению с образцами на анолите. Сравнение формы подовых образцов хлеба подтвердило, что католит способствует укреплению теста при использовании муки с более слабой клейковиной и расслаблению при использовании с более крепкой.

Выявленные закономерности, касающиеся различий в действии фракций электрохимически активированной воды на количество и свойства клейковины, водоудерживающую способность муки, активность дрожжей и показатели качества хлеба, могут применяться для корректировки свойств теста из муки пониженного качества, а в перспективе – для безреагентного управления свойствами и поведением пищевого и биологического сырья.

**Ключевые слова.** Вода, электроактивация, клейковина, тесто, хлеб, анолит, католит

**Финансирование.** Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (РНФ)<sup>ROR</sup>, проект № 20-16-00019.

**Для цитирования:** Влияние электрохимически активированной воды на показатели качества теста и изделий из пшеничной муки / А. Г. Погорелов [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 1. С. 156–167. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-1-156-167>

## Effect of Electrochemically Activated Water on the Quality Indicators of Dough and Wheat Flour Products

Alexander G. Pogorelov<sup>1</sup>, Artem I. Panait<sup>1</sup>, Alexander L. Kuznetsov<sup>1</sup>,  
Elena N. Molchanova<sup>2</sup>, Oleg A. Suvorov<sup>1,2,\*</sup>, Larisa G. Ipatova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Theoretical and Experimental Biophysics of Russian Academy of Sciences<sup>ROR</sup>, Pushchino, Russia

<sup>2</sup> Moscow State University of Food Production<sup>ROR</sup>, Moscow, Russia

Received: 08.11.2021

Revised: 20.01.2022

Accepted: 14.02.2022

\*e-mail: [SuvorovOA@yandex.ru](mailto:SuvorovOA@yandex.ru)

© A.G. Pogorelov, A.I. Panait, A.L. Kuznetsov,  
E.N. Molchanova, O.A. Suvorov, L.G. Ipatova, 2022



### Abstract.

Electrochemically activated water has a high physicochemical and biological activity. It interacts with food ingredients and affects the baking process in a different way than untreated water. The research objective was to study the effect of the anodic and cathodic fractions of electrochemically activated water on the quality indicators of wheat flour, dough, and bread.

The study featured electrochemically activated water fractions, wheat flour, yeast, dough, and wheat bread. It employed standard physicochemical and organoleptic methods of analysis to study the redox potential and pH of electrochemically activated water during relaxation.

The indicators returned to the initial level, but they changed significantly after 72 h. The experiment included the quantity and quality of gluten, extensibility and hydration, water-retaining capacity of flour, yeast fermentation, titratable acidity, dough fermentation rate, and the quality of finished products. The anolyte did not change the quality of gluten but decreased its amount by 2.0–3.7%, probably due to a weaker protein hydration. As for the effect of catholyte on the quality of gluten, the bonds between proteins became stronger in weak as the measurement of gluten deformation index decreased by 11.3%; they relaxed in stronger as the measurement of gluten deformation index increased by 20%. Catholyte increased the water-retaining capacity of weak flour by 11.7% and that of resistant gluten – by 5.3%. It also activated yeast cells. The samples of bread cooked on catholyte had a greater specific volume by 3.7–5.4% and porosity – by 2.3–4.6%, compared to the samples cooked on anolyte. The research also included a comparative analysis of the shape of the hearth bread samples. It confirmed that the catholyte strengthened the dough when the flour was weak and relaxed it when resistant gluten was used.

The research revealed some patterns regarding the effect of electrochemically activated water fractions on the amount and properties of gluten, water-retaining capacity of flour, yeast activity, and bread quality indicators. The results can be used to correct the properties of dough from low-quality flour, as well as for reagent-free control of the properties and behavior of food and biological raw materials.

**Keywords.** Water, electrical activation, gluten, dough, bread, anolyte, catholyte

**Funding.** The research was supported by Russian Science Foundation (RSF)<sup>ROR</sup> grant № 20-16-00019.

**For citation:** Pogorelov AG, Panait AI, Kuznetsov AL, Molchanova EN, Suvorov OA, Ipatova LG. Effect of Electrochemically Activated Water on the Quality Indicators of Dough and Wheat Flour Products. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2022;52(1):156–167. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-1-156-167>

### Введение

В течение последних десятилетий во всем мире наблюдается рост научного интереса к использованию воды, обработанной физическими методами. Воздействие на воду магнитных полей различного излучения или электричества приводит к смещению физико-химических параметров и вносит изменения в структуру и химический состав воды. Обработанная вода приобретает новые свойства и принимает участие в нетипичных химических реакциях.

Электрохимическая активация воды или водных растворов электролитов происходит в зоне одного из электродов диафрагменного электрохимического реактора. Метод электроактивации позволяет направленно изменять структуру воды, показатели рН и окислительно-восстановительного потенциала, каталитическую, биологическую и химическую активности. В зависимости от вида электрода (анода или катода) образуются анолит или католит. Это противоположно заряженные фракции воды

с измененным химическим составом. Обработка в анодной области способствует увеличению окислительно-восстановительного потенциала, кислотности, электропроводности воды и концентрации растворенных кислорода, озона и других газов. Одновременно происходит снижение концентрации водорода и поверхностного натяжения [1–4]. После катодной обработки часть растворенных солей превращается в гидроксиды, обуславливая щелочную реакцию воды. Католиту свойственны отрицательные значения окислительно-восстановительного потенциала и более низкие, по сравнению с исходной водой, показатели электропроводности, поверхностного натяжения и концентрации растворенного кислорода. В католите выше концентрация водорода и свободных гидроксильных групп, изменена структура не только гидратных оболочек ионов, но и свободного объема воды [1, 3, 4]. Фракции электрохимически активированной воды и водных растворов метастабильны, поэтому с течением времени происходит возвращение к исходным параметрам, называемое периодом релаксации. В это время фракции электрохимически активированной воды или растворов обладают рядом аномальных свойств [2, 4]. Продолжительность периода релаксации составляет от нескольких минут до нескольких дней в зависимости от условий активации и взаимодействия с окружающей средой.

Электрохимически активированная вода характеризуется высокой физико-химической и биологической активностью. Одним из важнейших параметров является окислительно-восстановительный потенциал [1–5]. Высокие положительные значения окислительно-восстановительного потенциала анолита обуславливают его биоцидную активность. Анолит, получаемый электрохимическим преобразованием водного раствора хлорида натрия, применяется в качестве дезинфицирующего средства в медицине, сельском хозяйстве и пищевой промышленности [6–10]. Анолитная фракция воды используется для инактивации нежелательных микроорганизмов на поверхности пищевых продуктов [8–13]. Катодно обработанные фракции воды или водных растворов солей с отрицательными значениями окислительно-восстановительного потенциала обладают высокой экстрактивной, каталитической и антиоксидантной активностью. Электроактивация воды также может быть применена для экстракции и функциональной модификации белков и углеводов [14–21]. Электрохимически активированные растворы влияют на антиоксидантные ферменты, активацию дрожжей в хлебопечении, стабилизацию полусладких вин и изомеризацию лактозы [3, 13, 21].

Слабо подкисленная электролизная вода с нейтральным рН и концентрацией активного хло-

ра, помимо подавления роста микроорганизмов, может влиять на морфологические характеристики и биохимический состав проростков злаковых и бобовых культур. Слабо подкисленная электролизная вода ускоряет развитие проростков маша, поскольку содержащийся в электролизной воде пероксид водорода ( $H_2O_2$ ) может действовать как сигнальная молекула в процессе прорастания. Слабо подкисленная электролизная вода обладает регулирующей активностью в отношении ферментов, таких как фенилаланин-аммиак-лиаза, участвующая в фитохимическом синтезе во время прорастания семян [22].

При введении в пищевые продукты электрохимически активированная вода иначе взаимодействует с другими ингредиентами, что может оказывать влияние на качество полуфабрикатов и готовой продукции. В исследовании А. А. Борисенко показаны различия в механизме образования белково-жировой эмульсии при использовании католита и необработанной питьевой воды [23]. Методом молекулярного компьютерного моделирования и квантово-химическими расчетами был исследован фрагмент молекулы  $\alpha s1$ -казеина в питьевой воде и католите в присутствии триацилглицерина линолевой кислоты. Установлено, что исследуемый белок в присутствии молекулы жира располагается в воде отрицательно заряженной областью к полярному компоненту системы, а неполярным участком – к гидрофобному компоненту. При этом уменьшилась величина дипольного момента исследуемого фрагмента молекулы  $\alpha s1$ -казеина в католите, возросло количество водородных связей с молекулами католита в 1,3 раза, а число внутримолекулярных водородных связей белка увеличилось в 1,7 раза по сравнению с результатами моделирования системы на основе питьевой воды. Эмульгирующая способность белка в католите увеличилась за счет усиления гидрофильных и гидрофобных свойств соответствующих участков пептидной цепи. Благодаря образованию дополнительных водородных связей в исследуемой системе повышается устойчивость образованной в католите эмульсии. Католит контактирует с активными центрами сорбции биополимеров и в большей степени, чем питьевая вода, переходит в связанное состояние. Это вызывает изменение свойств биополимеров на молекулярном уровне. Специфика распределения зарядов и электростатического потенциала молекулы белка в католите является причиной повышения степени его гидратации, адсорбции на поверхности частичек жира и увеличения эмульгирующей способности [23].

Высокая, по сравнению с питьевой водой, степень связанности электрохимически активированной воды в пищевой системе обуславливает преобразование совокупных свойств гидрофильных компонентов этой системы. В работе R. Liu и др. показано

положительное влияние электролизованной воды на процесс желатинизации рисовой муки [24]. Наблюдались более высокая пиковая вязкость и более низкая энтальпия плавления. Твердость, клейкость и жевательная способность рисовой лапши из рисовых шариков, обработанных слабокислой электролизованной водой с концентрацией активного хлора 20,32 мг/л, были увеличены ( $P < 0,05$ ). Потери при варке уменьшились в лапше, обработанной сильнокислой электролизной водой с содержанием хлора 10,09 мг/л ( $P < 0,05$ ). Отмечено улучшение кулинарных и текстурных свойств рисовой лапши [24]. Слабокислую электролизную воду с разным содержанием активного хлора использовали и для снижения ( $P < 0,05$ ) общего количества микробных клеток, дрожжей, общих полифенолов, активности липазы и полифенолоксидазы, вязкости крахмала и экстрагируемости белка из муки [25].

Ряд авторов указывает на возможность использования электрохимически активированных жидких сред для улучшения качества хлеба [26–31]. Хлебобулочные изделия являются традиционными продуктами питания в России. Хлеб обеспечивает все возрастные группы энергией, углеводами, белками и пищевыми волокнами и является основным источником поступления в организм микроэлементов (железа, магния, цинка) и фолиевой кислоты. Однако качество пшеницы не всегда позволяет получить хлеб удовлетворительного качества.

В рецептурах хлебобулочных изделий вода играет особую роль, выступая активатором технологических процессов производства. Вода, обработанная физическими или электрохимическими способами, оказывает воздействие на реологические и биохимические процессы в образовании теста и готовых изделий [26, 27]. Электрохимическая активация воды оказывает влияние на окислительно-восстановительные характеристики полуфабрикатов хлебопекарного производства, биотехнологические свойства бродильной микрофлоры, реологические характеристики теста и качество изделий [28]. Фракции электрохимически активированной воды неодинаково влияют на активность ферментов муки. Анолит оказывает окислительное действие на протеолитические ферменты муки, католит – восстановительное. В зависимости от вида электрохимически активированной воды, используемой при замесе теста, меняется ферментативная активность белков. При окислении под действием анолита происходит снижение концентрации сульфгидрильных (–SH) групп в белковом веществе теста с образованием дисульфидных (–S–S–) связей. Структурные изменения клейковинных белков муки приводят к изменению структуры белкового субстрата и снижают его доступность

протеолитическим ферментам. В зависимости от вида и качества исходной муки целесообразно направленное применение анолитной или католитной фракций. При переработке муки из проросшего зерна пшеницы или муки со слабой клейковиной рекомендуется использовать анолитную фракцию для укрепления структуры клейковинных белков, а при замесе теста из муки морозобойного или подвергнутого сильной сушке зерна – католит для предотвращения образования неэластичного короткорвущегося теста [29].

Внесение электрохимически активированной воды в тесто при замесе отражается на свойствах и показателях качества выпеченного хлеба. Активация воды увеличивает концентрацию мономеров  $H_2O$ , способствует глубокому проникновению молекул воды в структуру биополимеров муки и их большему набуханию. Методом дифференциального термического анализа L. Nilova и др. изучили изменения форм связанной воды (водопродонной и активированной на катоде) в хлебе и хлебобулочных изделиях в зависимости от компонентов формулы и при хранении [30]. По сравнению с контрольными образцами, приготовленными на необработанной воде, хлеб с активированной водой при хранении медленнее теряет воду, его хрупкость уменьшается, а способность к набуханию повышается. Различия между параметрами контрольных образцов и хлеба, приготовленного с активированной водой, могут быть связаны с перераспределением связанных форм воды в продукте. Перераспределение форм связанной воды может быть связано с набуханием белков в результате проникновения активированной воды в их структуру в виде мономеров. В процессе хранения происходит старение биополимеров, они становятся более плотными, образуя трещины между крахмалом и белком. Это приводит к повышенной ломкости хлеба и снижает его набухаемость. Динамика изменения влажности хлеба подтверждает увеличение содержания удаленной воды в хлебе из-за усадки или высыхания. В активированной воде процесс идет медленнее [30].

Целью работы является определение влияния анодной и катодной фракций электрохимически активированной воды на показатели качества пшеничной муки разного качества, теста и хлеба.

#### **Объекты и методы исследования**

В качестве объектов исследования использовали основное и дополнительное сырье: муку пшеничную хлебопекарную высшего сорта, полученную из торговых сетей (два образца), дрожжи хлебопекарные прессованные, соль поваренную пищевую, воду питьевую, фракции электрохимически активированной воды, а также полуфабрикаты (тесто) и готовые изделия. Приготовление хлеба осуществляли традиционным безопасным способом. Количество

муки, дрожжей и соли при замесе теста соотносилось как 100:3:1,5. При замесе теста прессованные дрожжи вносили в виде дрожжевой суспензии, соль – в водном растворе. Количество воды определялось расчетным методом. Контрольными были пробы хлеба, приготовленные с использованием бутилированной питьевой воды без обработки.

В опытных образцах использовали две противоположно заряженные фракции воды (анолит и католит), полученные путем электрохимической активации бутилированной воды (с показателями окислительно-восстановительного потенциала +190 мВ, рН 7,8, Na 200, Ca 20 и Mg 5 мг/л, общая минерализация не более 0,7 г/л). Анодную и катодную фракции электрохимически активированной воды получали в лабораторном электролизере с керамической диафрагмой и анодом, покрытым оксидами рутения и титана, при напряжении питания 24 В и потребляемой мощности 29–43 Вт. Продолжительность активации 30 мин. Значение рН раствора измеряли с помощью портативных приборов HI98120 (Hanna, Германия), окислительно-восстановительный потенциал – ST20R (Ohaus, Китай).

Брожение теста проводили в пароконвектомате при температуре 35–37 °С. Продолжительность брожения составила 150 мин с обминкой через каждый час. Расстойку подового и формового образцов осуществляли при температуре 35–37 °С в течение 60 мин. Выпечку хлеба проводили при температуре среды в пекарной камере 200 °С в течение 20 мин. Выпеченные изделия хранили при комнатной температуре. Определение показателей качества готовых изделий проводили через 14–16 ч после выпечки.

Основные показатели качества полуфабрикатов и готовых изделий определяли общепринятыми методами, применяемыми в технологическом контроле хлебопекарного производства и регламентированными соответствующими ГОСТ, в не менее чем 3-х повторностях.

Для изучения влияния электрохимически активированной воды на свойства клейковины рассматривали изменения клейковины по значениям прибора ИДК-1, по растяжимости и гидратационной способности. Качество полуфабрикатов и готовых изделий оценивали по органолептическим и физико-химическим показателям.

Свойства муки оценивали по количеству и качеству клейковины (ГОСТ 27839-2013). Для определения водоудерживающей способности муки 1 г образца смешивали с 10 мл дистиллированной воды и выдерживали в течение 30 мин, а затем центрифугировали (30 мин, 3000 об/мин). Значение показателя оценивали как процентное содержание воды, связанной на грамм муки.

Подъемную силу дрожжей определяли стандартным и ускоренным методом для теста, приготовленного с добавлением исследуемых образцов воды (ГОСТ 171-2015).

Качество хлеба оценивали органолептически с помощью 5 экспертов балловым методом, пористость определяли на приборе Журавлева, подовые образцы оценивали по отношению высоты к диаметру (H/D), удельный объем – по отношению объема хлеба к его массе. Степень согласованности экспертных оценок сравнивали с помощью теста множественного сравнения по методу наименьших квадратов разности Фишера. Экспериментальные данные подвергали математическому и графическому анализу с использованием стандартных программ MS Excel.

### Результаты и их обсуждение

Качество муки влияет на качество хлеба и хлебобучных изделий. Основными показателями являются количество и качество клейковины, а также водоудерживающая способность муки. Белки образуют в структуре пшеничного теста упруго-эластичную сетку. Качество клейковины оказывает влияние на водопоглонительную способность муки, формоустойчивость и газоудерживающую способность теста. От них зависят объем, внешний вид, состояние мякиша, выход хлеба и ряд других показателей.

Направленное изменение окислительно-восстановительного потенциала воды в область положительных или отрицательных значений может оказывать влияние на характер межмолекулярного взаимодействия растворенных веществ. В водной среде компоненты теста, имеющие полярные функциональные группы (белки, крахмал), могут быть восприимчивы к окислительно-восстановительным свойствам воды, подвергнутой электрохимической активации. После активации в период релаксации измененные значения окислительно-восстановительного потенциала и рН воды возвращаются к исходному состоянию. В работе исследовали изменения окислительно-восстановительного потенциала и кислотности анолитной (окислительно-восстановительный потенциал +470 мВ, рН 3,5) и католитной (окислительно-восстановительный потенциал –235 мВ, рН 10,0) фракций электрохимически активированной воды при хранении в закрытой емкости в течение 72 ч (рис. 1).

Из рисунка 1 видно, что происходило изменение окислительно-восстановительного потенциала анолита и католита, падение или рост в каждой фракции. Так проявлялась релаксация метастабильного состояния на фоне практически неизменного показателя для исходной необработанной воды. Если величина окислительно-восстановительного потенциала исходной воды (контроль) при 20 °С оставалась на постоянном уровне +190 мВ в течение всего срока

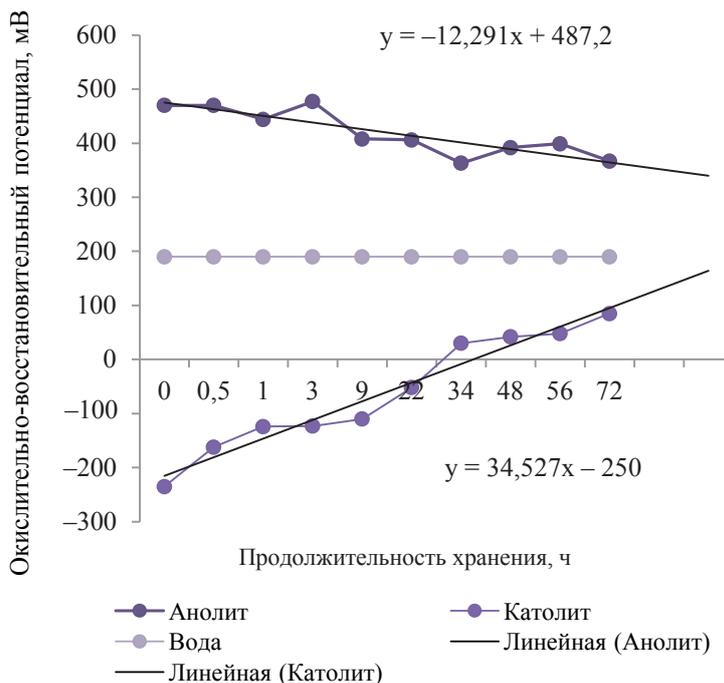


Рисунок 1. Изменение окислительно-восстановительного потенциала фракций электрохимически активированной воды в период релаксации

Figure 1. Redox potential of electrochemically activated water during relaxation

наблюдений (72 ч), то значение окислительно-восстановительного потенциала анолита снижалось от +470 до +367 мВ, а католита постепенно поднималось от –235 до +85 мВ, оставаясь ниже уровня контрольного образца воды.

Показатели рН фракций электрохимически активированной воды изменялись со временем в направлении исходных значений (рис. 2), хотя медленнее, чем окислительно-восстановительный потенциал. Поскольку максимальный эффект активации наблюдался сразу после обработки, то для следующих экспериментов фракция электрохимически активированной воды получали перед началом эксперимента.

Для получения опытных образцов клейковины муку замешивали на электрохимически активированной воде, а затем отмывали клейковину по стандартной методике. Полученные данные представлены в таблице 1.

Из результатов исследования видно, что контрольные образцы клейковины муки соответствовали ГОСТ 27839-2013. Образец муки № 1 характеризовался высоким выходом клейковины, что согласуется с ее высокой гидратационной способностью. Хотя клейковина образцов № 1 и 2 относилась к I группе качества (средняя, хорошая), различия в показателях измерения деформации клейковины составили более 35 %. Клейковину, отмывую из образца № 1, можно охарактеризовать

как более слабую. Клейковина из образца муки № 2 имела меньший выход и была более крепкой. Ее гидратационная способность была на 8 % меньше.

Использование анодной фракции электрохимически активированной воды для муки с более слабой клейковиной (образец № 1) привело к ее укреплению. Показатель измерения деформации клейковины уменьшился на 11,3 %, растяжимость снизилась на 14,3 %. На образцы с более крепкой клейковиной анолит не оказал существенного влияния, а католит способствовал расслаблению комплекса клейковинных белков. В обоих образцах фракция анолита способствовала уменьшению как количества клейковины (на 2,0–3,7 %), так и ее гидратационной способности (на 6–8 %). Это связано с изменениями в полярных положительно или отрицательно заряженных радикалах аминокислот. При изменении количества протонов в среде радикалы теряют заряд, способствующий образованию дополнительных водородных связей и притягиванию диполей воды. Учитывая характер изменения показаний приборов ИДК и растяжимости, можно предположить, что были затронуты аминокислоты глиадиновой фракции. Глиадины придают тесту вязкость и растяжимость, а глютелины отвечают за упругость [31].

Действие фракции католита на образцы не одинаково. На выход клейковины он либо не оказывал влияние (образец № 1), либо

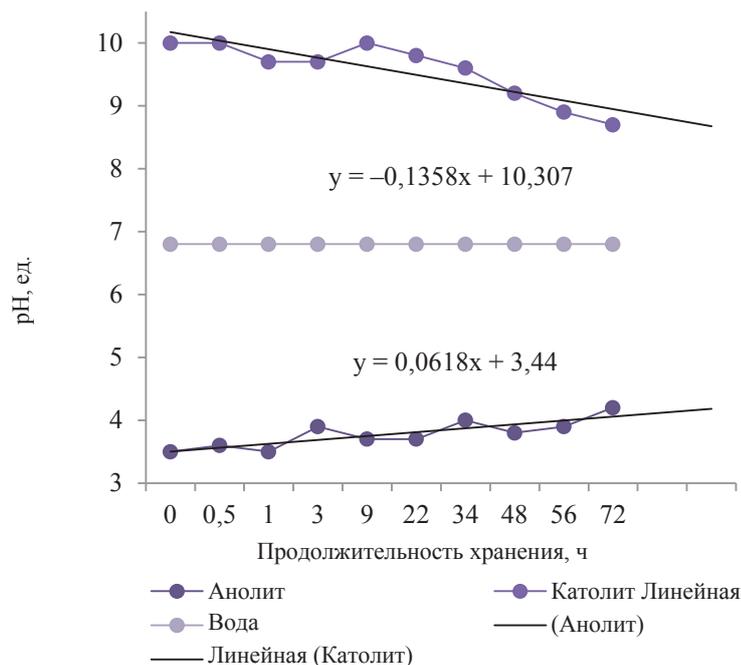


Рисунок 2. Изменение значения pH фракций электрохимически активированной воды в период релаксации

Figure 2. pH of electrochemically activated water during relaxation

Таблица 1. Влияние электрохимически активированной воды на свойства клейковины

Table 1. Effect of electrochemically activated water on the properties of gluten

Наименование образцов	Количество клейковины, %	Значение на приборе ИДК-1, ед.	Растяжимость клейковины, см	Гидратационная способность, %
Образец муки № 1 (контроль)	36,0 ± 0,1	75,3 ± 0,5	14,0 ± 0,5	188,0 ± 2,1
Образец муки № 1 + анолит	35,2 ± 0,1	67,7 ± 0,3	12,0 ± 0,3	176,7 ± 1,8
Образец муки № 1 + катодит	36,0 ± 0,2	66,8 ± 0,4	12,0 ± 0,3	190,1 ± 3,3
Образец муки № 2 (контроль)	32,0 ± 0,1	55,4 ± 0,3	11,0 ± 0,5	174,2 ± 1,6
Образец муки № 2 + анолит	30,8 ± 0,2	58,3 ± 0,3	10,0 ± 0,1	160,7 ± 2,2
Образец муки № 2 + катодит	33,2 ± 0,2	66,5 ± 0,3	11,0 ± 0,3	180,9 ± 2,5

способствовал его увеличению (образец № 2). Также не наблюдалось одинаковой зависимости в изменении показателя прибора ИДК: в более слабой клейковине связи между белками укреплялись (показатель измерения деформации клейковины снизился на 11,3 %), в более крепкой – расслаблялись (показатель измерения деформации клейковины повысился на 20 %).

Влияние отдельных фракций электрохимически активированной воды на муку с различным качеством клейковины согласуется с исследованиями авторов, которые рекомендовали анолит для укрепления муки со слабой клейковиной, а катодит – для расслабления крепкого неэластичного теста [29]. В данном исследовании в образцах муки с более слабой клейковиной анолит способствовал ее укреплению, а катодит – расслаблению крепкой клейковины (образец № 2).

Водоудерживающая способность контрольных образцов муки, несмотря на различия в выходе клейковины, была одинакова. Способность муки удерживать катодит и анолит различалась (табл. 2).

При использовании анолита значения практически не изменялись, а при использовании катодита увеличивались. Катодит повышал водоудерживающую способность слабой муки на 11,7 %, сильной – на 5,3 %. Учитывая, что данные о влиянии катодита на водоудерживающую способность муки согласуются с данными о гидратационной способности клейковины, то можно предположить, что клейковинные белки подвержены изменениям под действием электрохимически активированной воды. Глиадин и глютеин являются источниками серосодержащих аминокислот, которые, как полагают Сокол и Атрощенко, под влиянием анолита и катодита

участвуют в реакциях окисления-восстановления [29]. Однако образование дисульфидных связей или их разрыв с освобождением сульфгидрильных групп не может сопровождаться увеличением гидратационной способности белковой матрицы из-за того, что цистеин по своим свойствам близок к алифатическим аминокислотам и не обладает полярностью.

Активность дрожжей является одним из главных показателей при приготовлении хлебобулочных изделий и влияет как на продолжительность технологического процесса, так и на органолептические показатели готовых изделий. Углекислый газ, выделяемый при брожении, позволяет тесту растягиваться. Это формирует объем и пористость. Влияние электрохимически активированной воды на подъемную силу дрожжей, определенную стандартным и ускоренным методами для теста, приготовленного с добавлением различных фракций активированной воды, показано в таблице 3.

Исследования показали, что в образцах теста, приготовленных с раствором католита, брожение протекало более интенсивно. Это может способствовать сокращению общей продолжительности тестоведения. Фракция анолита, наоборот, тормозила процесс брожения. Это свидетельствует о неодинаковом влиянии электрохимически активированной воды на активность дрожжевой клетки. Различия в подъемной силе дрожжей в присутствии раствора анолита, по сравнению с контрольным образцом, менее заметны при применении стандартного метода. Это связано с релаксацией активированной воды с течением времени.

По результатам пробных выпечек были определены показатели качества в соответствии с методами, предусмотренными в классификационных государственных стандартах на хлеб и хлебобулочные

Таблица 2. Влияние электрохимически активированной воды на водоудерживающую способность муки

Table 2. Effect of electrochemically activated water on the water-holding capacity of flour

Наименование образцов	Водоудерживающая способность, %
Образец муки № 1 (контроль)	170,0 ± 2,6
Образец муки № 1 + анолит	168,0 ± 0,6
Образец муки № 1 + католит	190,0 ± 2,3
Образец муки № 2 (контроль)	170,0 ± 1,6
Образец муки № 2 + анолит	169,0 ± 0,5
Образец муки № 2 + католит	179,0 ± 0,5

изделия. Оценка образцов по органолептическим показателям дана в таблице 4.

Образцы, приготовленные на католите, приближались к контрольному образцу. Они имели правильную форму, глянцевую золотистую корочку, светлый эластичный мякиш и равномерную пористость. Вкус хлеба был типичным (хлебный) без постороннего запаха и привкуса. Образцы с использованием анолита имели приемлемые органолептические показатели, но характеризовались меньшим объемом. Это может быть связано как с меньшей подъемной силой дрожжей, так и с влиянием анолита на клейковинный комплекс белков. Физико-химические показатели качества хлеба приведены в таблице 5.

Образцы, приготовленные на католите, имели хорошие свойства, но не превосходили контроль. Наибольшие различия (на 14–21 % для первого и второго образцов муки) наблюдались по величине Н/D (отношение высоты к диаметру подовых образцов). Контрольный образец был более расплывчатым. Для муки с более слабой клейковиной эти изменения закономерны, т. к. добавление электрохимически активированной воды приводило к укреплению клейковины (по значениям прибора ИДК-1) и отражалось на форме подовых образцов. Увеличение показателя Н/D для муки с более крепкой клейковиной при добавлении активированной воды не согласуется с закономерностями изменения клейковины. Это может быть обусловлено особенностями синтеза клейковинных белков при выращивании пшеницы или их изменений в процессе послеуборочной обработки и требует более глубоких исследований.

Показатели кислотности, пористости и удельного объема хлеба у всех исследуемых образцов

Таблица 3. Влияние электрохимически активированной воды на подъемную силу дрожжей и продолжительность брожения

Table 3. Effect of electrochemically activated water on yeast fermentation power and time

Наименование образцов	Стандартный метод, мин	Ускоренный метод, мин
Образец муки № 1 (контроль)	66,4 ± 2,5	66,5 ± 0,1
Образец муки № 1 + анолит	69,0 ± 2,0	77,0 ± 0,1
Образец муки № 1 + католит	61,6 ± 1,8	63,0 ± 0,2
Образец муки № 2 (контроль)	68,2 ± 2,4	68,0 ± 0,1
Образец муки № 2 + анолит	70,2 ± 1,7	80,0 ± 0,2
Образец муки № 2 + католит	65,5 ± 1,5	64,0 ± 0,2

Таблица 4. Органолептические показатели качества пшеничного хлеба

Table 4. Sensory properties of the quality of wheat bread

Показатели	Оценка в баллах					
	Образец муки № 1			Образец муки № 2		
	Контроль	Анолит	Католит	Контроль	Анолит	Католит
Форма	4,90	4,60	4,80	4,80	4,60	4,80
Цвет и внешний вид	5,00	4,70	4,90	4,80	4,70	4,80
Состояние мякиша	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Вкус и аромат	5,00	4,80	5,00	5,00	4,70	5,00
Средняя оценка	4,98	4,78	4,93	4,90	4,75	4,90

Таблица 5. Физико-химические показатели качества хлеба, приготовленного с электрохимически активированной водой

Table 5. Physical and chemical indicators of the quality of bread made with electrochemically activated water

Наименование образцов	Пористость, %	Удельный объем хлеба, см <sup>3</sup> /г	H/D	Кислотность, град
Образец муки № 1 (контроль)	62,2 ± 0,4	2,86 ± 0,14	0,64 ± 0,04	2,2 ± 0,1
Образец муки № 1 + анолит	61,0 ± 0,2	2,72 ± 0,10	0,78 ± 0,03	2,0 ± 0,1
Образец муки № 1 + католит	63,8 ± 0,3	2,82 ± 0,16	0,79 ± 0,03	2,2 ± 0,1
Образец муки № 2 (контроль)	61,8 ± 0,2	2,69 ± 0,14	0,70 ± 0,02	2,1 ± 0,1
Образец муки № 2 + анолит	61,2 ± 0,3	2,58 ± 0,12	0,80 ± 0,03	2,1 ± 0,1
Образец муки № 2 + католит	62,6 ± 0,4	2,72 ± 0,12	0,80 ± 0,04	2,2 ± 0,1

отличались незначительно. У образцов хлеба, приготовленных на католите, значения удельного объема выше на 3,7–5,4 %, пористости – на 2,3–4,6 % по сравнению с образцами на анолите.

При хранении хлеба в течение 72 ч различий в сохранности между образцами не наблюдалось.

Влияние электрохимически активированной воды на качество хлеба активно изучается. В то же время полученные результаты часто противоречивы. В работе Н. В. Науменко показано, что анодная вода ухудшала качество хлеба, а катодная оказывала положительное влияние на его удельный объем [32]. Однако в исследованиях [13, 26] выявлена обратная зависимость: образцы хлеба, приготовленные с применением фракций электрохимически активированной воды, превышали по объему контрольные образцы. При этом использование анолита обеспечивало получение хлеба наибольшего объема. Это объясняется различием в белковом комплексе исходных образцов, а также влиянием электролизной воды на изменение ( $P < 0,05$ ) степени вязкости крахмала, экстрагируемости белка и форм связанной влаги [25, 30, 31].

Выявленные в работе закономерности могут быть обусловлены и изменением антиоксидантных, микробиологических и физико-химических свойств сырья под действием электрохимически активированной воды с учетом значений окислительно-восстановительного потенциала, рН и температуры. Развитие исследований с применением современных аналитических методов анализа будет

способствовать решению задач безрегентного управления свойствами продовольственного сырья при использовании электрохимически активированной воды как в технологии хлеба и хлебобулочных изделий, так и в других отраслях пищевой промышленности при использовании муки, воды и дрожжей [33–38].

### Выводы

Определено влияние фракций электрохимически активированной воды на основное сырье, показатели качества теста и изделий из пшеничной муки. Оценка качества клейковины с использованием прибора ИДК-1 показала различия в действии католита на клейковинные белки: в более слабой клейковине связи укрепились, в более крепкой – расслабились. Анолит не изменял качество клейковины, но способствовал уменьшению ее количества за счет ослабления связей, способствующих гидратации белков. Католит повышал водоудерживающую способность муки, а присутствие анолита не изменяло данный показатель по сравнению с контролем. Ускоренным методом по всплытию шарика и продолжительности брожения теста показано, что католит незначительно активировал дрожжевые клетки.

Образцы хлеба, приготовленные с использованием католита, имели более высокие значения удельного объема и пористости по сравнению с образцами на анолите. Изменение формы подовых образцов хлеба свидетельствовало о том, что католит способствует укреплению теста при использовании муки с

более слабой клейковиной и расслаблению при использовании муки с крепкой клейковиной. Анолит не способствовал улучшению процессов тестоведения. Дрожжи замедляли свою активность при брожении, полученные изделия имели меньший объем. Взаимосвязь между использованием фракций электрохимически активированной воды и продолжительностью хранения не выявлена.

В случае использования муки пониженного качества применение активированной воды может стать перспективным технологическим приемом, корректирующим свойства муки и теста при сохранении требуемых характеристик готовых изделий. Понимание взаимодействия электрохимически активированной воды и перечисленных биологических мишеней разного уровня сложности поможет решить проблему безреагентного управления свойствами и поведением биологического сырья в технологической цепочке производства пищевых продуктов. Актуальным представляется проведение дополнительных исследований, направленных на изучение регулирующей активности электрохимически активированной воды в отношении ключевых ферментов.

#### Критерии авторства

А. Г. Погорелов – руководство проектом, редактирование и окончательное одобрение рукописи. А. И. Панаит – сбор и обработка материала. А. Л. Кузнецов – получение электрохимически

активированных растворов. Е. Н. Молчанова – получение данных о влиянии электрохимически активированных растворов на показатели качества теста и изделий, подготовка рукописи и интерпретация данных. О. А. Суворов – координация исследований, подготовка рукописи и анализ данных. Л. Г. Ипатова – вклад в концепцию и дизайн исследования, редактирование рукописи.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Contribution

A.G. Pogorelov supervised the project and proofread the manuscript. A.I. Panait collected and processed the material. A.L. Kuznetsov obtained the electrochemically activated solutions. E.N. Molchanova obtained and interpreted the data on the effect of electrochemically activated solutions on the quality of dough and other products, as well as wrote the manuscript. O.A. Suvorov coordinated the research, wrote the manuscript, and analyzed the data. L.G. Ipatova contributed to the concept and design, as well as proofread the manuscript.

#### Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

#### References/Список литературы

1. Ding T, Oh D-H, Liu D. Electrolyzed water in food: Fundamentals and applications. Singapore: Springer; 2019. 274 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-3807-6>
2. Johansson B. Functional water – in promotion of health beneficial effects and prevention of disease. *Internal Medicine Review*. 2017;3(2). <https://doi.org/10.18103/imr.v3i2.321>
3. Bakhir VM, Panicheva SA, Prilutsky VI, Panichev VG. Electrochemical activation: inventions, systems, technology. Moscow: Viva-Star; 2021. 659 p. (In Russ.)  
Электрохимическая активация: изобретения, техника, технология / В. М. Бахир [и др.]. М.: Вива-Стар, 2021. 659 с.
4. Ignatov I, Mosin O, Gluhchev G, Karadzhev S, Miloshev Ge, Ivanov N. The evaluation of the mathematical model of interaction of electrochemically activated water solutions (anolyte and catholyte) with water. *European Reviews of Chemical Research*. 2015;4(2):72–86.
5. Tanaka Y, Saihara Y, Izumotani K, Nakamura H. Daily ingestion of alkaline electrolyzed water containing hydrogen influences human health, including gastrointestinal symptoms. *Medical Gas Research*. 2018;8(4):160–166. <https://doi.org/10.4103/2045-9912.248267>
6. Moonman E, Montazeri N, Jaykus L-A. Efficacy of neutral electrolyzed water for inactivation of human norovirus. *Applied and Environmental Microbiology*. 2017;83(16). <https://doi.org/10.1128/aem.00653-17>
7. Yan P, Daliri EB-M, Oh D-H. New clinical applications of electrolyzed water: A review. *Microorganisms*. 2021;9(1). <https://doi.org/10.3390/microorganisms9010136>
8. Suvorov OA, Kuznetsov AL, Shank MA, Volozhaninova SYu, Pugachev IO, Pasko OV, *et al.* Electrochemical and electrostatic decomposition technologies as a means of improving the efficiency and safety of agricultural and water technologies. *International Journal of Pharmaceutical Research and Allied Sciences*. 2018;7(2):43–52.
9. Orejel JCR, CanoBuendía JA. Applications of electrolyzed water as a sanitizer in the food and animal-by products industry. *Processes*. 2020;8(5). <https://doi.org/10.3390/pr8050534>

10. Cayemite PE, Gerliani N, Raymond P, Aider M. Study of the impacts of electro-activated solutions of calcium lactate, calcium ascorbate and their equimolar mixture combined with moderate heat treatments on the spores of *Bacillus cereus* ATCC 14579 under model conditions and in fresh salmon. *International Journal of Food Microbiology*. 2021;358. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109285>
11. Lin H-M, Hung Y-C, Deng S-G. Effect of partial replacement of polyphosphate with alkaline electrolyzed water (AEW) on the quality of catfish fillets. *Food Control*. 2020;112. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107117>
12. Athayde DR, Flores DRM, da Silva JS, Genro ALG, Silva MS, Klein B, et al. Application of electrolyzed water for improving pork meat quality. *Food Research International*. 2017;100:757–763. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.08.009>
13. Environmental Decision Memo for Food Contact Notification No. 1811 [Internet]. [cited 2021 Oct 10]. Available from: <https://www.fda.gov/food/environmental-decisions/environmental-decision-memo-food-contact-notification-no-1811>
14. Han D, Hung Y-C, Wang L. Evaluation of the antimicrobial efficacy of neutral electrolyzed water on pork products and the formation of viable but nonculturable (VBNC) pathogens. *Food Microbiology*. 2018;73:227–236. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2018.01.023>
15. Gorbacheva MV, Tarasov VE, Kalmanovich SA, Sapozhnikova AI. Electrochemical activation as a fat rendering technology. *Foods and Raw Materials*. 2021;9(1):32–42. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-32-42>
16. Watanabe M, Yamada C, Maeda I, Techapun C, Kuntiya A, Leksawasdi N, et al. Evaluating of quality of rice bran protein concentrate prepared by a combination of isoelectronic precipitation and electrolyzed water treatment. *LWT*. 2019;99:262–267. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.059>
17. Li Z-H, Zhou B, Li X-T, Li S-G. Effect of alkaline electrolyzed water on physicochemical and structural properties of apricot protein isolate. *Food Science and Biotechnology*. 2019;28(1):15–23. <https://doi.org/10.1007/s10068-018-0439-5>
18. Gerliani N, Hammami R, Aider M. Extraction of protein and carbohydrates from soybean meal using acidic and alkaline solutions produced by electro-activation. *Food Science and Nutrition*. 2020;8(2):1125–1138. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1399>
19. Li Y, Zeng Q-H, Liu G, Peng Z, Wang Y, Zhu Y, et al. Effects of ultrasound-assisted basic electrolyzed water (BEW) extraction on structural and functional properties of Antarctic Krill (*Euphausia superba*) proteins. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;71. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105364>
20. Momen S, Alavi F, Aider M. Alkali-mediated treatments for extraction and functional modification of proteins: Critical and application review. *Trends in Food Science and Technology*. 2021;110:778–797. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.052>
21. Karim A, Aider M. Sustainable electroisomerization of lactose into lactulose and comparison with the chemical isomerization at equivalent solution alkalinity. *ACS Omega*. 2020;5(5):2318–2333. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03705>
22. Aloo SO, Ofori FK, Kilonzi SM, Shabbir U, Oh DH. Edible plant sprouts: Health benefits, trends, and opportunities for novel exploration. *Nutrients*. 2021;13(8). <https://doi.org/10.3390/nu13082882>
23. Borisenko AA. Quantum-chemical study of dispersion medium influence on the emulsifying ability of milk proteins. *Vestnik of MSTU*. 2016;19(3):569–576. (In Russ.). <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2016-3-569-576>
24. Liu R, Yu Z-L, Sun Y-L, Tong L-T, Liu L-Y, Wang L-L, et al. Quality improvement effects of electrolyzed water on rice noodles prepared with semidry-milled rice flours. *Food Science and Biotechnology*. 2021;30(6):823–832. <https://doi.org/10.1007/s10068-021-00923-x>
25. Chen Y-X, Guo X-N, Xing J-J, Sun X-H, Zhu K-X. Effects of wheat tempering with slightly acidic electrolyzed water on the microbial, biological, and chemical characteristics of different flour streams. *LWT*. 2020;118. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108790>
26. Nabok MV, Plutahin GA. Baking wheat bread using electro-activated aqueous solutions. *International Resonance Technology Information System*. 2004;(45–2). (In Russ.).  
Набок М. В., Плутахин Г. А. Выпечка пшеничного хлеба с использованием в тестозамешивании электроактивированных водных растворов // Международная Инфо-Система по Резонансным Технологиям. 2009. № 45–2.
27. Momen S, Alavi F, Aider M. Impact of alkaline electro-activation treatment on physicochemical and functional properties of sweet whey. *Food Chemistry*. 2022;373. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131428>
28. Orlov BYu, Stepanova EG, Zaytsev AS. Study of the rheological properties of food materials processed by methods of electrotechnology. *Almanac of the World Science*. 2017;17(2–1):65–66. (In Russ.).  
Орлов Б. Ю., Степанова Е. Г., Зайцев А. С. Исследование реологических свойств пищевых материалов, обработанных методами электротехнологии // Альманах мировой науки. 2017. Т. 17. № 2–1. С. 65–66.
29. Sokol NV, Atroshchenko EA. Study of the effect of electrochemically activated water on rheological properties of dough and quality of bread. *New Technologies*. 2019;(1):170–177. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2072-0920-2019-10117>
30. Nilova L, Naumenko N, Kalinina I. A study of the forms of bound water in bread and bakery products using differential thermal analysis. *Agronomy Research*. 2017;15(S2):1386–1398.

31. Cappelli A, Bettaccini L, Cini E. The kneading process: A systematic review of the effects on dough rheology and resulting bread characteristics, including improvement strategies. *Trends in Food Science and Technology*. 2020;104:91–101. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.08.008>

32. Naumenko NV. Effect of activated water on the development and maintenance of wheat bread quality. *Cand. sci. eng. abstract diss.* St. Petersburg: Saint Petersburg State Institute of Trade and Economy; 2007. 18 p.

Науменко Н. В. Влияние активированной воды на формирование качества и сохраняемость хлеба из пшеничной муки: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2007. 18 с.

33. Li L, Li W, Hu B. Electrostatic field-induced tip-electrospray ionization mass spectrometry for direct analysis of raw food materials. *Journal of Mass Spectrometry*. 2018;54(1):73–80. <https://doi.org/10.1002/jms.4309>

34. Akhtar M-J, Mondor M, Aïder M. Impact of the drying mode and ageing time on sugar profiles and antioxidant capacity of electro-activated sweet whey. *International Dairy Journal*. 2018;80:17–25. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2017.12.013>

35. Kiryukhina AN, Grigoreva RZ, Kozhevnikova AYU. Bread production and bakery products in Russia: Current state and prospects. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2019;49(2):330–337. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-2-330-337>

36. Djouab A, Aïder M. Effect of drying temperature on the antioxidant capacity of a cathodic electroactivated whey permeate. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2019;7(5):5111–5121. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b05962>

37. Gur'ev SS, Popov VS. Properties of starter cultures based on non-traditional flours. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021;51(3):470–479. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-3-470-479>

38. Makarov AS, Lutkov IP. Yeast race effect on the quality of base and young sparkling wines. *Foods and Raw Materials*. 2021;9(2):290–301. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-290-301>