ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-768-778

Оригинальная статья
http://fptt.ru

Технологические особенности и теоретическое обоснование применения механически активированной воды в производстве мучных изделий

С. Д. Руднев[1], Т. В. Шевченко[1], Ю. В. Устинова[1,*], Р. В. Крюк[1], В. В. Иванов[2], А. М. Чистяков[1]

[1] *Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия*

[2] *ООО «Кузбассхлеб», Кемерово, Россия*

Поступила в редакцию: 11.05.2021
Принята после рецензирования: 20.09.2021
Принята в печать: 01.12.2021

**e-mail: yul48888048@yandex.ru*
© С. Д. Руднев, Т. В. Шевченко, Ю. В. Устинова, Р. В. Крюк, В. В. Иванов, А. М. Чистяков, 2021

Аннотация.
Введение. В питании населения Российской Федерации мучные изделия занимают ведущее место. Для повышения их качества используют активацию воды. Целью работы является воздействие на воду подведенной механической энергии для изменения физико-химических свойств теста, приготовленного на активированной воде, с одновременной оценкой энергетической эффективности предлагаемого технологического процесса и определение качественных показателей хлеба.
Объекты и методы исследования. Мука пшеничная первого сорта; вода питьевая; дрожжи хлебопекарные прессованные вида *Saccharomyces cerevisiae*. Для оценки физико-химических свойств воды использовали стандартные методы исследования: определение показателя кислотности (pH), коэффициентов поверхностного натяжения и биологической активности. Физико-химические свойства полученного теста на активированной воде изучали реологическими методами: определение предельного напряжения сдвига и адгезионно-когезионной прочности (адгезия).
Результаты и их обсуждение. Определены технологические свойства активированной воды: увеличение кислотности за счет снижения величины pH до 6,05; поверхностное натяжение снижается на 10 % при общем времени перемешивания 10 мин, а через 5 мин – на 4 %; биологическая активность активированной воды увеличилась в 1,5 раза. Механически обработанная вода, используемая для производства хлеба, способствует общему энергосбережению при замесе теста и повышению его водосвязывающей способности. Влага на 30–40 % интенсивнее удаляется из теста, замешанного с водой, не подвергнутой механоактивации. Отмечено изменение качества клейковины, основанное на повышении напряжения сдвига, придающей полученному тесту повышенные формующие свойства, необходимые для производства качественного хлеба. С применением механоактивированной воды удельный объем хлеба повысился с 2,05 до 2,38 см^3/г.
Выводы. Доказана возможность изменять физико-химические и реологические свойства опытных партий теста, а также основные органолептические и качественные показатели хлеба: пористость и повышение упругости хлебного мякиша.

Ключевые слова. Мучные изделия, хлеб, механоактивация воды, поверхностное натяжение, биологическая активность воды, приготовление теста, энергозатраты, качество хлеба

Финансирование. Исследования были выполнены на базе ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» (КемГУ).

Для цитирования: Технологические особенности и теоретическое обоснование применения механически активированной воды в производстве мучных изделий / С. Д. Руднев [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 768–778. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-768-778.

Original article

Available online at http://fptt.ru/eng

Technology and Theory of Mechanically Activated Water in Bakery Industry

Sergey D. Rudnev[1], Tatyana V. Shevchenko[1], Yulia V. Ustinova[1,*], Roman V. Kryuk[1], Viktor V. Ivanov[2], Andrey M. Chistyakov[1]

[1] Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

[2] LLC Kuzbasskhleb, Kemerovo, Russia

Received: May 11, 2021

Accepted in revised form: September 20, 2021
Accepted for publication: December 01, 2021

*e-mail: yul48888048@yandex.ru
© S.D. Rudnev, T.V. Shevchenko, Yu.V. Ustinova, R.V. Kryuk, V.V. Ivanov, A.M. Chistyakov, 2021

Abstract.
Introduction. Bakery products are an important part of traditional Russian menu. Activated water helps to improve the quality of flour products. The present research objective was (1) to activate water with mechanical energy to change the physico-chemical properties of the dough; (2) to evaluate the energy efficiency of the new technological process, and (3) to determine the quality indicators of bread.
Study objects and methods. The research featured high quality wheat flour, drinking water, and pressed baking yeast (*Saccharomyces cerevisiae*). Standard research methods were used to assess the physical and chemical properties of water, namely acidity index (pH), surface tension coefficient, and biological activity. The physico-chemical properties of the dough were studied by maximum shear stress and adhesion.
Results and discussion. The samples of activated water demonstrated the following technological properties. Its acidity due decreased as pH fell down to 6.05. With a total mixing time of 10 min, the surface tension decreased by about 10%; after 5 min, it decreased by 4%, while the biological activity of activated water increased by 1.5 times. Mechanically treated water used for bread production contributed to the overall energy saving during kneading and increased its water-binding ability. Moisture removal was by 30–40% more intensive than in the control dough sample. Also, the quality of gluten changed as a result of higher shear stress, which gave the experimental dough better forming properties necessary for the production of high-quality bread. The mechanically activated water increased the specific volume of bread from 2.05 to 2.38 cm^3/g.
Conclusion. The activated water improved the physico-chemical and rheological properties of dough, as well as the main sensory indicators of bread, e.g. porosity and bread crumb elasticity.

Keywords. Flour products, bread, mechanical activation of water, surface tension, biological activity of water, dough preparation, energy consumption, quality of bread

Funding. The research was carried out on the premises of the Kemerovo State University (KemSU).

For citation: Rudnev SD, Shevchenko TV, Ustinova YuV, Kryuk RV, Ivanov VV, Chistyakov AM. Technology and Theory of Mechanically Activated Water in Bakery Industry. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):768–778. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-768-778.

Введение

Хлеб – это один из универсальных пищевых продуктов, содержащих комплекс жизненно необходимых веществ (углеводы, белки, жиры, витамины и др.) [1]. Он обеспечивает около 30 % необходимых для человека питательных веществ при ежегодной потребности хлеба для одного человека 120–125 кг/год. По количеству и качеству выпекаемого хлеба судят о степени развития и благосостоянии страны. Хлебобулочные изделия всегда присутствуют в рационе человека.

Основным направлением прогресса в хлебопекарной промышленности является повышение эффективности производства и качества выпекаемых хлебобулочных изделий. Производство хлеба – многостадийный технологический процесс. При его проведении используются такие традиционные сырьевые компоненты, как мука, вода, дрожжи, пищевая соль и некоторые второстепенные добавки, относящиеся к пищевым улучшителям. На сегодняшний день существует множество разновидностей хлеба и различных технологий его приготовления. В последние годы возросла потребность в муке высших сортов и качественной воде. Одновременно с ростом объема производства необходимо обеспечить дальнейшее повышение качества сырья и готовой продукции. Эти задачи могут быть решены только на основе повышения эффективности производства путем совершенствования технологии, модернизации оборудования и внедрения научных разработок в производство. Технологический процесс производства хлебобулочных изделий относится к сложным процессам, где свойства сырья оценивают выходом и качеством готовой продукции [2, 3].

Мука – основной пищевой компонент хлеба, содержащий, в зависимости от сорта, природные высокомолекулярные соединения в различных соотношениях. Они относятся к различным классам органических соединений с отличающимися друг от друга функциональными группами: углеводы (крахмал) – более 80 %, растительные белки – 14–15 % и др.

Дрожжи – основа биохимических процессов при созревании теста. Это одноклеточные живые микроорганизмы, являющиеся натуральными разрыхлителями. Углекислый газ, выделяемый при активной работе биологической системы, придает пористость и воздушность готовой хлебной выпечке. Важно обеспечить при производстве такие условия, при которых дрожжи «съедят» муки меньше, а углекислого газа выделят больше. Поэтому основной задачей является создание всех необходимых условий для активного выделения дрожжами углекислого газа.

Вода – необходимый компонент в хлебопечении, являющийся одновременно и растворителем, и реагентом в сложных физико-химических, коллоидных и биохимических процессах при хлебопечении. Это объясняется ее особыми физико-химическими характеристиками.

Растворение происходит за счет образования водородных мостиков с гидроксильными группами сахаров и спиртов, карбонильными группами альдегидов и кетонов. При приготовлении теста вода играет важную роль, т. к. от ее массовой доли, состояния, активности и химического состава зависит интенсивность физико-химических, биохимических, микробиологических и коллоидных процессов, влажность хлебопекарных полуфабрикатов и их консистенция, влажность готового хлеба и его пищевая ценность.

Активация воды как способ повышения качества хлебобулочных изделий стала использоваться недавно и применяется ограниченно. Существуют данные о целесообразности применения воды активированной термообработкой, дегазацией, ионизацией серебром, акустическими и оптическими воздействиями, а также другими способами [4]. Подвергнутая униполярному воздействию, активированная вода переходит в неравновесное состояние и в течение времени релаксации проявляет аномально высокую химическую активность. Это может оказать положительное влияние на качество хлебобулочных изделий.

Повышенную диэлектрическую проницаемость имеют молекулы воды. Линейный размер небольшой и составляет 0,276 нм. Дипольный момент составляет 1,84 Дб. Кроме того, вода – это особое многофункциональное вещество, являющееся неорганическим полимером сложной кластерной организации, образованной за счет сетки водородных связей. Между отдельными кластерами $(H_2O)_{15–16}$ с размером до 120 мкм при комнатной температуре находится некоторое количество молекулярной воды, которая является простейшим кластером (рис. 1).

При подведении к водной системе различных видов энергии (тепловая, волновая, световая и др.) возможно разрушение больших кластеров с образованием малых, более активных. Например, $(H_2O)_{3–5}$. Активированная вода с диспергированными кластерами при любом способе активации обладает

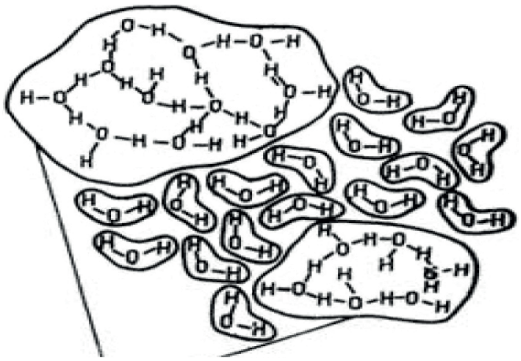


Рисунок 1. Структура воды

Figure 1. Water structure

высокой поверхностной активностью за счет сниженного поверхностного натяжения, повышенной растворяющей способности и увеличенной биологической активности (повышенная скорость прохождения через биологические клеточные мембраны, канцерогены и радионуклеиды) [5]. Установлено, что продолжительность жизни клеток живых организмов в активированной воде увеличивается в 10–15 раз [6].

В настоящее время особое внимание уделяется водоподготовке для хлебопечения с целью ее предварительного активирования различными физико-химическими способами: электрохимическими, ультразвуком, радиацией, микроволнами и др. [7–11]. Наиболее доступным и простым технологическим приемом активирования воды является ее механическая или механохимическая обработка при перемешивании, т. е. механохимия является перспективным направлением интенсификации многих технологических процессов [12–15].

Цель настоящей работы: количественная оценка изменения физико-химических свойств воды под действием подведенной механической энергии и определение технологических параметров активации воды; количественная оценка изменения физико-химических свойств теста, приготовленного на активированной воде, с одновременной оценкой энергетической эффективности предлагаемого технологического процесса; определение качественных показателей хлеба, выпеченного при использовании активированной воды.

Объекты и методы исследования

В работе использовались следующие сырьевые компоненты: мука пшеничная первого сорта с показателями по ГОСТ 26574-2017; вода питьевая по СанПиН 2.1.4.107-01; дрожжи хлебопекарные-сахаромицеты.

Работа состояла из трех стадий: 1 – подготовка воды с помощью интенсивного механического

перемешивания и исследование изменений некоторых физико-химических свойств: показателя кислотности pH, коэффициента поверхностного натяжения, биологической активности (*A*); 2 – приготовление теста на активированной воде, определение физико-химических и технологических свойств полученного теста; 3 – выпечка хлеба из полученного теста и оценка его потребительских свойств.

Подготовка активированной воды. В качестве основного объекта исследований использовалась вода питьевая. При комнатной температуре ее перемешивали венчиковой мешалкой с угловой скоростью 180 об/мин. После механической обработки определены физико-химические свойства полученной активированной воды.

Оценка физико-химических свойств воды. pH воды определялся после различного времени перемешивания на стандартном лабораторном потенциометре со стеклянным и хлорсеребряным электродами (pH-метр АНИОН 4100). Температура контролировалась этим же прибором. Для определения поверхностного натяжения применялись стеклянные капилляры диаметром 0,25 мм.

Оценку биологической активности полученной активированной воды проводили с использованием тест-объектов (пекарские дрожжи вида *Saccharomyces cerevisia*), которые широко используются для производства хлеба. Методика оценки основана на способности дрожжей в процессе брожения в присутствии полисахаридов выделять углекислый газ и повышать скорость размножения дрожжей. Повышение биологической активности воды (*A*) определялось при сравнении объемов выделяющегося углекислого газа для неактивированной (V_o) и активированной воды (V_a) по формуле:

$$A = (V_a - V_o)/V_o \quad (1)$$

Результаты и их обсуждение

В таблице 1 представлены результаты испытаний оценки физико-химических свойств воды.

Таблица 1. Зависимость pH воды от времени перемешивания

Table 1. Effect of pH of water on kneading time

t, мин	pH	t, мин	pH
0	7,00	6	6,03
1	6,50	7	6,02
2	6,25	8	6,01
3	6,15	9	6,00
4	6,10	10	6,00
5	6,05	11	6,00

Из результатов, представленных в таблице 1, следует, что значение величины pH монотонно снижается (нарастание кислотности) с увеличением времени перемешивания. Из-за повышенной растворимости кислорода воздуха в воде происходит изменение свойств механически обработанной воды. При температуре 25 °C и стандартных равновесных условиях растворимость кислорода в чистой воде составляет 8,3 мг/л. Возможно увеличение растворимости в несколько раз при принудительном контакте кислорода воздуха с водой (закон Генри) [16–20]. При этом образуется реакция 1 с одновременным образованием перекиси водорода. Константа равновесия составляет $K = 1{,}4\times10^{-12}$ [20].

$$\text{Реакция 1: } H_2O + 1/2O_2 = H_2O_2 \quad (2)$$

В молекулах полученного пероксида водорода связь O–O непрочная, поэтому перекись водорода легко разрушается по двум ступеням [10]:

$$\text{Реакция 2: } H_2O_2 = H^+ + HO^{-2} \quad (3)$$

$$\text{Реакция 3: } HO^{-2} - = H^+ + O^{-2} \quad (4)$$

Распад перекиси водорода идет по первой стадии (реакция 2). Вторая стадия распада (реакция 3) реализуется слабо.

Из проведенных испытаний следует, что механически обработанная вода подкисляется и одновременно имеет повышенную концентрацию кислорода. Это может оказывать положительное воздействие на биохимические процессы при замесе теста.

Результаты эксперимента определения поверхностного натяжения (σ) представлены в таблице 2.

Из таблицы 2 следует, что поверхностное натяжение воды уменьшается при увеличении времени механической обработки экспоненциально. Установлено, что на первой стадии обработки (5 мин) при общем времени перемешивания 10 мин оно снижается примерно на 10 %, а через 5 мин – еще на 4 %. Обработанная вода приобретает некоторые

Таблица 2. Зависимость поверхностного натяжения воды от времени перемешивания

Table 2. Effect of kneading time on surface tension

t, мин	$\sigma\times10^3$, Дж/м^2	t, мин	$\sigma\times10^3$, Дж/м^2
0	72,0	6	62,0
1	71,5	7	61,5
2	70,8	8	61,3
3	65,2	9	61,2
4	64,0	10	61,0
5	63,0	11	61,0

свойства ПАВ, обладая высокой текучестью и повышенной растворяющей способностью.

При оценке биологической активности полученной активированной воды экспериментально установлено, что в образце с ее использованием объем выделенного углекислого газа повысился в 1,5 раза по сравнению с объемом газа в неактивированной воде. Это указывает на повышенную биологическую активность механически обработанной воды. Механизм увеличения ее активности можно объяснить повышенной концентрацией кислорода, а также изменением кластерной структуры.

Теоретический анализ. Взаимодействие воды с белками растительного происхождения изучалось в замесе теста хлебопекарного. Процесс структурообразования теста определяет качество полуфабриката и готового изделия (хлеба), влияет на последующие технологические процессы и работу всего технологического оборудования.

При замесе выделяют физико-механические процессы превращения отдельно существующих сыпучих и жидких компонентов в однородную смесь заданного соотношения; коллоидные процессы смачивания, диффундирования и растворения; возникновение губчато-сетчатой структурной основы – клейковинного каркаса теста.

На наш взгляд, важнейшим является начальный период замеса – образование однородной смеси. Получить однородную смесь порошка с водой, когда удельная поверхность контакта составляет 250–350 м^2/кг, непростая задача. Можно попытаться представить, что 0,3–0,4 л воды растекаются на поверхности площадью 300 м^2. Нетрудно посчитать, какой толщины должна получиться пленка воды – менее 1–2 мкм. Следовательно, стоит задача диспергировать воду до размеров ее частиц в 1 мкм. Тогда мы получим однородную дисперсную структуру. Но сделать это надо до того, как начнется вторая стадия процесса. Иначе образуются конгломераты, препятствующие смесеприготовлению. Их разрушение – дополнительные затраты энергии и потеря качества. Кроме диспергирования воды, основная задача – обеспечить максимальное смачивание водой поверхности частиц, размеры которых составляют 45–50×10^{-6} м. Форма частиц – сложная, поверхность их неоднородная. Здесь на первый план выходит фактор снижения поверхностной энергии на границе контакта «вода – частица муки».

Обратимся к классической термодинамике. Процесс смачивания описывается равенством Юнга:

$$\sigma_{Т} = \sigma_{ТЖ} + \sigma_{Ж} \cdot \cos\varphi \quad (5)$$

где $\sigma_{Т}$ – равновесное поверхностное натяжение твердого тела, Н/м; $\sigma_{Ж}$ – равновесное поверхностное натяжение жидкости, Н/м; $\sigma_{ТЖ}$ – межфазное поверхностное натяжение на границе твердое тело – жидкость, Н/м; φ – кажущийся краевой угол, град.;

Обратимая работа адгезии жидкости $W_{А}$ к поверхности частиц сыпучего материала аналитически выражается уравнением Дюпре:

$$W_{А} = \sigma_{Т} + \sigma_{Ж} - \sigma_{ТЖ} \quad (6)$$

Сочетание (5) и (6) дает выражение:

$$W_{А} = \sigma_{Ж} (1+\cos\varphi) \quad (7)$$

На основе выражения (5) удельная обратимая работа когезии $W_{К}$:

$$W_{К} = 2 \cdot \sigma_{Ж} \quad (8)$$

При условии самопроизвольного растекания жидкости по поверхности твердого тела:

$$\sigma_{Ж} (\cos\varphi - 1) > 0 \quad (9)$$

Разница $W_{А}$ и $W_{К}$ дает коэффициент растекания S:

$$[\![S = W_{А} - W_{К}]\!] = \sigma_{Ж} (1 + \cos\varphi) \quad (10)$$

Из уравнения (6) следует, что поверхностная энергия и жидкости, и частицы для возникновения контакта между ними может быть высокой, но поверхностную энергию их взаимодействия необходимо снижать каким-либо способом. При этом

$$\sigma_{Т} > \sigma_{Ж} \quad (11)$$

Отсюда следует технологическая задача: снизить поверхностную энергию воды при ее смешивании с сыпучим материалом.

Лабораторные испытания. Осуществлялись на исследовательском оборудовании кафедры машин и аппаратов технологических систем КемГУ. Для исследований применялись анализатор текстуры «Структурометр СТ-2» и анализатор влажности МХ-50 (Япония). Исследовался процесс замеса теста в соотношении, которое соответствует составу хлебопекарного изделия. Использовали лабораторное оборудование: миксер планетарный бытовой с процессной емкостью объемом 3 л, венчиковой мешалкой и дискретным числом ее оборотов (100, 180, 260, 320 об/мин). Мощность, потребляемая миксером при замесе, контролировалась ваттметром и фиксировалась видеосъемкой для дальнейшей обработки в среде Microsoft Excel. Измерялась мощность при замесе, изучалась релаксация и процесс влагоудаления при сушке, определялось предельное напряжение сдвига полученного теста.

Графики потребляемой при замесе мощности представлены на рисунке 2: тонкими линиями – экспериментальные кривые, основными линиями – линии тренда (полиномы 3 порядка). Анализ результатов показывает, что тесто с механоактивированной водой легче замешивается на первом этапе и в начале второго, но затем

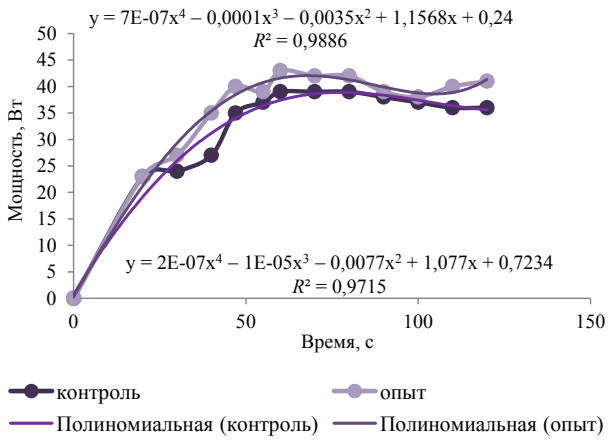


Рисунок 2. Графики потребляемой при замесе мощности

Figure 2. Energy consumption during kneading

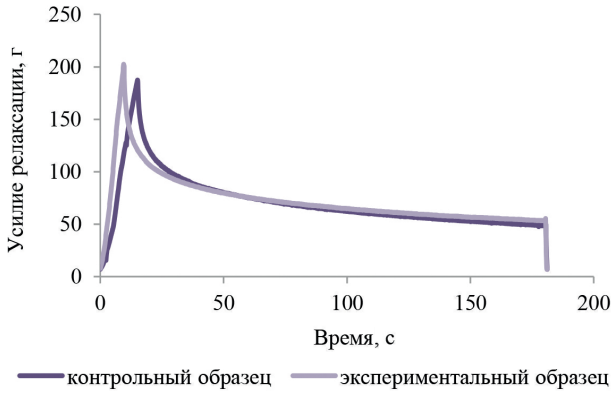


Рисунок 3. Зависимость усилия релаксации напряжений для теста пшеничного

Figure 3. Dependence of stress relaxation effort for wheat dough

энергопотребление значительно вырастает. Это свидетельствует об ускоренном формировании белковой каркасной структуры теста.

При том же составе структура теста стала более упругой (рис. 3). Его адгезия снизилась на 40 % (рис. 4). Адгезия влияет на сцепление поверхностей разнородных твердых или жидких тел [21]. Предельное напряжение сдвига теста экспериментального образца, измеренное сразу же после замеса, было выше на 30 % (рис. 5). Со временем напряжения, возникшие в процессе формирования структуры в тесте, релаксируют, но упругость по-прежнему превышает этот показатель для контрольного образца.

Рисунок 6 иллюстрирует повышение водосвязывающей способности теста с предварительной механоактивацией воды. Влага из теста, замешанного с водой, не подвергнутой механоактивации, на 30–40 % интенсивнее покидает материал.

Производственные испытания. Замесы теста с механоактивацией воды проводились на хлебозаводе № 1 ООО «Кузбассхлеб» в месильной емкости миксером для строительных смесей со спиральным рабочим органом в течение 300 с. Для хлеба формового сорта «Кемеровский» изучалось влияние механоактивации при замесе теста хлебопекарного. В работе использовалась мука пшеничная 1 сорта. Опытные испытания проводились с использованием тестомесильной машиной Г4-МТМ-330-01 (рис. 7). Из графиков следует, что в начальный период

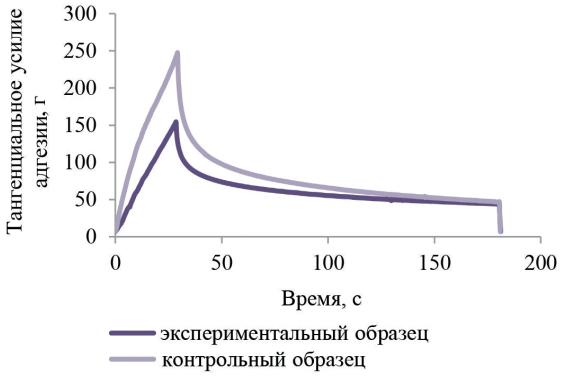


Рисунок 4. Зависимость тангенциальной адгезии для теста пшеничного

Figure 4. Dependence of tangential adhesion for wheat dough

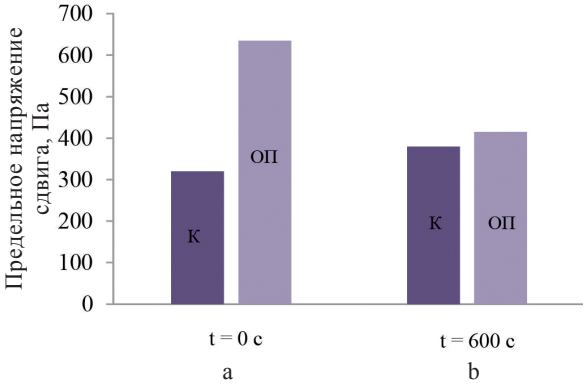
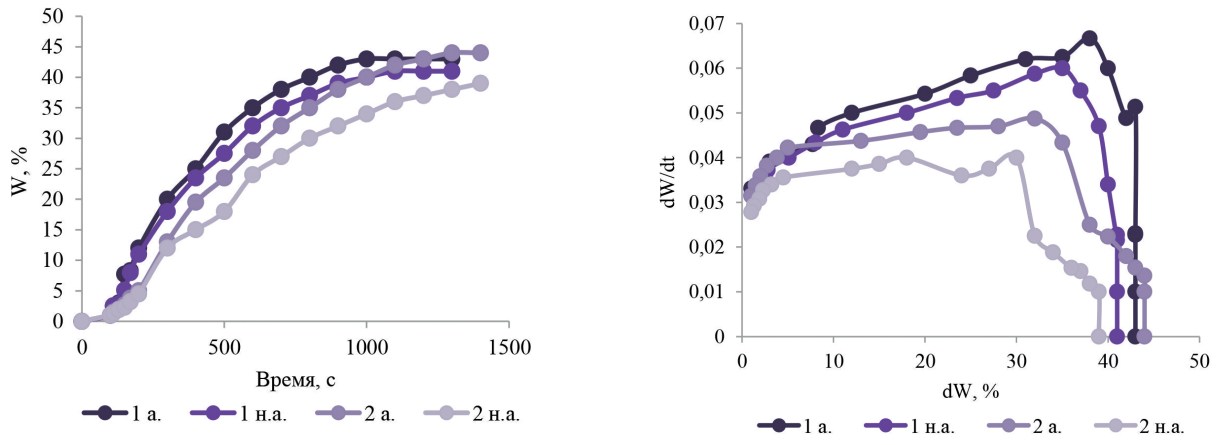


Рисунок 5. Изменение предельного напряжения сдвига теста пшеничного во времени: a – сразу после замеса; b – через 600 с после замеса

Figure 5. Changes in the ultimate shear stress of wheat dough: a – immediately after kneading; b – 600 s after kneading



a b

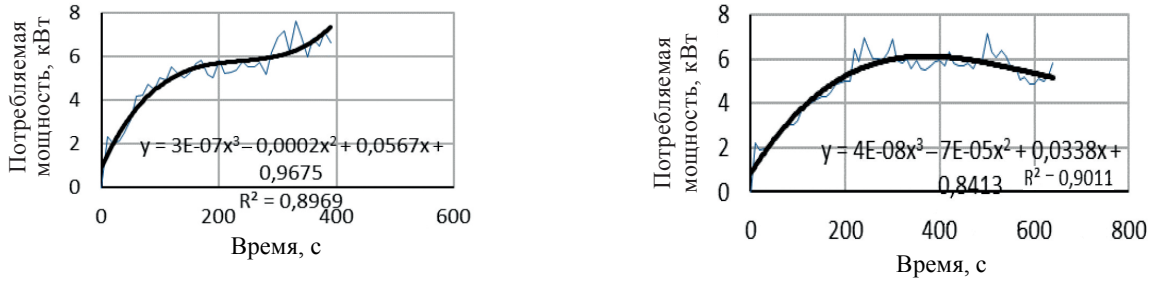
Рисунок 6. Графики влагоудаления (a) и кинетики сушки (b) теста хлебопекарного с временным интервалом 2700 с: 1н.а. и 2н.а. – контрольный образец; 1а. и 2а. – образец с активированной водой

Figure 6. Moisture removal (a) and drying kinetics (b) of bakery dough with a time interval of 2700 s: 1н.а., 2н.а. – control sample; 1а., 2а. – sample with activated water

времени (до 200 с) при равных технологических и технических параметрах потребление мощности значительно ниже (примерно на 40 %). Проведенные опыты привели к ускоренному структурообразованию в тесте. Установлено, что снижение поверхностного натяжения резко улучшилось при смачиваемости муки водой. Максимальная мощность была достигнута через 220–240 с, а максимальная мощность у контрольного образца наблюдался через 300–330 с. Экспериментальный образец оказался выше на 30 % при предельном напряжении сдвига теста.

Из проведенных исследований можно сделать вывод о влиянии механоактивации на начальном периоде взаимодействия муки с водой, когда смачиваемость муки резко улучшается за счет снижения поверхностного натяжения активированной воды. Высокое предельное напряжение сдвига, водосвязывающая способность и структура теста отличаются в опытном образце. Это объясняется тем, что энергия активированной воды передается компонентам муки (углеводы и белки), которые при взаимодействии во время замеса теста образуют прочную клейковину и увеличивают водопоглощение получаемого теста [22–32].

Оценка потребительских свойств хлеба на активированной воде. Экспериментально установлено, что для образцов хлеба, полученного с применением механоактивированной воды, удельный объем хлеба повысился с 2,05 до 2,38 см^3/г, а характер пористости хлеба изменился. Для контрольного образца поры



a b

Рисунок 7. Зависимости потребляемой мощности во времени при замесе теста пшеничного из муки 1 сорта тестомесильной машиной Г4-МТМ-330-01: a – контрольный замес; b – замес с механоактивированной водой

Figure 7. Power consumption and kneading time for high-quality wheat dough with a dough mixer G4-MTM-330-01: a – control sample; b – sample with mechanically activated water

Таблица 3. Сравнительная характеристика образцов хлеба

Table 3. Comparative characteristics of bread samples

Образец	Контроль № 1	Опыт № 1	Контроль № 2	Опыт № 2
Масса остывшего хлеба, г	400	403	493	497
Пористость, %	66,1	66,6	71,4	71,5
Объем хлеба, см^3	820	830	1175	1200

неравномерные, вытянутые, надрывистые, с преобладанием пор большего диаметра (5–6 мм) и значительным их уплотнением возле нижней корки формового хлеба. Для экспериментального образца пористое пространство хлеба изменилось: образующиеся без подрывов поры со средним диаметром 3–4 мм равномерно распределяются по всему объему выпеченного хлеба. Это изменение пористости хлеба способствовало изменению и других его потребительских свойств. Результаты экспериментов показали, что мякиш экспериментального образца в 1,4 раза был более упругим, чем в контрольном образце.

В таблице 3 представлены потребительские характеристики хлеба по результатам испытаний двух его образцов.

Из таблицы 3 следует, что для опытных образцов увеличиваются масса остывшего хлеба, благодаря повышению водосвязывающей способности теста, пористость за счет более совершенной работы дрожжей и общий объем остывшего хлеба.

Выводы

Изучено изменение физико-химических свойств воды после ее механической обработки (pH, поверхностное натяжение, биологическая активность). Механически обработанная вода подкисляется, имеет повышенную биологическую активность и пониженное поверхностное натяжение, обладает высокой текучестью и повышенной растворяющей способностью. Установлено влияние механоактивации воды в начальный период взаимодействия муки и воды. Доказано, что при повышении смачиваемости энергия перемешивания воды и муки снижается на 30–40 %. Сформированная структура теста обладает высоким предельным напряжением сдвига и повышенной водосвязывающей способностью.

Предварительная механоактивация воды перед замесом теста вносит изменения в качество хлеба: наблюдается повышение объема хлеба и его упругости с одновременным равномерным распределением пор.

В результате проведенных исследований выявлено, что применение механоактивации воды позволит регулировать качество теста и получать продукцию высокого качества, тем самым повысит конкурентоспособность предприятия на рынке.

Критерии авторства

С. Д. Руднев и Т. В. Шевченко – организация исследований, получение фактического материала, написание рукописи. Ю. В. Устинова и Р. В. Крюк – общая редакция рукописи. В. В. Иванов и А. М. Чистяков – аналитический обзор литературы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

S.D. Rudnev and T.V. Shevchenko organized the research, obtained factual data, and drafted the manuscript. Yu.V. Ustinova and R.V. Kryuk revised the manuscript. V.V. Ivanov and A.M. Chistyakov performed the analytical review.

Conflict of interest

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

Список литературы

1. Hussein A. M. S., Ibrahim G. E. Effects of various brans on quality and volatile compounds of bread // Foods and Raw Materials. 2019. Vol. 7. № 1. P. 42–50. http://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-1-42-50.

2. Барышникова Н. И., Резниченко И. Ю., Вайскробова Е. С. Разработка системы управления безопасностью на основе принципов ХАССП при производстве хлеба из пшеничной муки // Техника и технология пищевых производств. 2017. Т. 47. № 4. С. 115–122. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2017-4-115-122.

3. Reasons for the ways of using oilcakes in food industry / M. S. Bochkarev [и др.] // Foods and Raw Materials. 2016. Vol. 4. № 1. P. 4–12. https://doi.org/10.21179/2308-4057-2016-1-4-12.

4. Науменко Н. В. К вопросу о качестве хлеба и хлебобулочных изделий // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2013. Т. 1. № 2. С. 45–49.

5. Способ изменения поверхностного натяжения водных растворов поверхностно-активных веществ / Т. В. Шевченко [и др.] // Фундаментальные исследования. 2015. № 2–26. С. 5787–5790.

6. Кравченко В. Н., Мазаев Ю. В., Яшин И. С. Основные показатели активированной воды с учетом ее разбавления // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2018. Т. 31. № 3. С. 174–177.

7. Сокол Н. В., Атрощенко Е. А. Исследование влияния электрохимически активированной воды на реологические свойства теста и качество хлеба // Новые технологии. 2019. № 1. С. 170–177. https://doi.org/10.24411/2072-0920-2019-10117.

8. Изменение свойств воды и водосодержащих систем при использовании низкоэнергетических воздействий / Г. Н. Сидоренко [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2018. № 2. С. 99–119. https://doi.org/10.15593/2224-9400/2018.2.08.

9. Оценка процессов структурообразования в воде и водосодержащих средах с использованием электрофизических методов и термометрии / Г. Н. Сидоренко [и др.] // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 2. С. 202–214. https://doi.org/10.31675/1607-1859-2019-21-2-202-214.

10. Прилипко А. В., Иванов В. В. О влиянии предварительной обработки воды на технологические процессы и качество хлеба // Пищевые инновации в биотехнологии: сборник тезисов VI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Кемерово, 2018. С. 56–59.

11. Electrochemical activation asa fat rendering technology / M. V. Gorbacheva [et al.] // Foods and Raw Materials. 2021. Vol. 9. № 1. P. 32–42. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-32-42.

12. Руднев С. Д., Иванов В. В., Крюк Р. В. Совершенствование процесса структурообразования пшеничного теста // Новые технологии. 2019. № 1. С. 149–161. https://doi.org/10.24411/2072-0920-2019-10115.

13. Comparison of dispersion behavior of agglomerated particles in liquid between ultrasonic irradiation and mechanical stirring / S. Sumitomo [et. al.] // Ultrasonics Sonochemistry. 2018. Vol. 40. P. 822–831. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.08.023.

14. Brown P. S., Bhushan B. Bioinspired materials for water supply and management: water collection, water purification and separation of water from oil // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2016. Vol. 374. № 2073. https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0135.

15. Sun C. Q., Sun Y. The attribute of water. Single notion, multiple myths. Singapore: Springer, 2016. 494 p. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0180-2.

16. Comparison of liquid state anomalies in Stillinger-Weber models of water, silicon and germanium / D. Dhabal [et al.] // Journal of Chemical Physics. 2016. Vol. 145. № 21. https://doi.org/10.1063/1.4967939.

17. On the time required for freezing water / J. R. Espinosa [et al.] // Journal of Chemical Physics. 2016. Vol. 145. № 21. https://doi.org/10.1063/1.4965427.

18. Rogers J. M., Ichie T. Multipole moments of water molecules and water solvation of monovalent ions // Journal of Molecular Liquids. 2017. Vol. 228. P. 54–62. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.10.007.

19. Torres-Carbajal A., Castañeda-Priego R. Characterization of the thermodynamics, structure and dynamics of a water-like model in 2- and 3-dimensions // Physical Chemistry Chemical Physics. 2016. Vol. 18. № 26. P. 17335–1730. https://doi.org/10.1039/c6cp01565d.

20. Izadi S., Onufriev A. V. Accuracy limit of rigid 3-point water models // Journal of Chemical Physics. 2016. Vol. 145. № 7. https://doi.org/10.1063/1.4960175.

21. Руднев С. Д., Вайман Е. Ф., Яремчук А. И. Интенсификация и повышение качества селективной дезинтеграции адгезионным разупрочнением растительной ткани // Техника и технология пищевых производств. 2010. Т. 17. № 2. С. 50–55.

22. Modeling molecular interactions in water: from pairwise to many-body potential energy functions / G. A. Cisneros [et al.] // Chemical Reviews. 2016. Vol. 116. № 13. P. 7501–7528. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00644.

23. Ben-Amots D. Water-mediated hydrophobic interactions // Annual Review of Physical Chemistry. 2016. Vol. 67. P. 617–638. https://doi.org/10.1146/annurev-physchem-040215-112412.

24. Kronberg B. The hydrophobic effect // Current Opinion in Colloid and Interface Science. 2016. Vol. 22. P. 14–22. https://doi.org/10.1016/j.Cocis.2016.02.001.

25. Grdadolnik J., Marsel F., Avbel F. Origin of hydrophobicity and enhanced water hydrogen bond strength near purely hydrophobic solutes // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2017. Vol. 114. № 2. P. 322–327. https://doi.org/10.1073/pnas.1612480114.

26. Xi E., Patel A. J. The hydrophobic effect, and fluctuations: The long and the short of it // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2016. Vol. 113. № 17. P. 4549–4551. https://doi.org/10.1073/pnas.1603014113.

27. Hillyer M. B., Gibb B. C. Molecular shape and the hydrophobic effect // Annual Review of Physical Chemistry. 2016. Vol. 67. P. 307–329. https://doi.org/10.1146/annurev-physchem-040215-112316.

28. Water determines the structure and dynamics of proteins / M.-C. Bellissent-Funel [et al.] // Chemical Reviews. 2016. Vol. 116. № 13. P. 7673–7697. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00664.

29. Direct synthesis of hydrogen peroxide from plasma-water interactions / J. Liu [et al.] // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. https://doi.org/10.1038/srep38454.

30. Effects of electromagnetic fields exposure on the antioxidant defense system / E. G. Kivrak [et al.] // Journal of Microscopy and Ultrastructure. 2017. Vol. 5. № 4. P. 167–176. https://doi.org/10.1016/j.jmau.2017.07.003.

31. Bread and health / L. Kourkouta [et al.] // Journal of Pharmacy and Pharmacology. 2017. Vol. 5. P. 821–826. https://doi.org/10.17265/2328-2150/2017.11.005.

32. Vladilo G., Hassanali A. Hydrogen bonds and life in the Universe // Life. 2018. Vol. 8. № 1. https://doi.org/10.3390/life8010001.

References

1. Hussein AMS, Ibrahim GE. Effects of various brans on quality and volatile compounds of bread. Foods and Raw Materials. 2019;7(1):42–50. http://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-1-42-50.

2. Baryshnikova NI, Reznichenko IYu, Vayskrobova ES. Development of the safety management system based on hazard analysis and critical control points approach at wheat bread production. Food Processing: Techniques and Technology. 2017;47(4):115–122. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2017-4-115-122.

3. Bochkarev MS, Egorova EYu, Reznichenko IYu, Poznyakovskiy VM. Reasons for the ways of using oilcakes in food industry. Foods and Raw Materials. 2016;4(1):4–12. https://doi.org/10.21179/2308-4057-2016-1-4-12.

4. Naumenko NV. On bread and bakery products quality. Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology. 2013;1(2):45–49. (In Russ.).

5. Shevchenko TV, Novikova YaA, Sannikov YuN, Berdova KA. Method of changing the surface tension of aqueous surfactant solutions. Fundamental research. 2015;(2–26):5787–5790. (In Russ.).

6. Kravchenko VN, Mazaev YuV, Yashin IS. The main indicators of activated water taking into account their dilution. Journal of VNIIMZH. 2018;31(3):174–177. (In Russ.).

7. 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.

8. Sidorenko GN, Laptev BI, Gorlenko NP, Antoshkin LV. Changes in the properties of water and water-containing systems using low-energy influences. PNRPU Bulletin. Chemical Technology and Biotechnology. 2018;(2):99–119. (In Russ.). https://doi.org/10.15593/2224-9400/2018.2.08.

9. Sidorenko GN, Laptev BL, Gorlenko NP, Sarkisov YuS, Antoshkin LV. Electrophysical and temperature calculations of structurization in water and water-containing media. Journal of Construction and Architecture. 2019;21(2):202–214. (In Russ.). https://doi.org/10.31675/1607-1859-2019-21-2-202-214.

10. Prilipko AV, Ivanov VV. O vliyanii predvaritel′noy obrabotki vody na tekhnologicheskie protsessy i kachestvo khleba [Pretreatment of water on technological processes and the quality of bread]. Pishchevye innovatsii v biotekhnologii: sbornik tezisov VI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh [Food Innovations in Biotechnology: Proceedings of the VI International scientific conference of students, graduate students, and young scientists]; 2018; Kemerovo. Kemerovo: Kemerovo State University; 2018. p. 56–59. (In Russ.).

11. 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.

12. Rudnev SD, Ivanov VV, Kryuk RV. Improvement of wheat dough structuring process. New Technologies. 2019;(1):149–161. (In Russ.). https://doi.org/10.24411/2072-0920-2019-10115.

13. Sumitomo S, Koizumi H, Uddin MA, Kato Y. Comparison of dispersion behavior of agglomerated particles in liquid between ultrasonic irradiation and mechanical stirring. Ultrasonics Sonochemistry. 2018;40:822–831. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.08.023.

14. Brown PS, Bhushan B. Bioinspired materials for water supply and management: water collection, water purification and separation of water from oil. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2016;374(2073). https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0135.

15. Sun CQ, Sun Y. The attribute of water. Single notion, multiple myths. Singapore: Springer; 2016. 494 p. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0180-2.

16. Dhabal D, Chakravarty C, Molinero V, Kashyap HK. Comparison of liquid state anomalies in Stillinger-Weber models of water, silicon and germanium. Journal of Chemical Physics. 2016;145(21). https://doi.org/10.1063/1.4967939.

17. Espinosa JR, Navarro C, Sanz E, Valeriani C, Vega C. On the time required for freezing water. Journal of Chemical Physics. 2016;145(21). https://doi.org/10.1063/1.4965427.

18. Rogers JM, Ichie T. Multipole moments of water molecules and water solvation of monovalent ions. Journal of Molecular Liquids. 2017;228:54–62. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.10.007.

19. Torres-Carbajal A, Castañeda-Priego R. Characterization of the thermodynamics, structure and dynamics of a water-like model in 2- and 3-dimensions. Physical Chemistry Chemical Physics. 2016;18(26):17335–1730. https://doi.org/10.1039/c6cp01565d.

20. Izadi S, Onufriev AV. Accuracy limit of rigid 3-point water models. Journal of Chemical Physics. 2016;145(7). https://doi.org/10.1063/1.4960175.

21. Rudnev SD, Vaiman EF, Yaremchuk AI. Intensification and quality improvement of selective disintegration with adhesive softening of plant tissue. Food Processing: Techniques and Technology. 2010;17(2):50–55. (In Russ.).

22. Cisneros GA, Wikfeldt KT, Ojamäe L, Lu J, Xu Y, Torabifard H, et al. Modeling molecular interactions in water: from pairwise to many-body potential energy functions. Chemical Reviews. 2016;116(13):7501–7528. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00644.

23. Ben-Amots D. Water-mediated hydrophobic interactions. Annual Review of Physical Chemistry. 2016;67:617–638. https://doi.org/10.1146/annurev-physchem-040215-112412.

24. Kronberg B. The hydrophobic effect. Current Opinion in Colloid and Interface Science. 2016;22:14–22. https://doi.org/10.1016/j.Cocis.2016.02.001.

25. Grdadolnik J, Marsel F, Avbel F. Origin of hydrophobicity and enhanced water hydrogen bond strength near purely hydrophobic solutes. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2017;114(2):322–327. https://doi.org/10.1073/pnas.1612480114.

26. Xi E, Patel AJ. The hydrophobic effect, and fluctuations: The long and the short of it. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2016;113(17):4549–4551. https://doi.org/10.1073/pnas.1603014113.

27. Hillyer MB, Gibb BC. Molecular shape and the hydrophobic effect. Annual Review of Physical Chemistry. 2016;67:307–329. https://doi.org/10.1146/annurev-physchem-040215-112316.

28. Bellissent-Funel M-C, Hassanali A, Havenith M, Henchman R, Pohl P, Sterpone F, et al. Water determines the structure and dynamics of proteins. Chemical Reviews. 2016;116(13):7673–7697. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00664.

29. Liu J, He B, Chen Q, Li J, Xiong Q, Yue G, et al. Direct synthesis of hydrogen peroxide from plasma-water interactions. Scientific Reports. 2016;6. https://doi.org/10.1038/srep38454.

30. Kivrak EG, Yurt KK, Kaplan AA, Alkan I, Altun G. Effects of electromagnetic fields exposure on the antioxidant defense system. Journal of Microscopy and Ultrastructure. 2017;5(4):167–176. https://doi.org/10.1016/j.jmau.2017.07.003.

31. Kourkouta L, Koukourikos K, Iliadis C, Ouzounakis P, Monios A, Tsaloglidou A. Bread and health. Journal of Pharmacy and Pharmacology. 2017;5:821–826. https://doi.org/10.17265/2328-2150/2017.11.005.

32. Vladilo G, Hassanali A. Hydrogen bonds and life in the Universe. Life. 2018;8(1). https://doi.org/10.3390/life8010001.