

Руднев С.Д., Иванов В.В., Крюк Р.В.
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ
ТЕСТА ПШЕНИЧНОГО

Руднев Сергей Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры машин и аппаратов технологических систем института инженерных технологий
ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»;
Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Красная, 6
Тел.: 8(3842)394868

Иванов Виктор Владимирович, аспирант Кемеровского государственного университета заочной формы обучения, заместитель генерального директора по техническому развитию ОАО «Кузбассхлеб»
Тел.: 8(3842)287484

Крюк Роман Владимирович, аспирант очной формы обучения, заведующий лабораторией кафедры машин и аппаратов технологических систем
Кемеровский государственный университет
Институт инженерных технологий
тел.: 8(3842)394868

Хлебопекарная промышленность играет огромную роль в обеспечении населения России продуктами питания. Хлеб в России имеет особую ценность и ассортимент выпускаемой продукции необычайно широк. Непрерывно разрабатываются новые виды хлебопекарных изделий. В то же время сохраняется производство традиционных видов хлеба, без которых питание в России трудно представить. Сохранение традиций производства, технологии и состава хлебобулочных изделий можно считать одной из национальных основ. Замес занимает особое место в процессе структурообразования в дисперсной системе, называемой тестом, когда в результате механического соединения тонкодисперсного сыпучего материала – муки и жидких компонентов в виде эмульсий или истинного водного раствора образуется упруго-эластично-пластичное капиллярно-пористое реологическое тело, обладающее пространственным клейковинным (белковым) каркасом. Цель исследований: изучить физико-механические особенности формирования структуры теста, влияние механоактивации воды на процесс структурообразования. Применили термодинамический метод исследований. Использовали реологические приборы Структурометр СТ-1, конический пластометр Ребиндера, анализатор влажности МХ-50. Установлено, что механоактивация воды непосредственно перед замесом теста позволяет не менее чем на 30-40 % снизить энергозатраты на замес, повысить эластичность теста, что улучшает работу оборудования для разделки и формования теста, повышает реологические свойства хлеба, что в итоге влияет на его потребительские свойства и конкурентоспособность.

Ключевые слова: тесто пшеничное, структурообразование, механоактивация воды, реологические показатели, предельное напряжение сдвига, хлеб, качество.

Для цитирования: Руднев С.Д., Иванов В.В., Крюк Р.В. Совершенствование процесса структурообразования теста пшеничного // Новые технологии. 2019. Вып. 1(47). С. 149-161. DOI: 10.24411/2072-0920-2019-10115

Rudnev S.D., Ivanov V.V., Kryuk R.V.

IMPROVEMENT OF WHEAT DOUGH STRUCTURING PROCESS

Rudnev Sergey Dmitrievich, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Machines and Apparatus of Technological Systems Institute of Engineering Technologies

FSBEI HE «Kemerovo State University»

Tel.: 8 (3842) 394868

Ivanov Victor Vladimirovich, a part-time post graduate student of Kemerovo State University, deputy general director for technical development

ОАО «Kuzbasskhléb»

Tel.: 8 (3842) 287484

Kryuk Roman Vladimirovich, a full-time post graduate student of Kemerovo State University, head of Laboratory of the Department of Machines and Apparatus Technological Systems

Institute of Engineering Technologies

Tel.: 8(3842)394868

The bakery industry plays a huge role in providing the Russian population with food. Bread in Russia has a special value and the range of bakery products is unusually wide. Continuously new types of baking products are developed. At the same time, production of traditional types of bread is preserved, without which food in Russia is difficult to imagine. Preservation of production, technology and composition traditions of bakery products can be considered as one of the national foundations.

Kneading has a special place in the structuring process in the dispersed system, called dough, when as a result of the mechanical connection of fine particulate material – flour and liquid components in the form of emulsions or a true aqueous solution, an elastically elastic plastic capillary-porous rheological body with spatial gluten (protein) framework is formed.

The purpose of the research: to study physical and mechanical features of the dough structuring, the effect of mechanical activation of water on the process of structure formation. Thermodynamic research method was applied. Structurometer ST-1 rheological device, conical plastometer of Rebinder and MX-50 moisture analyzer were used. It's been established that mechanical activation of water immediately before the dough kneading allows reducing energy consumption for kneading by at least 30-40 %, increasing the dough elasticity, which improves the operation of the equipment for dough cutting and forming, improves rheological properties of bread, which ultimately affects its consumer properties and competitiveness.

Key words: *wheat dough, structuring, water mechanical activation, rheological parameters, ultimate shear stress, bread, quality.*

For citation: Rudnev S.D., Ivanov V.V., Kryuk R.V. Improvement of wheat dough structuring process // Novye tehnologii (Majkop). 2019. Iss. 1(47). P. 149-161. (In Russ., English abstract). DOI: 10.24411/2072-0920-2019-10115

Хлебопекарная промышленность играет огромную роль в обеспечении населения России продуктами питания. Хлеб в России имеет особую ценность и ассортимент выпускаемой продукции необычайно широк. Непрерывно разрабатываются новые виды

хлебопекарных изделий. В то же время сохраняется производство традиционных видов хлеба, без которых питание в России трудно представить. Сохранение традиций производства, технологии и состава хлебобулочных изделий можно считать одной из национальных основ [1].

Технология приготовления хлеба очень разнообразна с научной позиции процессов и аппаратов пищевых производств, но особое место в ней занимает процесс структурообразования в дисперсной системе, называемой тестом, когда в результате механического соединения тонкодисперсного сыпучего материала – муки и жидких компонентов в виде эмульсий или истинного водного раствора образуется упруго-эластично-пластичное капиллярно-пористое реологическое тело, обладающее пространственным клейковинным (белковым) каркасом.

Целью исследований являлось совершенствование процесса структурообразования высокобелковой дисперсной системы на примере теста пшеничного. Для решения поставленной цели решались следующие задачи: изучить особенности взаимодействия воды с мукой при их механическом соединении; установить влияние механоактивации воды на процессы структурообразования в дисперсной системе – тесте; установить влияние структурообразования в тесте на его физико-механические свойства.

До настоящего времени к совершенствованию процесса замеса подходили с позиции интенсификации механической обработки теста, что позволяет улучшать контакт поверхностей частиц муки с жидкой фазой. Отмечалось, что механическое воздействие на тесто во время замеса интенсифицирует протекание коллоидных и биохимических процессов, которыми обусловлены газообразующая способность теста и его физические свойства, определяющие газодерживающую способность. В то же время многими исследователями и практиками отмечается, что излишнее механическое воздействие на тесто значительно снижает его свойства и, в конечном итоге, качество готовой продукции.

Для интенсификации структурообразования в тесте кроме повышенного механического воздействия применяли улучшители – поверхностно-активные вещества, добавление которых к полуфабрикатам изменяет их физические свойства, смачиваемость и растворение составных частей муки. Благодаря этому белковые вещества лучше набухают и приобретают большую подвижность, позволяющую им равномерно распределяться во всей массе теста. Поэтому тесто с эмульгаторами имеет большую пластичность и растяжимость и лучше удерживает выделяемый при брожении углекислый газ. Практиковалось добавление ферментных препаратов, что в значительной степени улучшает качество хлеба из пшеничной сортовой и из ржанопшеничной муки. Улучшаются физические свойства теста, повышается его пластичность, мякиш хлеба становится более эластичным, повышается пористость, увеличивается объем хлеба, замедляется его черствение. Для замеса теста использовалась электроактивированная вода с резонансной микрокластерной структурой. Но все эти способы либо изменяют традиционный состав хлеба, либо усложняют технологию его приготовления.

Анализ процесса структурообразования в тесте показал, что наиболее важной его стадией является получение однородной смеси муки и жидких компонентов. Сыпучие среды, содержащие частицы размером менее 10^{-4} м всегда сложно взаимодействуют с жидкостями в силу их высокоразвитой удельной поверхности, которая может составлять

от десятков до тысяч $\text{м}^2/\text{м}^3$. [2]. Силы поверхностного натяжения жидкости препятствуют смачиванию, образуются трудноразрушаемые конгломераты. Процесс значительно затрудняется присутствием белков и углеводов, так как они создают влагонепроницаемые оболочки конгломератов, препятствующие дальнейшему структурообразованию. Энергетический барьер, возникающий при контакте фаз, бывает весьма высоким. По некоторым сведениям исходный объем смеси может превышать получаемый впоследствии на 20% за счет менисков, образующихся вокруг частиц. Если поверхностное натяжение преодолено, то далее возникают коллоидные процессы, сопровождающиеся диффундированием влаги в частицы. Происходят физико-химические превращения, формируются устойчивые связи молекул воды и молекул биополимеров.

И последним этапом следует формирование структуры совершенно новой дисперсной системы, по своим физико-механическим свойствам резко отличающейся от исходных компонентов, что обусловлено сначала высокоразвитой когезией, а затем сдвиговой деформацией при перемешивании среды. Формируется макроструктура дисперсной системы, как правило, в виде каркасных образований, в которых молекулы воды участвуют в поперечных связях между крупными молекулами, появляется эластичность и упругость системы.

Интенсификация процесса смесеобразования на первой стадии замеса возможна на основе механоактивации компонентов, которая достаточно давно известна как результат воздействия на материалы и вещества внешними силами. Она проявляется при образовании новой поверхности в твердых телах, при упругих и пластических деформациях частиц среды, при воздействии на поверхности сухим трением. И все эти виды механических воздействий приводят к разрыву внутренних межмолекулярных связей, либо же тех же связей, но на поверхности тел. Механоактивация воды повышает ее активность при взаимодействии с поверхностями твердых тел, то есть, улучшает смачиваемость.

При замесе выделяют: физико-механические процессы, заключающиеся в образовании однородной смеси под воздействием месильного органа; коллоидные процессы, выраженные в смачивании, растворении, диффузии воды в частицы муки; структурные изменения в дисперсной системе, протекающие в результате осмотического и адсорбционного связывания воды белками муки, вызывающее набухание белковых образований, вытягивание белковых глобул в нити, возникновение поперечных связей между ними и, в итоге, образование в тесте губчато-сетчатой структурной основы – клейковинного каркаса, который и обуславливает специфические реологические свойства пшеничного теста – его растяжимость и упругость.

Важнейшим, по мнению многих исследователей, является начальный период замеса – образование однородной смеси в дисперсной системе. По дисперсному составу мука является порошкообразным материалом: средний размер частиц: $45\div 50 \times 10^{-6}$ м, средняя удельная поверхность $250\div 350 \text{ м}^2/\text{кг}$. Мука содержит клейковинный комплекс от 20 до 30%, белки в котором могут содержаться от 6,9 % до 12,5 %, углеводы в муке присутствуют в виде крахмальных зерен, их содержание от 68 % до 76,5 %.

Силы поверхностного натяжения жидкости при контакте с порошками препятствуют смачиванию, образуются трудноразрушаемые конгломераты. Процесс значительно затрудняется, если в сыпучей дисперсной системе присутствуют

высокомолекулярные соединения – биополимеры: белки и углеводы. Последние, несмотря на их преимущественную гидрофильность, напротив, препятствуют формированию однородной структуры, так как создают влагонепроницаемые оболочки конгломератов, препятствующие дальнейшему структурообразованию. Энергетический барьер, возникающий при контакте фаз, бывает весьма высоким. По некоторым сведениям исходный объем смеси может превышать получаемый впоследствии на 20% за счет менисков, образующихся вокруг частиц. Когда поверхностное натяжение преодолено, начинаются коллоидные процессы, сопровождающиеся диффундированием влаги в частицы муки.

Один из основных законов термодинамики – выражение Гельмгольца для свободной энергии системы с постоянным числом частиц легко объясняет суть проблемы:

$$\Delta F = \sigma \Delta S = \Delta U - T \Delta S, \text{ Дж} \quad (1)$$

где ΔF – свободная энергия, Дж; σ – удельная поверхностная энергия вещества, Дж/м²; ΔS – приращение поверхности взаимодействия фаз, м²; ΔU – изменение полной энергии системы, Дж; T – абсолютная температура, К; S – энтропия системы, Дж/К.

В начале процесса взаимодействия фаз поверхность контакта очень большая. Энтропия системы при этом максимальна. Но в системе еще присутствуют прослойки свободной жидкости, позволяющие движение частиц относительно друг друга [2]. По мере преодоления сил поверхностного натяжения внешней механической энергией энтропия системы снижается, когезионное взаимодействие частиц преобразуется во внутреннюю энергию, обуславливающую упругость среды:

$$U_0 = \tau^2 / (2G) \quad (2)$$

где τ – напряжения сдвига, зависящие от скорости деформации и мгновенного состояния среды, Па; G – модуль упругости при сдвиге, изменяющийся во времени.

Получение однородной смеси муки и жидких компонентов необходимо осуществлять на первой стадии взаимодействия фаз в системе, когда сопротивляемость смеси минимальна и обусловлена вязкостью сдвигового течения жидкости в прослойках между частицами. Для этого необходимо максимально ускорить процесс преодоления сил поверхностного натяжения жидкости. Такое возможно посредством механоактивации воды.

Механоактивация оказывает комплексное воздействие на воду: тепловое, магниточастотное, электромагнитное и инициирует химические реакции. [3-11] Процесс структурной перестройки воды основан на повышении ее внутренней энергии. Внешняя механическая энергия поглощается молекулами воды, повышается их кинетическая энергия, происходит разрыв молекулярных цепей. Возникает «квантовый хаос» – неупорядоченное состояние среды, связанное с ослаблением и разрывом межмолекулярного взаимодействия. В таком энергетическом состоянии вода является поверхностно активной и хорошо вступает в адгезионный контакт с поверхностями твердых тел и порошков.

Авторами исследовался процесс замеса теста в периодическом режиме. В качестве экспериментальной установки использовали бытовой тестомес с емкостью дежи 3 литра и регулируемой частотой вращения месильного органа. При замесе использовали спиральный рабочий орган. Электродвигатель машины был подключен к ваттметру, показания которого фиксировались видеозаписью. Затем составлялась таблица показаний

мощности с временным интервалом в 10 секунд. Данные обрабатывались в среде EXCEL и представлены в виде графиков.

В процессе эксперимента проводили два замеса, контрольный и опытный (с механоактивацией воды). Результаты эксперимента представлены на рисунке 1.

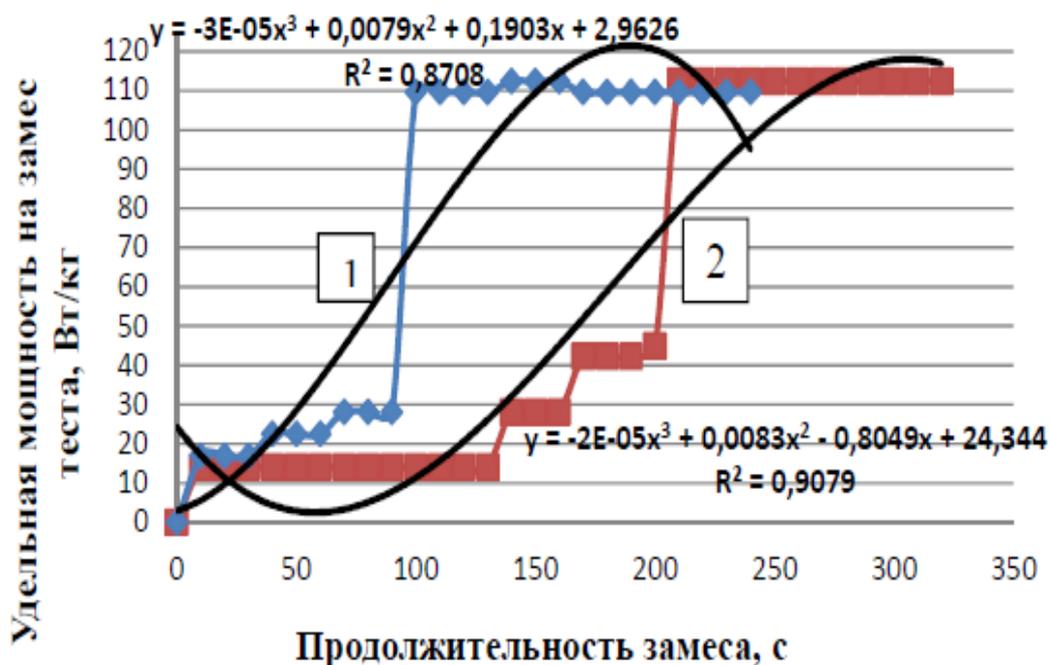


Рис. 1. Зависимость удельной мощности от времени замеса теста пшеничного хлебопекарного: 1 – контрольный замес; 2 – замес с механоактивированной водой

Эксперименты показали, что заметно увеличивается период проявления эластичности теста, если используется предварительно активированная вода.

Таким образом, сопротивление перемешиванию снижено, качество смеси улучшается.

Есть существенные отличия в процессе формирования структуры теста при замесе. При тех же параметрах работы мешалки удельная мощность на замес теста с механоактивированной водой на 30-40 % ниже. На графике четко прослеживается, что первый период замеса теста (механическое смешивание сухих и жидких компонентов) протекает почти с двухкратным снижением удельной мощности. Этот результат можно считать весьма удовлетворительным.

Изучались реологические особенности теста. Результаты определения предельного напряжения сдвига представлены на рисунке 2.

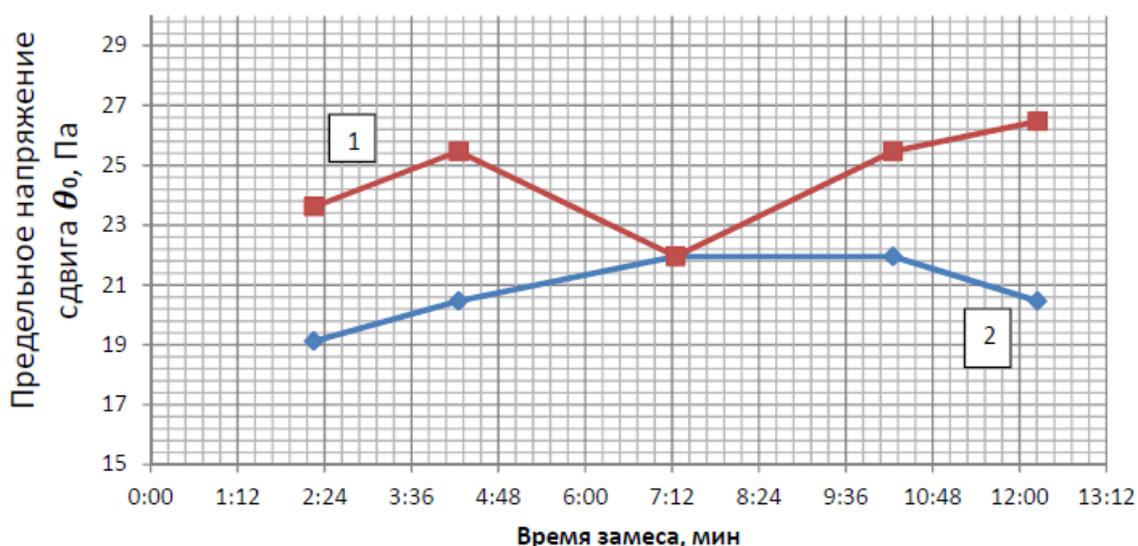


Рис. 2. Пределное напряжение сдвига для теста контрольного (1) и опытного (2) образцов в зависимости от времени процесса замешивания

Заметно снижается пределное напряжение сдвига для теста, полученного с механоактивированной водой. То есть, оно обладает большей эластичностью, дальнейшие процессы разделки и формования будут протекать с меньшими энергетическими затратами и при сохранении структуры теста.

Для установления влияния механоактивации на энергию связи влаги с материалом изучали процесс сушки на анализаторе влажности МХ-50 производства Японии. Прибор сертифицирован в Российской Федерации для исследования влажности сред.

Кривые потери влаги при сушке пшеничного теста с активированной и неактивированной водой представлены на рисунке 3. По результатам исследований построили кривые кинетики сушки в виде зависимостей $dW/dt = f(dW)$ (рисунок 4). Из графиков видно, что при сушке теста, при замесе которого применили механоактивированную воду, заметно медленнее происходило обезвоживание и при тех же параметрах сушки удаляется меньшее количество воды из образца.

Для полноты анализа изменений структурно-механических свойств теста при использовании механоактивированной воды исследовались реологические свойства теста на приборе «Реотест», определялась вязкость теста. [13]

Результаты представлены на рисунке 5.

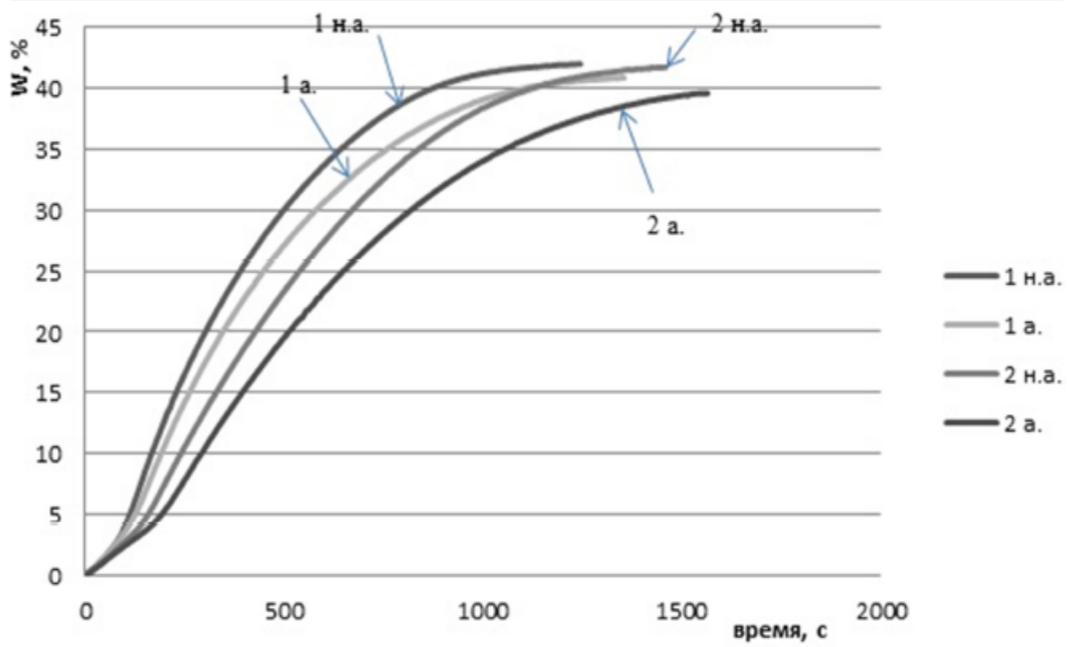


Рис. 3. Кривые потери влаги при сушке пшеничного теста с активированной (1а, 2а) и неактивированной водой (1 н.а., 2 н.а.)

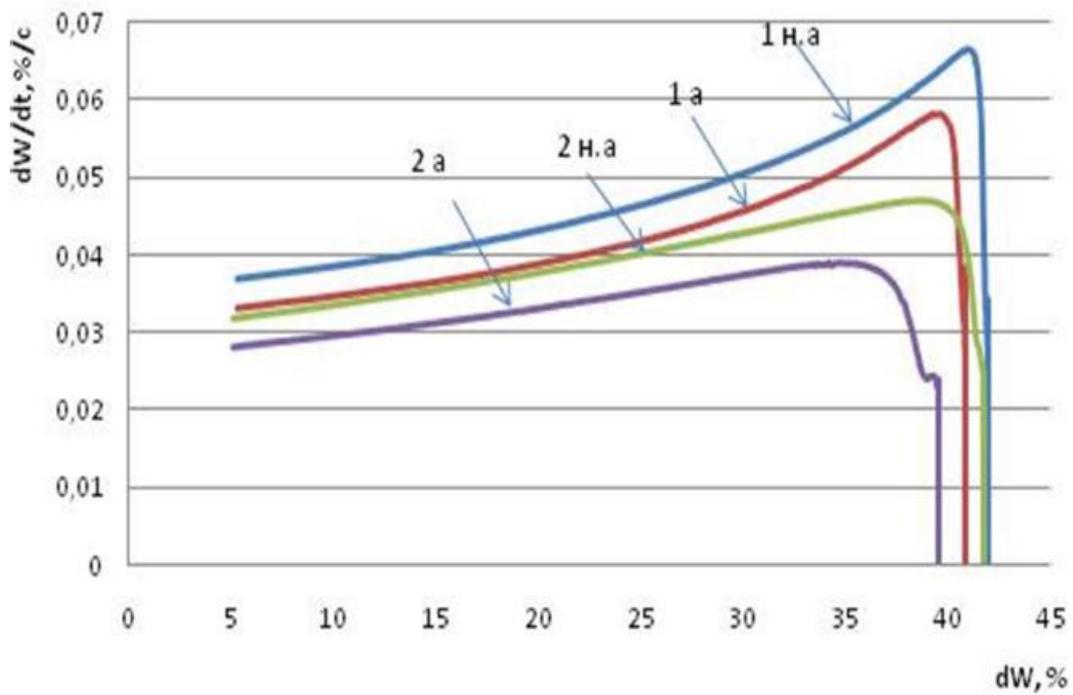


Рис. 4. Кривые кинетики сушки пшеничного теста с активированной (1а, 2а) и неактивированной водой (1 н.а., 2 н.а.)

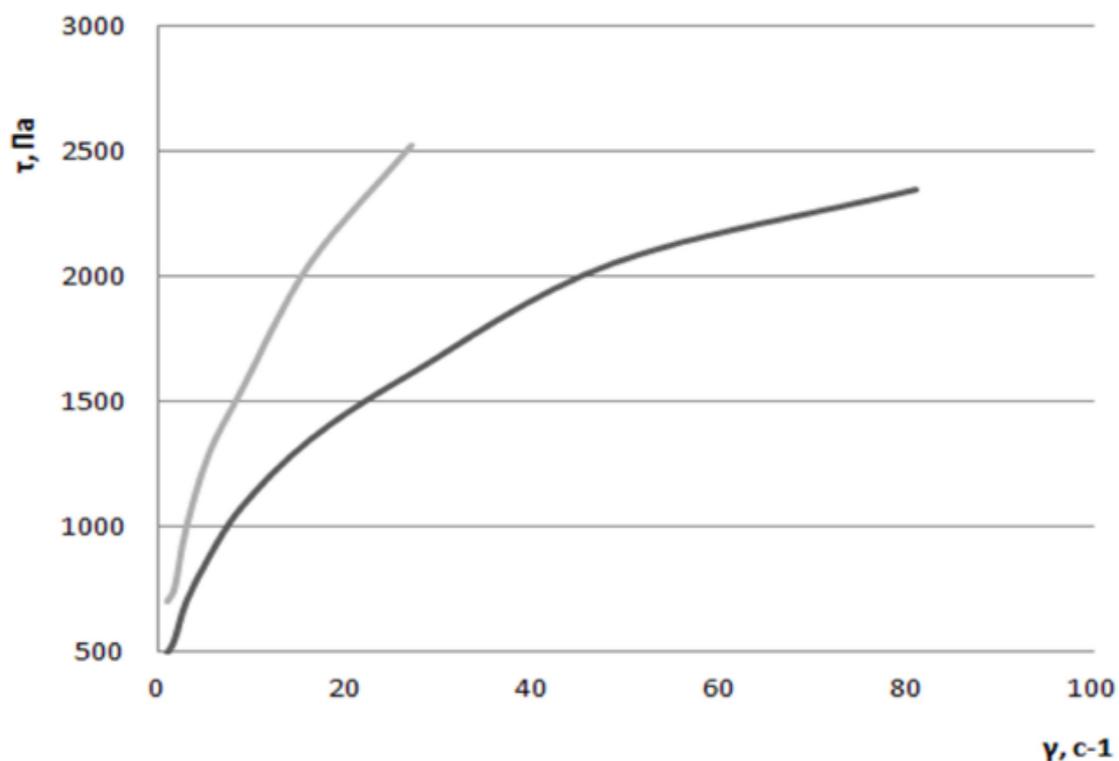


Рис. 5. Зависимости напряжений сдвига от скорости сдвига для теста без механоактивации воды (1) и с предварительной механоактивацией воды (2)

Графики опять говорят об очевидном различии свойств контрольного и экспериментального образцов. Тесто, полученное при замесе с механоактивированной водой, обладает значительной вязкостью, на 50-70 % превышающей вязкость контрольного образца. Причем его эластичность выше, что позволит улучшить процессы замеса, без изменения его компонентного состава, повышения содержания клейковины или простых углеводов.

Исследования структурно-механических свойств теста на структурометре СТ-1 по стандартной методике представлены на рисунке 6. Результаты подтверждают изменение качества теста при замесе с использованием механоактивированной воды. Пластичность теста увеличилась на 10-12 %, упругость снизилась почти вдвое.

Качественные показатели хлеба пшеничного контрольного и с использованием механоактивированной воды изучались определением их пористости (рисунок 7). Хлеб выпекали в форме №12 по ГОСТ 17327-95 «Формы хлебопекарные. Технические условия». Исследование хлеба проводили по ГОСТ 27669-88 «Мука пшеничная хлебопекарная. Метод пробной лабораторной выпечки хлеба» (с Изменениями №1, 2). Объем хлеба определялся по методике [12].

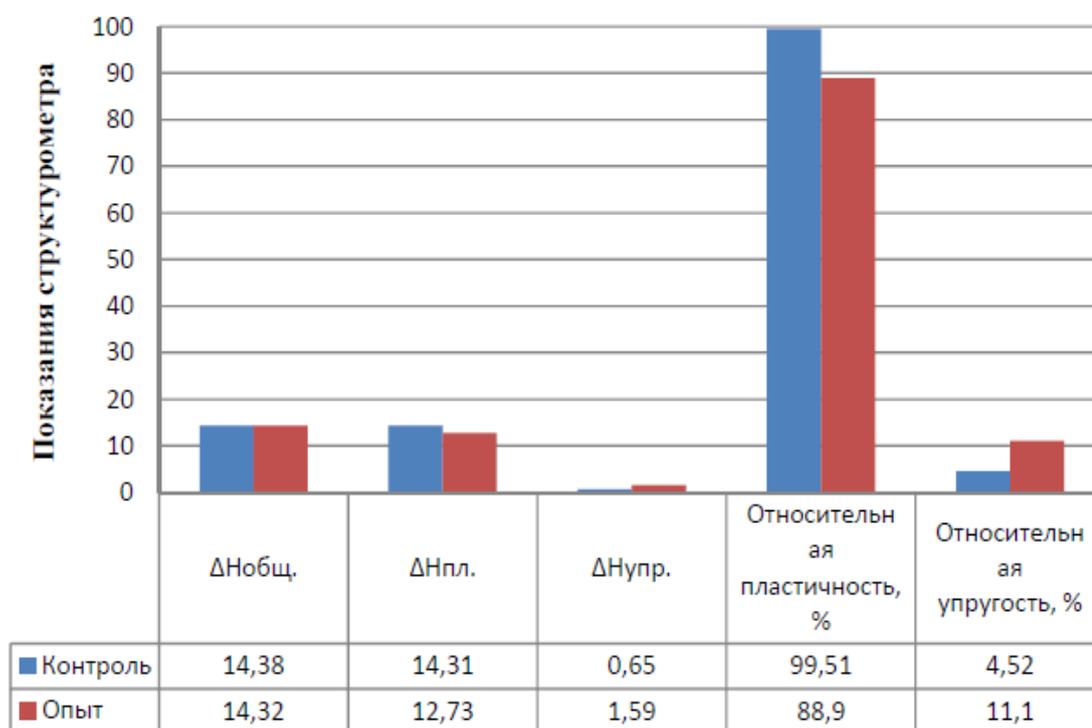


Рис. 6. Структурно-механические свойства теста, полученные на приборе Структурометр СТ-1

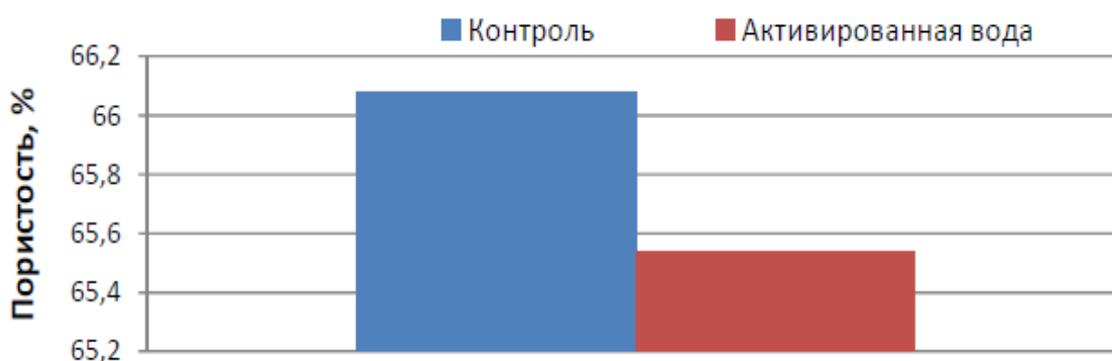


Рис. 7. Пористость контрольного и экспериментального образцов хлеба

В контрольном образце поры неравномерные, вытянутые, надрывистые. В основном преобладают поры большого диаметра до 5-6 мм. Наблюдается значительное уплотнение пор возле нижней корки формового хлеба. Пористость экспериментального образца ниже. Преобладают поры со средним диаметром 2-3 мм, крупные поры отсутствуют, нет подрывов.

Определяли сжимаемость (восстановление формы) образцов по стандартной методике. Получено, что для контрольного образца среднее время восстановления формы 2,94 с., для опытного – 2,14 с.

ВЫВОДЫ

- механоактивация воды непосредственно перед замесом теста позволяет не менее чем на 30-40 % снизить энергозатраты на замес;
- повышается эластичность теста, что улучшает работу оборудования для разделки и формования теста,

– улучшаются реологические и потребительские свойства хлеба, что в итоге влияет на его конкурентоспособность.

Литература:

1. Prosekov A.Yu., Ivanova S.A. Providing food security in the existing tendencies of population growth and political and economic instability in the world // Foods and raw materials. 2016. Т. 4, №2. Р. 201-211.
2. Попов А.М. Физико-химические основы технологий полидисперсных гранулированных продуктов питания. Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2002. 324 с.
3. Маленков Г.Г. Структура и динамика жидкой воды // Журнал структурной химии. 2006. Т. 47. С. 5-35.
4. Зенин С.В. Исследование структуры воды методом протонного магнитного резонанса // Доклады Российской академии наук. 1993. Т. 332, №3. С. 328.
5. Структуры сеток водородных связей и динамика молекул воды в конденсированных водных системах / В.П. Волошин [и др.] // Российский химический журнал. 2001. Т. 45, №3. С. 31-37.
6. Результаты численного моделирования импульсов Тричела в отрицательной короне в воздухе / Акишев Ю.С. [и др.] // Физика плазмы. 2002. Т. 28, №12. С. 1136-1146.
7. Аристова Н.А., Пискарев И.М. Очистка воды от ионов меди при озонировании методом осаждения // Вода: химия и экология. 2008. №5. С. 34-37.
8. Исследование свойств цементных композитов на активированной воде затворения / В.Т. Ерофеев [и др.] // Фундаментальные исследования. 2015. №2-6. С. 1175-1181.
9. О природе электрохимической активации сред / П.А. Кирпичников [и др.] // Доклады Академии наук СССР. 1986. Т. 286, №3. С. 663-666.
10. Петрушанко И.Ю., Лобышев В.И. Неравновесное состояние электрохимически активированной воды и её биологическая активность // Биофизика. 2001. Т. 46, вып. 3. С. 389-401.
11. Петрушанко И.Ю., Лобышев В.И. Физико-химические свойства водных растворов, полученных в мембранном электролизере // Биофизика. 2004. Т. 49, вып. 1. С. 22-31.
12. ГОСТ 27669-88 Мука пшеничная хлебопекарная. Метод пробной лабораторной выпечки хлеба (с Изменениями №1, 2). Введ. 1989-07-01. Москва: Стандартинформ, 2007.
13. Pirogov A.N. Rheometric monitoring of the formation of milk-protein blobs // Foods and raw materials. 2014. Т. 2, №1. Р. 72-81.

Literature:

1. Prosekov A.Yu., Ivanova S.A. Providing food security in the existing tendencies of population growth and political and economic instability in the world // Foods and raw materials. 2016. V. 4, №2. P. 201-211.
2. Popov A.M. Physical and chemical basis of polydisperse granular food technologies. Novosibirsk: Sib. Univ. publishing house, 2002. 324 p.
3. Malenkov G.G. Structure and dynamics of liquid water // Journal of structural chemistry. 2006. V. 47. p. 5-35.
4. Zenin S.V. Study of the structure of water by the method of proton magnetic resonance

// Reports of the Russian Academy of Sciences. 1993. V. 332, No. 3. P. 328.

5. Structures of networks of hydrogen bonds and the dynamics of water molecules in condensed water systems / V.P. Voloshin [et al.] // Russian Chemical Journal. 2001. V. 45, No. 3. P. 31-37.

6. Results of numerical simulation of Trichel pulses in the negative air corona / Yu.S. Akishev. [et al.] // Plasma Physics. 2002. V. 28, No. 12. P. 1136-1146.

7. Aristova N.A., Piskarev I.M. Water purification of copper ions during ozonation by sedimentation method // Water: Chemistry and Ecology. 2008. No. 5. P. 34-37.

8. Study of the properties of cement composites on activated mixing water / V.T. Erofeev [et al.] // Fundamental research. 2015. № 2-6. P. 1175-1181.

9. On the nature of electrochemical activation of media / P.A. Kirpichnikov [et al.] // Reports of the USSR Academy of Sciences. 1986. V. 286, No. 3. P. 663-666.

10. Petrushanko I.Yu., Lobyshev V.I. Nonequilibrium state of electrochemically activated water and its biological activity // Biophysics. 2001. V. 46, No. 3. P. 389-401.

11. Petrushanko I.Yu., Lobyshev V.I. Physical and chemical properties of aqueous solutions obtained in a membrane electrolyzer // Biophysics. 2004. V. 49, No. 1. P. 22-31.

12. GOST 27669-88 Baking wheat flour. Method of trial laboratory baking of bread (with Changes No. 1, 2). Introd. 1989-07-01. Moscow: Standardinform, 2007.

13. Pirogov A.N. Rheometric monitoring of milk-protein blobs // Foods and raw materials. 2014. V. 2, No. 1. P. 72-81.