

Механоактивация водных растворов как способ улучшения перемешивания и структурообразования в дисперсных системах

Виктор В. Иванов	1	v-ivanow2013@ya.ru	 0000-0002-4711-9821
Сергей Д. Руднев	2	sdrudnev@yandex.ru	 0000-0003-2506-6121
Дмитрий М. Бородулин	3	borodulin_dmitri@list.ru	 0000-0003-3035-0354
Александра И. Крикун	4	krikun.ai@dgtru.ru	 0000-0002-9330-2555

1 ОАО "КемеровоХлеб", пр-т Кузнецкий, 105, г. Кемерово, 650055, Россия

2 Кемеровский государственный медицинский университет, ул. Ворошилова, д. 22А, г. Кемерово, Кемеровская область, 650056, Россия

3 Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева, Орликов переулок, д. 1/11, г.Москва, 107139, Россия

4 Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, ул. Луговая, 52 Б, г. Владивосток, 690087, Россия

Аннотация. Процесс приготовления теста – один из самых сложных в технологии производства хлеба. Перемешивание муки с жидкими компонентами (водой, водными растворами) представляет собой сложный процесс поверхностного взаимодействия, связанный с преодолением поверхностной энергии на границе взаимодействия фаз. Интенсивность образования однородной смеси муки и жидких компонентов, в последующем превращаемая в тесто, определяет его структурно-механические свойства. Цель работы – теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение влияния предварительной механической обработки жидких компонентов на процесс перемешивания теста и структурообразования воднодисперсной системы. Проведен теоретический анализ процесса адгезионного взаимодействия сыпучего материала с жидкостью. Показано, что поверхностную энергию на границе взаимодействия с фаз необходимо снижать. Экспериментально установлено, что механическое воздействие на воду и водные растворы снижает поверхностное натяжение на 20–30 %. Установлено, что при перемешивании муки и жидких компонентов теста предварительная механическая обработка дает эффект улучшения смачивания, повышения эластичности и сокращения времени структурообразования в тесте. Удельная мощность при замесе снижается на 15–20 %. При помощи средств реометрии («Rheotest», Структурометр СТ-2, конический пластометр Ребиндера) показано улучшение структурно-механических свойств теста: повышение предельного напряжения сдвига на 20–25 %, снижение адгезии на 30–40 %, возрастание упругих свойств после замеса до 10 %, повышение водосвязывающей способности. Исследования проводились на лабораторном оборудовании и в производственных условиях на предприятиях ОАО «КемеровоХлеб».

Ключевые слова: перемешивание, однородная смесь, структурообразование, механоактивация, водные растворы, поверхностная энергия, адгезия, вязкость, предельное напряжение сдвига, поверхностное натяжение.

Mechanical activation of aqueous solutions as a way to improve mixing and structure formation in dispersed systems

Victor V. Ivanov	1	v-ivanow2013@ya.ru	 0000-0002-4711-9821
Sergey D. Rudnev	2	sdrudnev@yandex.ru	 0000-0003-2506-6121
Dmitry M. Borodulin	3	borodulin_dmitri@list.ru	 0000-0003-3035-0354
Alexandra I. Krikun	4	krikun.ai@dgtru.ru	 0000-0002-9330-2555

1 ОАО KemerovokhleB, 105 Kuznetskiy Ave., Kemerovo, 650055, Russia

2 Kemerovo State Medical University, st. Voroshilova, 22A, Kemerovo, Kemerovo region, 650056, Russia

3 Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Orlikov Lane, 1/11, Moscow, 107139, Russia

4 Far Eastern State Technical Fisheries University, st. Lugovaya, 52 B, Vladivostok, 690087, Russia

Abstract. The process of dough preparation is one of the most complex in bread production technology. Stirring of flour with liquid components (water, aqueous solutions) is a complex process of surface interaction associated with overcoming the surface energy at the interface between phases. The intensity of formation of a homogeneous mixture of flour and liquid components, subsequently transformed into dough, determines its structural and mechanical properties. The aim of the work is theoretical substantiation and experimental confirmation of the influence of preliminary mechanical treatment of liquid components on the process of dough mixing and structure formation of water disperse system. Theoretical analysis of the process of adhesive interaction of bulk material with liquid has been carried out. It is shown that the surface energy at the boundary of interaction with phases should be reduced. It is experimentally established that mechanical action on water and aqueous solutions reduces surface tension by 20-30 %. It is established that at mixing of flour and liquid components of dough the preliminary mechanical treatment gives the effect of improvement of wetting, increase of elasticity and reduction of time of structure formation in dough. The specific power during kneading is reduced by 15-20 %. With the help of rheometry means («Rheotest», Struclurometer ST 2, conical Rebindet platurometer) improvement of structural and mechanical properties of the dough is shown: increase of ultimate shear stress by 20-25 %, decrease of adhesion by 30-40 %, increase of elastic properties after kneading up to 10 %, increase of water-binding capacity. The studies were carried out on laboratory equipment and in production conditions at the enterprises of JSC "KemerovokhleB".

Keywords: mixing, homogeneous mixture, structure formation, mechanoactivation, aqueous solutions, surface energy, adhesion, viscosity, ultimate shear stress, surface tension.

Введение

Хлеб в России – это не просто продукт питания, хлеб стал частью идентичности россиян, определяющей качество жизни. Традиции производства хлеба обоснованы требованиями к постоянству качества готовых изделий, стабильности его потребительских свойств, обусловленных пищевыми предпочтениями человека и национальными особенностями потребления.

Для цитирования

Иванов В.В., Руднев С.Д., Бородулин Д.М., Крикун А.И. Механоактивация водных растворов как способ улучшения перемешивания и структурообразования в дисперсных системах // Вестник ВГУИТ. 2023. Т. 85. № 3. С. 74–83. doi:10.20914/2310-1202-2023-3-74-83

В настоящее время всё большее значение приобретает идея «бережливого производства», сформулированная еще Генри Фордом и развитая сотрудником компании Toyota Тайити Оно (работал в компании с 1943 года). Важнейшая характерная черта «бережливого производства» – снижение стоимости производства при сохранении стоимости и качества продукта для потребителя.

For citation

Ivanov V.V., Rudnev S.D., Borodulin D.M., Krikun A.I. Mechanical activation of aqueous solutions as a way to improve mixing and structure formation in dispersed systems. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2023. vol. 85. no. 3. pp. 74–83. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2023-3-74-83

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Процесс приготовления теста – один из самых сложных в технологии производства хлеба. Перемешивание муки, удельная поверхность которой составляет 280–350 м²/кг, с жидкими компонентами (водой, водными растворами), когда количество вносимой влаги составляет менее 700 мл на 1 кг муки, представляет собой сложный процесс поверхностного взаимодействия, связанный с преодолением поверхностной энергии на границе взаимодействия фаз. Интенсивность образования однородной смеси муки и жидких компонентов, в последующем превращаемая в тесто, определяет его структурно-механические свойства. Исследователями (И.В. Матвеева, Л.Ю. Лаврова, Н.В. Сокол, Е.Ю. Егорова, Е.И. Пономарева и другие) [1–6] изучалось влияние добавок на структурно-механические свойства теста и качество хлеба. Применяли поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые влияли на процесс перемешивания и образования однородной смеси. Тесто с добавками отличается улучшенными деформационными характеристиками (эластичность, газодерживающая способность и пр.), но экономически не выгодно и могут использоваться преимущественно для специальных видов продукции. В качестве улучшителей теста применяли ферменты, которые воздействовали на белково-углеводный комплекс теста, что повышало не только пищевые, но и структурно-механические показатели. Современным направлением можно считать электроактивирование водных растворов.

Однако вышеперечисленные методы либо изменяют состав продукта, либо изменяют его традиционное качество. Влияние предварительных механических воздействий на компоненты теста и, в первую очередь, на водные растворы, перед их механическим соединением с мукой, изучено, на наш взгляд, недостаточно.

В научно-технической литературе широко освещены особенности процесса механохимической активации твердофазных дисперсных систем [7–10]. Активация выражается в значительном повышении кинетики массообменных процессов на границе взаимодействия фаз, особенно в системах Т-Ж. Происходит ускорение процессов адсорбции, растворения, экстракции и прочих. Сущность механоактивации твердых тел заключается в разрыве некоторого количества межмолекулярных связей как внутри материала, так и на его поверхности при образовании новой поверхности при разрушении (или образовании трещин), сдвиге в объеме материала, деформаций поверхности (как упругих, так и пластических), трении о поверхность тел и прочее. Для материалов, относящихся к неньютоновским жидкостям

и проявляющим тиксотропию (обратимую и необратимую) при сдвиге в их слоях также можно применить термин «механохимическая активация», поскольку ускоряются массообменные процессы в таких средах [11–13]. Известно также, что время, когда материал механоактивирован, ограничено и зависит от многих факторов.

В последнее время исследователи обратили внимание на характерные изменения структуры воды и водных растворов под воздействием механических воздействий – перемешивания [14–17]. Изучались изменения в структуре дистиллированной воды, [18, 19] суспензий с цементным вяжущим, [20] эмульсии технологических жидкостей и буровых растворов [21, 22] и пр. Процесс взаимодействия механоактивированной воды и сыпучего материала, а также влияние предварительной механической подготовки воды и ее растворов, на наш взгляд, изучены недостаточно.

Цель работы – теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение влияния предварительной механической обработки жидких компонентов на процесс перемешивания теста и структурообразование воднодисперсной системы.

Методы

В аналитической части проведены теоретические исследования процесса поверхностных контактов «жидкость–твердое (сыпучее) тело» с применением основных уравнений термодинамики. Процесс поверхностного взаимодействия описывает равенство Юнга:

$$\sigma_T = \sigma_{ТЖ} + \sigma_{Ж} \cos \varphi, \text{ Дж} \quad (1)$$

где σ_T – поверхностная энергия твердого тела, Дж; $\sigma_{Ж}$ – поверхностная энергия жидкости, Дж; $\sigma_{ТЖ}$ – поверхностная энергия на межфазной границе Т-Ж, Дж; $\cos \varphi$ – косинус видимого угла смачивания. Работу поверхностного взаимодействия (адгезия) на границе Т-Ж показывает уравнение Дюпре:

$$W_A = \sigma_T + \sigma_{Ж} - \sigma_{ТЖ}, \text{ Дж} \quad (2)$$

где W_A – работа адгезии в обратимом процессе, Дж.

Соотношение (1) и (2) дает зависимость для работы адгезии:

$$W_A = \sigma_{Ж} (1 + \cos \varphi), \text{ Дж} \quad (3)$$

Удельная обратимая работа когезии W_K :

$$W_K = 2\sigma_{Ж}, \text{ Дж} \quad (4)$$

Отношение работ адгезии и когезии

$$W_A/W_K = (\cos \varphi + 1)/2, \quad (5)$$

откуда следует, что стремление φ к нулю обеспечит максимальное смачивание, а значения энергий W_A и W_K должны стремиться друг к другу.

Разница между W_A и W_K дает коэффициент растекания S :

$$S = W_A - W_K = \sigma_{ж} (\cos \varphi + 1) 2\sigma_{ЖГ}, \text{ Дж} \quad (6)$$

Энергия взаимодействия на границе «твердое тело – жидкость» иллюстрируется рисунком 1.

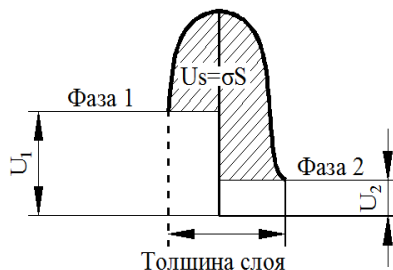


Рисунок 1. Сгущение энергии на границе взаимодействия «твердое тело – жидкость»

Figure 1. Energy densification at the boundary of solid-liquid interaction

Из вышеизложенного следует, что поверхностную энергию взаимодействия $\sigma_{ТЖ}$ необходимо снижать каким-либо способом и при этом:

$$\sigma_T > \sigma_{ж}, \text{ Дж} \quad (7)$$

Если же силы отталкивания на поверхности взаимодействия «субстрат–адгезив» высоки, то простейшим способом может быть повышение механической энергии перемешивания компонентов для преодоления этих сил. Но есть другой подход – снижение поверхностной энергии жидкости механоактивацией. Исследователями показано, что любое внешнее воздействие на жидкость приводит к изменению ее свойств. Сдвиг в слоях жидкости приводит к разрушению внутренних связей, накоплению внутренней энергии. Такой процесс можно идентифицировать как механоактивацию, поскольку происходит изменение как внутренней энергии в дисперсной системе, так и поверхностного натяжения на границе Ж-Г. Таким образом, энергия активации жидкости – это энергия, затраченная на сдвиговые деформации в ней.

Основываясь на этом предположении, можно записать:

$$E_a = E - E_o, \text{ Дж} \quad (8)$$

где E_a – энергия механоактивации жидкости, Дж; E_o – внутренняя энергия до механоактивации, Дж; E – внутренняя энергия механоактивированной жидкости, Дж.

Рассмотрим сдвиговое течение жидкости с постоянной (ньютоновской) вязкостью. Линейный закон вязкого течения Ньютона можно записать в виде

$$dF = \eta \frac{dv}{dx} dS, \quad (9)$$

где dF – сила внутреннего трения на элементарной площадке, Н; η – коэффициент динамической вязкости, Па·с; dv/dx – градиент скорости движения слоев в направлении, перпендикулярном к поверхности слоев (скорость сдвига); dS – площадь элементарной площадки, м².

Представим через кинематическую вязкость силу внутреннего трения в жидкости:

$$dF = \frac{\eta}{\rho} \cdot \frac{d(v)}{dx} dS = \nu \frac{d(v)}{dx} dS, \text{ Н} \quad (10)$$

где ρ – плотность вещества, кг/м³; ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

В термодинамическом аспекте коэффициент вязкости есть мера диссипации механической энергии или мера рассеяния в тепло механической энергии движущейся жидкости. Эту энергию можно трактовать как работу механоактивации жидкости, представим её выражением:

$$A_{ma} = \frac{dFR_{np}}{\omega} = \frac{\eta}{\rho} \frac{d(v)}{\omega dx} dS = \nu \frac{d(v)}{\omega dx} dS, \text{ Дж} \quad (11)$$

где ω – угловая скорость вращения механоактиватора, с⁻¹.

Определение удельной обратимой работы когезии W_K (выражение 4) и (11) дают в совокупности математическую модель работы механоактивации воды.

Работа dA по изменению поверхности когезионного взаимодействия в жидкости на dS совершается за счет изменения потенциальной энергии dW_{ps} :

$$dA = dW_{ps} = \sigma_{жс} dS, \quad (12)$$

Таким образом, работа, затрачиваемая на перемешивание, тождественна работе механоактивации и по своей природе является работой преодоления сил когезии в материале (выражение 4).

В экспериментальной части работы использовались следующие материалы: мука пшеничная первого сорта с показателями по ГОСТ 26574–2017; вода питьевая по СанПиН 2.1.4.107–01.

Для экспериментальных исследований применялись: структурометр СТ-2, анализатор влажности МХ-50, прибор измерения вязкости «Реотест», конический пластометр Ребиндера, метод капиллярного поднятия для определения поверхностного натяжения жидкости с использованием капилляра диаметром 0,6 мм. Перемешивание водных растворов и теста проводили в экспериментальной установке, включающей миксер бытовой Gemlux с процессной емкостью

3 литра и дискретным переключением скоростей вращения мешалки. В качестве мешалки для водных растворов использовали венчиковую насадку, применяемую для взбивания. При перемешивании теста применяли якорную мешалку с планетарным движением. Мощность перемешивания регистрировалась ваттметром и показания которого фиксировались видеосъемкой и оформлялись в таблицах.

Результаты и обсуждение

Проведена серия экспериментов по изучению влияния перемешивания на поверхностную энергию воды и водных растворов. Получали зависимости параметров от времени перемешивания воды и при разной частоте перемешивания (100 и 180 оборотов в минуту).

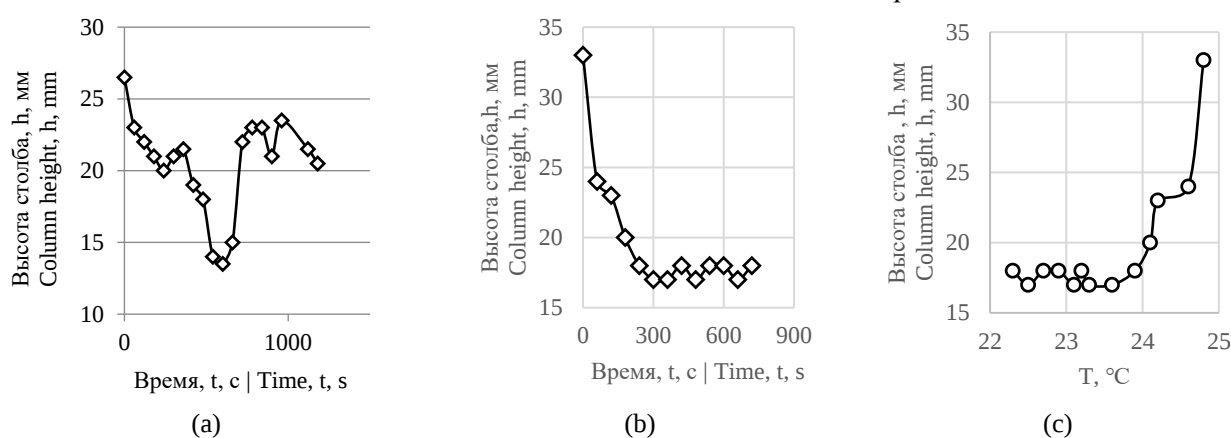


Рисунок 2. Зависимости высоты (h) столба воды в капилляре 0,6 мм от времени перемешивания: (а) – перемешивание дистиллированной воды при частоте 100 мин⁻¹; (б) – перемешивание питьевой бутилированной воды при частоте 100 мин⁻¹; (с) – зависимость высоты подъема воды в капилляре от ее температуры при перемешивании, мм

Figure 2. Dependences of height (h) of water column in 0.6 mm capillary on stirring time: (a) - stirring of distilled water at frequency 100 min⁻¹; (b) - stirring of drinking bottled water at frequency 100 min⁻¹; (c) - dependence of height of water rise in capillary on its temperature during stirring, mm

На графике (рисунок 2 в) показана зависимость высоты столба в капилляре от температуры воды, изменяющейся при перемешивании. Как видно, для механоактивированной воды понижение температуры не дает эффект повышения поверхностного натяжения. Как долго сохраняется пониженная поверхностная энергия воды после механической активации показывает график на рисунке 3. Для дистиллированной воды достаточно одной минуты для восстановления свойств, характерных состоянию покоя.

Сделан вывод, что использовать механоактивированную воду для технологических процессов нужно в течение ближайших 60 с. Время, достаточное для механоактивации – до 120 с.

Исследовались поверхностные свойства растворов воды, применяемых при замесе теста в производстве. Для составления растворов использовались соотношения, соответствующие хлебопекарному тесту для производства хлеба «Кемеровский».

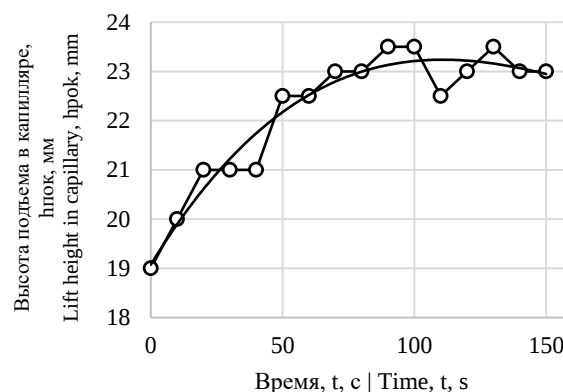


Рисунок 3. Зависимость высоты столба воды дистиллированной в капилляре 0,6 мм от времени после механоактивации в состоянии покоя

Figure 3. Dependence of distilled water column height in a 0.6 mm capillary on time after mechanoactivation in the resting state

На рисунке 4а представлены результаты измерений высоты подъема раствора NaCl в капилляре диаметром 0,6 мм. Поверхностное натяжение для раствора соли падает значительно быстрее по сравнению с водой дистиллированной. Минимум достигается через 120–180 с перемешивания. А через 120 с поверхностная энергия снижается уже на 30%.

Исследовали поверхностные свойства 1%-го раствора муки при перемешивании. Результаты измерений показаны на рисунке 4б. Высота столба раствора в капилляре в начале процесса резко падает, снижаясь в первые 60 с

на 40%, затем немного увеличивается, но сохраняет пониженное значение. Повышение концентрации муки в воде не дало эффекта снижения поверхностного натяжения. Но при увеличении времени перемешивания поверхностная энергия росла в большей мере, чем для 1%-го раствора.

В практике при замесе теста применяют подготовленные солевые растворы. В связи с этим были проведены эксперименты по измерению поверхностной энергии при перемешивании 3,3%-го раствора NaCl с 1% муки. Результаты представлены на рисунке 4в.

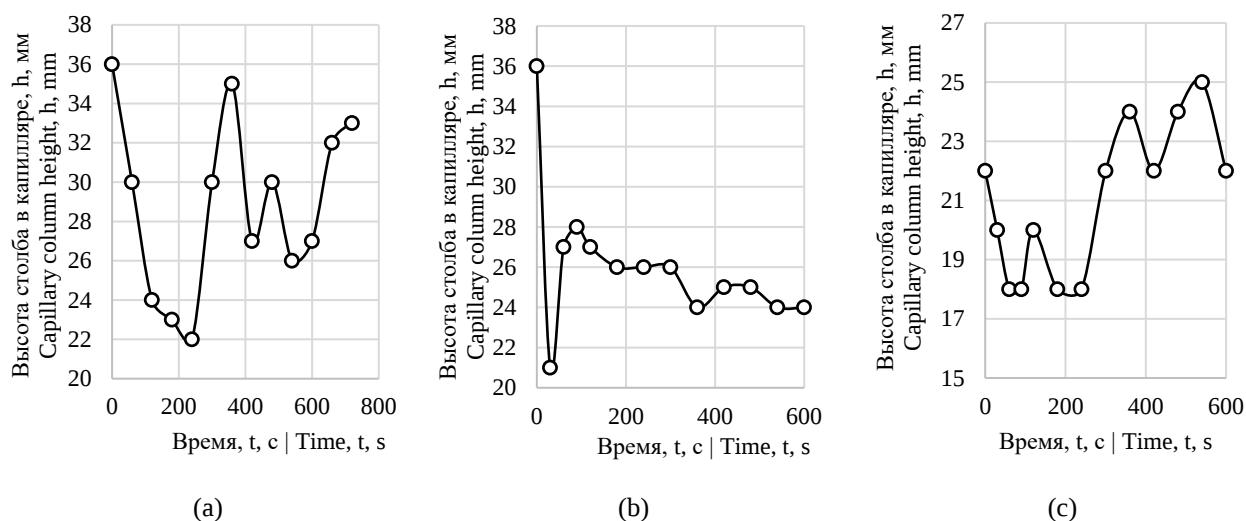


Рисунок 4. Зависимости высоты подъема водных растворов в капилляре диаметром 0,6 мм от времени перемешивания: (а) – раствор 3,3% NaCl; (б) – водно-мучная суспензия с концентрацией муки 1%; (с) – водный соляно-мучной раствор в указанной концентрации

Figure 4. Dependences of the height of rise of aqueous solutions in a capillary with a diameter of 0.6 mm on the mixing time: (a) - solution of 3.3% NaCl; (b) - water-flour suspension with flour concentration of 1%; (c) - aqueous salt-flour solution in the specified concentration

Минимальное значение высоты столба раствора в капилляре соответствовало времени перемешивания 60–100 с. Снижение поверхностной энергии раствора составило около 20%.

В лабораторных исследованиях мука и вода перемешивались в соотношении, принятом для хлебопекарного теста, соответствующего технологии хлеба формового «Кемеровский» из пшеничной муки первого сорта, производимого безопасным способом. При замесе использовались мука пшеничная первого сорта и вода водопроводная. Выбрана постоянная скорость вращения мешалки 100 об/мин. Механоактивация воды производилась в емкости для замеса при числе оборотов мешалки 100 об/мин в течение 100 с. Графики зависимостей представлены на рисунке 5.

Для смеси с механоактивированной водой мощность в начальном этапе не падает, активно проявляется поверхностное взаимодействие воды с частицами муки и с 30 с по 50 с происходит стабилизация. Мощность не растет, наблюдается повышенная эластичность смеси. Дальнейшее перемешивание не приводит к снижению мощности, что свидетельствует о сформированности каркасной клейковинной структуры теста и его повышенной эластичности. Очевидно, что замес теста с механоактивированной водой надо заканчивать через 50–60 с. Перемешивали муку с предварительно подготовленной водно-дисперсной 1%-й смесью муки и воды. В начальной стадии замеса мощность возрастает незначительно, кривая на графике выходит на плато.

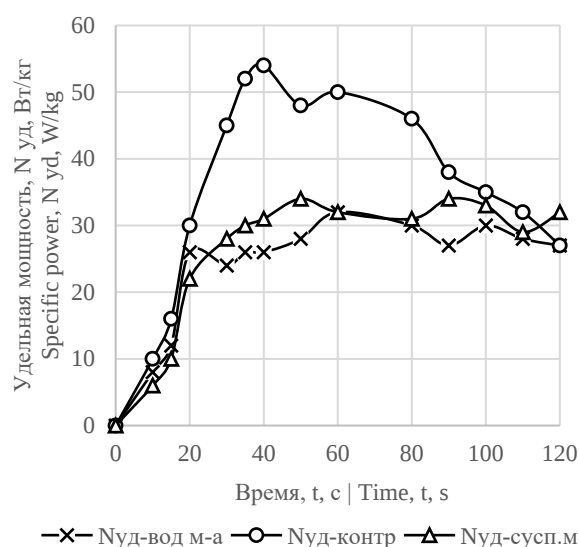


Рисунок 5. Зависимости удельной мощности на перемешивание от времени для контрольного образца (Нуд-к), образца с механоактивированной водой (Нуд-вод-м-а) и образца с механоактивированной мучной суспензией (Нуд-сусп. м)

Figure 5. Time dependences of specific stirring power for control sample (Nud-k), sample with mechanically activated water (Nud-water-m-a) and sample with mechanically activated flour suspension (Nud-susp. m)

Затем мощность на перемешивание несколько превышает мощность при замесе с механоактивированной водой, что говорит о формировании более прочной структуры теста, при этом повышенная эластичность сохраняется, разрушения структуры не наблюдается. Мощность перемешивания ниже контрольной на 30–40%. Анализ графика говорит о том, что замес должен быть остановлен через 40 с.

Оценивали качество теста после замеса. Пределное напряжение сдвига (ПНС) теста измеряли коническим пластометром и рассчитывали по известной методике. Исследование ПНС проводили сразу же после замеса и через временной промежуток в 600 секунд.

Анализ результатов эксперимента (рисунок 6) подтверждает факт повышения структурной прочности теста экспериментального. Причем для экспериментального образца ПНС со временем снижается, что можно объяснить релаксацией напряжений во времени. Для контрольного же образца ПНС сразу же после замеса был ниже почти в два раза, а затем шло его нарастание, причем через 600 секунд разница в ПНС составила не более 20%. Это говорит о том, что структура теста формировалась в состоянии покоя после перемешивания, что говорит о необходимости своевременного прекращения механического воздействия на смесь.

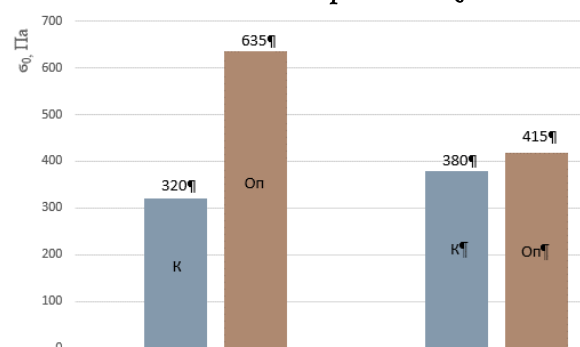


Рисунок 6. Результаты измерений предельного напряжения сдвига σ_0 (Па) теста сразу после замеса и через 600 с после замеса (К – контроль; Оп – опытный замес)

Figure 6. Measurement results of shear stress σ_0 (Pa) of dough immediately after kneading and 600 s after kneading (K - control; Op - experimental kneading)

Результаты эксперимента (рисунок 6) позволяют сделать вывод о том, что при контрольном перемешивании структура теста не сформировалась в полной мере и со временем происходит её упрочнение (увеличение ПНС за время наблюдений до 20%). В пробе экспериментального образца ПНС сразу же после замеса превышало контрольный в два раза и при отлёжке несколько снижалось, что свидетельствует о протекании релаксации напряжений после сдвиговых деформаций в процессе замеса. В пробе экспериментального образца ПНС сразу же после замеса превышало контрольный в два раза и при отлёжке несколько снизилось, что свидетельствует о протекании релаксации напряжений после деформации. Следовательно, белковый каркас теста упрочняется. На структурометре СТ-2 изучали адгезию теста и релаксацию напряжений в тесте (рисунки 7 и 8) показало снижение адгезии и повышение модуля упругости до 20%.

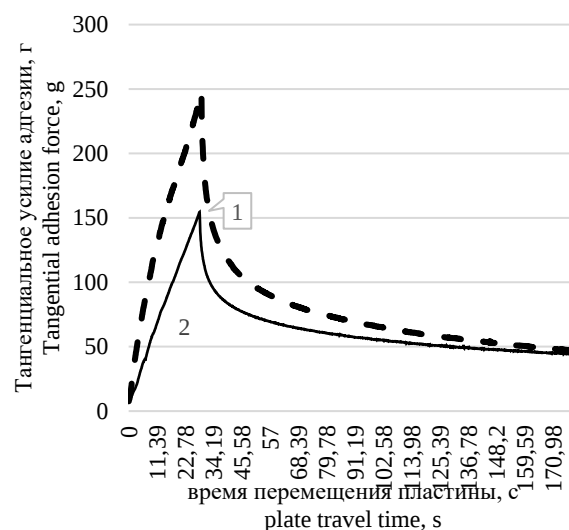


Рисунок 7. Зависимости тангенциального усилия адгезии контрольного (1) и экспериментального (2) образцов

Figure 7. Dependences of tangential adhesion force of control (1) and experimental (2) samples

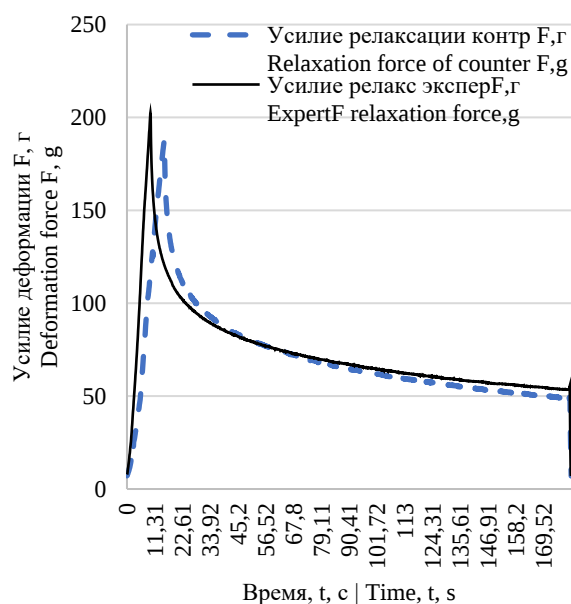


Рисунок 8. Зависимости релаксации напряжений в тесте контрольного и экспериментального образцов
Figure 8. Dependences of stress relaxation in the test of control and experimental specimens

Исследовалось влияние механоактивации воды на водосвязывающую способность (ВСС) теста. Образцы подвергали высушиванию с температурой $(103^{\circ}\pm 2)$. Эксперименты проводились с помощью анализатора влажности МХ-50.

Высушивание образцов производилось непосредственно после замеса и по истечении 45 минут (рисунок 9). Построены графики кинетики сушки $dW/dt = f(dW)$ (рисунок 10). Установлено, что механоактивация воды перед перемешиванием повышает влагосвязывающую способность на 10–12%, причем ВСС, находящегося в покое после замеса на 7–10% выше после выдержки теста.

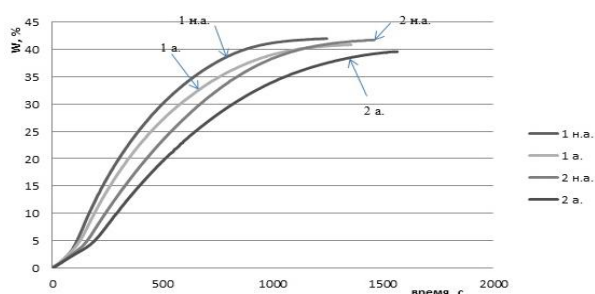


Рисунок 9. Зависимости влагоудаления при сушке теста с температурой 103°C : 1 н.а. и 2 н.а. – для теста с неактивированной водой непосредственно после замеса и через 45 минут; 1 а. и 2 а. – с активированной водой и с интервалом времени в 45 мин

Figure 9. Dependences of moisture removal during dough drying at 103°C : 1a. and 2a. - for dough with unactivated water immediately after kneading and after 45 min; 1a. and 2a. - with activated water and at 45 min intervals

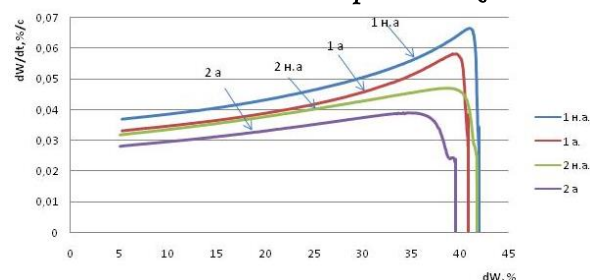


Рисунок 10. Кинетика сушки теста пшеничного при температуре 103°C : 1 н.а. и 2 н.а. – для теста с неактивированной водой непосредственно после замеса и через 45 мин.; 1 а. и 2 а. – с активированной водой и с интервалом времени в 45 мин

Figure 10. Drying kinetics of wheat dough at 103°C : 1 n.a. and 2 n.a. - for dough with unactivated water immediately after kneading and after 45 min; 1 a. and 2 a. - with activated water and at 45 min intervals.

Исследования перемешивания в производственных условиях проводились на тестомесильном оборудовании 1-го и 4-го хлебозаводов ООО «Кузбассхлеб» в технологических линиях производства хлеба «Кемеровский» и сушки «Кемеровская». Результаты измерения затрат мощности при перемешивании теста в тестомесильной машине Г4-МТМ-330–01 представлены на рисунке 11.

Практически сразу мощность перемешивания в экспериментальном замесе стала превышать мощность при контрольном замесе. Это говорит о значительном опережении формирования однородной структуры теста и начала гидролитического взаимодействия воды и частиц муки. Уже после 120 с мощность перемешивания стабилизировалась. А по истечении 240 с произошло значительное нарастание мощности более чем на 1,5 кВт, что можно объяснить возросшей прочностью клейковинного каркаса теста. В контрольном перемешивании третья стадия замеса наступила после 300 с, и после 500 с мощность перемешивания стала падать, что говорит о начале разрушения клейковинного каркаса.

Исследования теста на приборе «Rheotest» (рисунок 12) показало, что при сдвиговом течении напряжения в экспериментальном образце превышают на 20% напряжения контрольного образца.

По результатам можно сделать вывод, что предварительная механоактивация воды повышает эластичность теста при перемешивании, мощность при этом снижается до 20% за счет снижения удельной мощности на перемешивание и сокращения времени процесса.

Определение влияния механоактивации воды на свойства маловлажного теста проведены в тестомесильной машине ТМ-63 на 4-м хлебозаводе г. Кемерово в линии производства сушки «Кемеровская». Результаты представлены на рисунке 13.

Наблюдается заметное снижение мощности перемешивания для образца с механоактивированной водой. А после пересечения графиков сопротивление перемешиванию начинает нарастать. Это говорит о сформированности структуры теста и необходимости прекратить процесс

механического воздействия. Измеряли ПНС теста после замеса (рисунок 14) коническим пластометром Ребиндера. Установлено, что структура экспериментального образца формируется лучше и при меньших затратах энергии, а прочность её выше, чем у контрольного образца, на 20%.

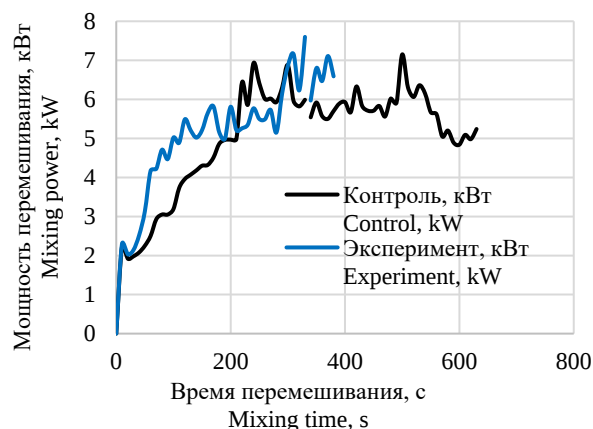


Рисунок 11. Зависимости мощности на перемешивание теста контрольного и экспериментального образцов в тестомесильной машине Г4-МТМ-330-01

Figure 11. Power dependences for dough mixing of control and experimental samples in the dough mixer G4 MTM 330-01

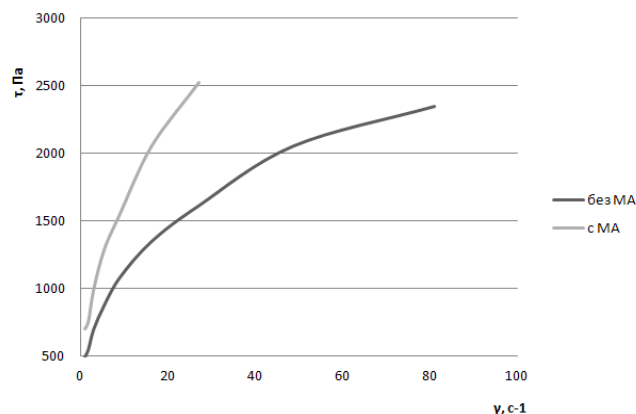


Рисунок 12. Зависимости напряжения τ (Па) сдвигового течения от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ (с⁻¹) для теста контрольного (без МА) и экспериментального образца (с МА)

Figure 12. Dependences of shear flow stress τ (Pa) on shear rate (s^{-1}) for the test of control (without MA) and experimental sample (with MA)

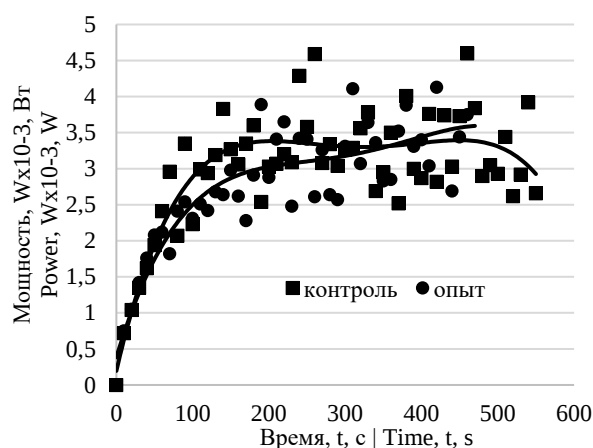


Рисунок 13. Зависимости мощности W (Вт) от времени t (с) при перемешивании теста сушки «Кемеровская»

Figure 13. Dependences of power W (W) on time t (с) during mixing of "Kemerovskaya" drying dough

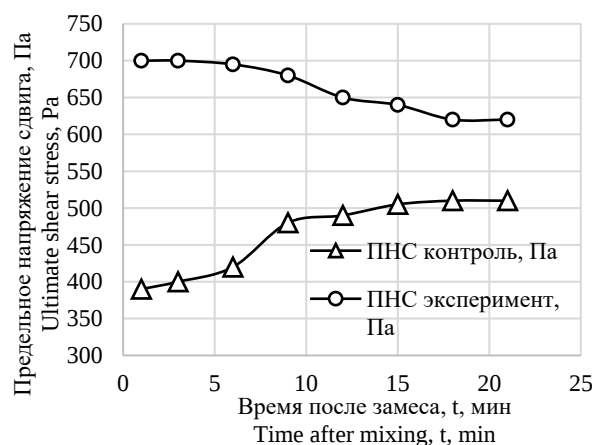


Рисунок 14. Зависимости изменения предельного напряжения сдвига (ПНС) теста сушки «Кемеровская» после перемешивания во времени

Figure 14. Dependences of change of shear stress limit (SST) of "Kemerovskaya" drying dough after mixing in time

Заключение

Аналитически установлено, что важнейшей стадией перемешивания теста является начальная, когда происходит смачивание поверхности частиц муки водными растворами. Показана необходимость снижения поверхностной энергии водных растворов перед их перемешиванием с мукой, сделан вывод о тождественности работы когезии в жидкости работе её механоактивации, и получены выражения для ее определения.

Экспериментально установлено снижение поверхностной энергии воды и водных растворов (NaCl 3,3%, мука 1%) до 20% при перемешивании.

Показано, что для механоактивации воды и водных растворов в исследованном диапазоне скоростей достаточно 60–120 °С.

Показано влияние механоактивации водных растворов на качество теста: структурообразование происходит быстрее, тесто проявляет повышенную эластичность при замесе, после замеса предельное напряжение сдвига теста

увеличивается до 20%, вязкость теста повышается до 20%, модуль упругости теста повысился более чем на 20%, адгезия теста уменьшилась на 20%, влагоудерживающая способность повышается на 10–12%. При замесе тугого маловлажного теста для сушки «Кемеровская» в начале перемешивания мощность снижается на 15–20%,

а предельное напряжение сдвига после перемешивания и выстойки в течение 20 минут превышает контрольный на 20–25%.

Рекомендовано применять предварительную механоактивацию водных растворов в промышленности в процессе подготовки к замесу и опары, и теста.

Литература

- 1 Матвеева И.В., Дремучева Г.Ф., Нечаев А.П. и др. Концепция и технологические решения в области применения улучшителей для хлебобулочных и мучных кондитерских изделий // *Пищевые ингредиенты в производстве хлебобулочных и мучных кондитерских изделий*. Москва: ДеЛи плюс, 2013. С. 259–276.
- 2 Лаврова Л.Ю., Лесникова Н.А., Борцова Е.Л., Балакина А.И. Использование нетрадиционных видов муки в производстве бездрожжевых кексов // *Хлебопродукты*. 2018. № 6. С. 58–60.
- 3 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.
- 4 Минаков Д.В., Минаков Д.В., Козубаева Л.А., Кузьмина С.С. и др. Особенности созревания теста и формирования качества хлеба с биомассой мицелия *Armillaria mellea* // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2022. № 1. С. 145–156.
- 5 Алехина Н.Н., Пономарева Е.И., Жаркова И.М., Желтикова А.С. Исследование функциональных свойств зернового хлеба на основе хлебопекарных смесей с белковым обогабителем // *Пищевая промышленность*. 2020. № 5. С. 8–11.
- 6 Лукина С.И., Пономарева Е.И., Павловская С.М., Алексеев А.Е. Новые нетрадиционные ингредиенты в производстве хлеба из пшеничной муки // *Научные труды КубГТУ*. 2019. № S9. С. 146–153.
- 7 Болдырев В.В. Механохимия и механическая активация твердых веществ // *Успехи химии*. 2006. Т. 75. С. 203–216.
- 8 Золотовский Б.П. и др. Закономерности механохимической активации тригидроксидов алюминия и их водных суспензий // *Известия Сибирского отделения Академии наук СССР. Серия химических наук*. 1987. № 5. С. 80–84.
- 9 Wu Z., Wang D., Sun A. Preparation of MoS₂ nanoflakes by a novel mechanical activation method // *Journal of crystal growth*. 2010. V. 312. № 2. P. 340–343.
- 10 Kosova N.V., Devyatkina E.T., Slobodyuk A.B., Petrov S.A. Submicron LiFe_{1–y}MnyPO₄ solid solutions prepared by mechanochemically assisted carbothermal reduction: The structure and properties // *Electrochimica acta*. 2012. V. 59. P. 404–411. doi: 10.1016/j.electacta.2011.10.082
- 11 Ибрагимов Р.А., Пименов С.И., Изотов В.С. Влияние механохимической активации вяжущего на свойства мелкозернистого бетона // *Инженерно-строительный журнал*. 2015. № 2(54). С. 63–69.
- 12 Батыршин Э.С., Шарипов Р.Р., Волков М.Г., Жонин А.В. и др. Особенности реологии сшитых гуаровых гелей, применяемых для гидроразрыва пласта // *Нефтяное хозяйство*. 2022. № 11. С. 127–131.
- 13 Крупская Т.В., Гулько В.М., Процак И.С., Картель Н.Т. и др. Управление тиксотропными свойствами водных суспензий, содержащих гидрофильные и гидрофобные компоненты // *Химия, физика и технология поверхности*. 2020. Т. 11. № 1. С. 38–57.
- 14 Гуюмджян П.П., Роменская И.Т., Зиновьева Е.В. Физико-механические особенности обработки воды // *Ученые записки инж.-строит факультета ИГАСУ. Иваново*, 2008. № 4. С. 92–95.
- 15 Зиновьева Е.В. Особенности механоактивационных процессов в дистиллированной воде // *Разработка машин и агрегатов, исследование тепломассообменных процессов в технологиях производства и эксплуатации строительных материалов и изделий: Сб. науч. тр. по материалам круглого стола, посвященного науч. шк. Акад. РААСН, д-ра техн. наук, проф. С.В. Федосова*. Иваново: ПресСто, 2013. С. 128–131.
- 16 Кравцов С.А., Гайдаров М.М.Р. Дезинтеграторная обработка эмульсионных и углеводородных растворов // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. 2010. № 9. С. 38–43.
- 17 Федосов С.В., Акулова М.В., Слизнаева Т.Е. Изучение закономерностей структурообразования в цементном камне на механо-магнитоактивированной воде с добавкой ПВА // *Academia. Архитектура и строительство*. 2017. № 2. С. 117–122.
- 18 Федосов С.В., Акулова М.В., Зиновьева Е.В. Особенности механической активации дистиллированной воды различными насадками роторной мешалки // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2016. № 1(361). С. 153–157.
- 19 Гуюмджян П.П., Роменская И.Т., Зиновьева Е.В. Физико-механические особенности обработки воды // *Ученые записки инж.-строит факультета ИГАСУ. Иваново*, 2008. № 4. С. 92–95.
- 20 Федосов С.В., Акулова М.В., Слизнаева Т.Е. Особенности структурообразования в мелкозернистом бетоне на механоактивированном водном растворе силиката натрия // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2013. № 31–2 (50). С. 199–206.
- 21 Гайдаров М. М.-Р., Кравцов С.А. Дезинтеграторная технология приготовления буровых растворов и технологических жидкостей // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. 2007. № 10. С. 29–33.
- 22 Федосов С.В., Акулова М.В., Слизнаева Т.Е. Изучение закономерностей структурообразования в цементном камне на механомагнитоактивированной воде с добавкой ПВА // *Academia. Архитектура и строительство*. 2016. № 3. С. 136–142.

References

- 1 Matveeva I.V., Dremucheva G.F., Nechaev A.P. et al. Concept and technological solutions in the field of application of improvers for bakery and flour confectionery products. Food ingredients in the production of bakery and flour confectionery products. Moscow, DeLi plus, 2013. pp. 259–276. (in Russian).
- 2 Lavrova L.Yu., Lesnikova N.A., Bortsova E.L., Balakina A.I. The use of non-traditional types of flour in the production of yeast-free cakes. Bread products. 2018. no. 6. pp. 58–60. (in Russian).
- 3 Sokol N.V., Atroschenko E.A. Study of the influence of electrochemically activated water on the rheological properties of dough and the quality of bread. New technologies. 2019. no. 1. pp. 170–177. (in Russian).
- 4 Minakov D.V., Minakov D.V., Kozubaeva L.A., Kuzmina S.S. et al. Features of dough ripening and formation of bread quality with biomass of *Armillaria mellea* mycelium. Storage and processing of agricultural raw materials. 2022. no. 1. pp. 145–156. (in Russian).
- 5 Alekhina N.N., Ponomareva E.I., Zharkova I.M., Zheltikova A.S. Study of the functional properties of grain bread based on baking mixtures with a protein fortifier. Food industry. 2020. no. 5. pp. 8–11. (in Russian).

- 6 Lukina S.I., Ponomareva E.I., Pavlovskaya S.M., Alekseev A.E. New non-traditional ingredients in the production of bread from wheat flour. Scientific works of Kuban State Technical University. 2019. no. S9. pp. 146–153. (in Russian).
- 7 Boldyrev V.V. Mechanochemistry and mechanical activation of solids. Advances in Chemistry. 2006. vol. 75. pp. 203–216. (in Russian).
- 8 Zolotovskiy B.P. and others. Regularities of mechanochemical activation of aluminum trihydroxides and their aqueous suspensions. News of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. Chemical Sciences Series. 1987. no. 5. pp. 80–84. (in Russian).
- 9 Wu Z., Wang D., Sun A. Preparation of MoS₂ nanoflakes by a novel mechanical activation method. Journal of crystal growth. 2010. vol. 312. no. 2. pp. 340–343. (in Russian).
- 10 Kosova N.V., Devyatkina E.T., Slobodyuk A.B., Petrov S.A. Submicron LiFe_{1-y}Mn_yPO₄ solid solutions prepared by mechanochemically assisted carbothermal reduction: The structure and properties. Electrochimica acta. 2012. vol. 59. pp. 404–411. doi: 10.1016/j.electacta.2011.10.082
- 11 Ibragimov R.A., Pimenov S.I., Izotov V.S. The influence of mechanochemical activation of the binder on the properties of fine-grained concrete. Engineering and Construction Journal. 2015. no. 2(54). pp. 63–69. (in Russian).
- 12 Batyrshin E.S., Sharipov R.R., Volkov M.G., Zhonin A.V. et al. Features of the rheology of cross-linked guar gels used for hydraulic fracturing. Oil industry. 2022. no. 11. pp. 127–131. (in Russian).
- 13 Krupskaya T.V., Gunko V.M., Protsak I.S., Kartel N.T. et al. Control of thixotropic properties of aqueous suspensions containing hydrophilic and hydrophobic components. Chemistry, physics and surface technology. 2020. vol. 11. no. 1. pp. 38–57. (in Russian).
- 14 Guyumdzhyan P.P., Romenskaya I.T., Zinoviyeva E.V. Physico-mechanical features of water treatment. Scientific notes of civil engineering faculty of IGASU. Ivanovo, 2008. no. 4. pp. 92–95. (in Russian).
- 15 Zinoviyeva E.V. Features of mechanical activation processes in distilled water. Development of machines and units, research of heat and mass transfer processes in technologies for the production and operation of building materials and products. Ivanovo, PresSto, 2013. pp. 128–131. (in Russian).
- 16 Kravtsov S.A., Gaidarov M.M.R. Disintegrator processing of emulsion and hydrocarbon solutions. Construction of oil and gas wells on land and at sea. 2010. no. 9. pp. 38–43. (in Russian).
- 17 Fedosov S.V., Akulova M.V., Slizneva T.E. Study of the patterns of structure formation in cement stone on mechanically magnetically activated water with the addition of PVA. Academia. Architecture and construction. 2017. no. 2. pp. 117–122. (in Russian).
- 18 Fedosov S.V., Akulova M.V., Zinoviyeva E.V. Features of mechanical activation of distilled water with various attachments of a rotary mixer. News of higher educational institutions. Textile industry technology. 2016. no. 1(361). pp. 153–157. (in Russian).
- 19 Guyumdzhyan P.P., Romenskaya I.T., Zinoviyeva E.V. Physico-mechanical features of water treatment. Scientific notes of civil engineering faculty of IGASU. Ivanovo, 2008. no. 4. pp. 92–95. (in Russian).
- 20 Fedosov S.V., Akulova M.V., Slizneva T.E. Features of structure formation in fine-grained concrete on a mechanically activated aqueous solution of sodium silicate. Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and architecture. 2013. no. 31–2 (50). pp. 199–206. (in Russian).
- 21 Gaidarov M.M.R., Kravtsov S.A. Disintegrator technology for preparing drilling fluids and process fluids. Construction of oil and gas wells on land and at sea. 2007. no. 10. pp. 29–33. (in Russian).
- 22 Fedosov S.V., Akulova M.V., Slizneva T.E. Study of the patterns of structure formation in cement stone on mechanically magnetically activated water with the addition of PVA. Academia. Architecture and construction. 2016. no. 3. pp. 136–142. (in Russian).

Сведения об авторах

Виктор В. Иванов технический директор, ОАО КемеровоХлеб, пр-т Кузнецкий, 105, г. Кемерово, 650055, Россия, v-ivanow2013@ya.ru

Сергей Д. Руднев профессор, кафедра медицинской и биологической физики и высшей математики, Кемеровский государственный медицинский университет, ул. Ворошилова, д. 22А, г. Кемерово, Кемеровская область, 650056, Россия, sdrudnev@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2506-6121>

Дмитрий М. Бородулин д.т.н., профессор, кафедра технологии хранения и переработки плодовоовощной и растениеводческой, Российский государственный аграрный университет МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Россия, borodulin_dmitri@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-3035-0354>

Александра И. Крикун к.т.н., доцент, кафедра технологические машины и оборудование, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, ул. Луговая, 52 Б, г. Владивосток, 690087, Россия, krikun.ai@dgtru.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9330-2555>

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Victor V. Ivanov technical director, ОАО Kemerovokhleb, 105 Kuznetskiy Ave., Kemerovo, 650055, Russia, v-ivanow2013@ya.ru

Sergey D. Rudnev professor, medical and biological physics and higher mathematics department, Kemerovo State Medical University, st. Voroshilova, 22A, Kemerovo, Kemerovo region, 650056, Russia, sdrudnev@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2506-6121>

Dmitry M. Borodulin Dr. Sci. (Engin.), professor, technology of storage and processing of fruits department, Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 127434, Moscow, st. Timiryazevskaya, 49, borodulin_dmitri@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-3035-0354>

Alexandra I. Krikun Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, technological machines and equipment department, Far Eastern State Technical Fisheries University, st. Lugovaya, 52 B, Vladivostok, 690087, Russia, krikun.ai@dgtru.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9330-2555>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 12/07/2023	После редакции 31/07/2023	Принята в печать 18/08/2023
Received 12/07/2023	Accepted in revised 31/07/2023	Accepted 18/08/2023