

<https://doi.org/10.47370/2072-0920-2022-18-3-74-84>

УДК 541.123.21:54.03

© 2022

Поступила 30.08.2022

Received 30.08.2022



Принята в печать 21.09.2022

Accepted 21.09.2022

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interests

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL ARTICLE

О ВЛИЯНИИ МЕХАНОАКТИВАЦИИ И СВЧ-ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ВОДЫ И ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

Сергей Д. Руднев^{1*}, Александра И. Крикун², Вероника В. Феоктистова¹,
Виктор В. Иванов³, Максим В. Суменков⁴

¹Кемеровский государственный университет (КемГУ);
ул. Красная, 6, г. Кемерово, 650000, Российская Федерация

²Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет
(Дальрыбвтуз); ул. Луговая, 52Б, т. Владивосток, 690087, Российская Федерация

³ОАО «КемеровоХлеб»; пр-т Кузнецкий, д. 105, г. Кемерово, 650055, Российская Федерация

⁴ООО «Автоцентр «Дюк и Ко»; ул. Баумана, д. 55, г. Кемерово, 650040, Российская Федерация

Аннотация. С участием воды и водных растворов формируется большинство пищевых смесей, где жидкость выступает дисперсионной средой. Формирование устойчивых поверхностных взаимодействий в дисперсных системах с участием воды основывается на преодолении сил поверхностного натяжения на границе взаимодействия фаз. Целью работы являлся анализ влияния механической активации при перемешивании и СВЧ-воздействия на поверхностные свойства воды и водных растворов. Объектом исследований принята вода дистиллированная, вода питьевая бутилированная «Бердовская таежная», водный раствор NaCl (3,33%), водный раствор NaCl (3,33%) с внесением 1% муки при перемешивании. Основным методом исследования применили метод капиллярного поднятия жидкости в трубке малого сечения, частично погруженной в жидкость. Установлено, что и механическое, и электромагнитное воздействие изменяют поверхностную энергию воды и водных растворов. Но их влияние неоднозначно. Поверхностное натяжение при механической активации перемешиванием снижается до определенного минимума в течение различных для разных растворов промежутков времени, а затем возрастает до определенного уровня. Время сохранения пониженной поверхностной энергии воды дистиллированной после перемешивания с частотой 100 оборотов в минуту составляет 60–80 с. Наблюдается тенденция заметного влияния примесей на поверхностное натяжение. Чем сложнее раствор и выше концентрация примесей, тем ниже его поверхностная энергия. По результатам исследований для технологических целей, например, замеса теста, рекомендуется механообработка (перемешивание) растворов для замеса теста в течение 60–70 с или СВЧ-обработка не более 20 с.

Ключевые слова: дисперсные системы, поверхностная энергия, вода, водные растворы, механическая активация, перемешивание, СВЧ-воздействие, поверхностное натяжение, метод капиллярного поднятия

Для цитирования: О влиянии механоактивации и СВЧ-воздействия на поверхностные свойства воды и водных растворов / Руднев С.Д. [и др.] // Новые технологии. 2022. Т. 18, № 3. С. 74-84. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2022-18-3-74-84>

THE EFFECT OF MECHANOACTIVATION AND MICROWAVE EFFECTS ON THE SURFACE PROPERTIES OF WATER AND AQUEOUS SOLUTIONS

Sergei D. Rudnev^{1*}, Alexandra I. Krikun², Veronika V. Feoktistova¹,
Victor V. Ivanov³, Maksim V. Sumenkov⁴

¹ Kemerovo state university (KemSU);
6. Krasnaya str., Kemerovo, 650000, the Russian Federation

² Far eastern state technical fishery university;
52B Lugovaya str., Vladivostok, 690087, the Russian Federation

³ JSC «Kemerovokhleб»; 105 Kuznetsky ave., Kemerovo, 650055, the Russian Federation

⁴ Ltd Autocentre «Duke and K»; 55 Bauman str., Kemerovo, 650040, the Russian Federation

Abstract. Most food mixtures, where the liquid acts as a dispersion medium, are formed with the participation of water and aqueous solutions. The formation of stable surface interactions in disperse systems with the participation of water is based on overcoming the forces of surface tension at the interface between the phases. The aim of the research is to analyze the effect of mechanical activation during stirring and microwave exposure on the surface properties of water and aqueous solutions. The object of the research is distilled water, bottled “Berdovskaya taiga” drinking water, an aqueous solution of NaCl (3.33%), an aqueous solution of NaCl (3.33%) with the addition of 1% flour with stirring. The main research method is the method of capillary rise of liquid in a tube of small cross section, partially immersed in liquid. It has been established that both mechanical and electromagnetic effects change the surface energy of water and aqueous solutions. But their influence is ambiguous. Surface tension during mechanical activation by stirring decreases to a certain minimum for different time intervals for different solutions, and then increases to a certain level. The retention time of the reduced surface energy of distilled water after stirring at a frequency of 100 rpm is 60–80 s. There is a tendency for a noticeable effect of impurities on the surface tension. The more complex the solution and the higher the concentration of impurities, the lower its surface energy. According to the results of the research, for technological purposes, for example, dough kneading, it is recommended to mechanically process (mix) solutions for dough kneading for 60–70 s or microwave treatment for no more than 20 s.

Keywords: dispersed systems, surface energy, water, aqueous solutions, mechanical activation, mixing, microwave exposure, surface tension, capillary rise method

For citation: Rudnev S.D. [et al.] The effect of mechanoactivation and microwave effects on the surface properties of water and aqueous solutions. *New technologies*. 2022; 18(3): 74-84. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2022-18-3-74-84>

Введение

Целенаправленные изменения свойств воды в технологиях, где она играет важное значение, производится повсеместно. Получают воду, обработанную механически:

прошедшую через фильтры, ультрафильтры и гиперфильтры; изменяют ионный состав воды (так называемое умягчение) получают воду дистиллированную, деаэрированную, деионизированную и прочее. Знание структуры воды, особенностей ее изменений и возможность ее регулирования открывает дополнительные преимущества в самых различных технологиях, например, в очистке сточных вод, очистке воды, используемой в технологических и пищевых целях, интенсификации биотехнологических процессов.

С участием воды и водных растворов формируется большинство пищевых смесей, где жидкость выступает дисперсионной средой. Формирование устойчивых поверхностных взаимодействий в дисперсных системах с участием воды основывается на преодолении сил поверхностного натяжения на границе взаимодействия фаз. При контакте разнородных сред формируется зона сгущения энергии, которую иллюстрирует рисунок 1. Это сгущение препятствует формированию межмолекулярных связей разнородных поверхностей, его необходимо преодолевать внешними механическими или физическими воздействиями.

Теоретически и экспериментально показано [1; 2; 3], что снижение поверхностной энергии жидкой дисперсионной среды позволяет значительно ускорить смачивание поверхности дисперсной фазы, снизить энергию на перемешивание, ускорить последующие диффузионные процессы, приводящие к формированию структуры дисперсной системы

[4; 5; 6]. Известна механохимическая активация поверхностей твердых тел и сложных дисперсных систем [7; 8; 9; 10]. Она позволяет интенсифицировать массообменные процессы на поверхности, эффективна при смачивании и растворении. Но снижению поверхностной энергии жидкостей достаточного внимания, на наш взгляд, не уделялось. Возможна ли механоактивация жидкости перемешиванием или другими способами? Малоизученной сферой знаний является и влияние электромагнитного сверхвысокочастотного воздействия на поверхностные свойства воды и водных растворов. Целью проведенных исследований был анализ влияния механической активации и СВЧ-воздействия на поверхностные свойства воды.

Методы и принципы исследования

Объектом исследований принята вода дистиллированная, вода питьевая бутилированная «Бердовская таежная» (Свидетельство о государственной регистрации № RU.42.21.01.006.Е.000032.04.11 от 21 апреля 2011 г.). Эксперименты поставлены в лабораториях кафедры «Мехатроника и робототехника технологических систем» ФГБОУ ВО КемГУ и кафедры «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Дальрыбвтуз».

В качестве экспериментальной установки (рисунок 2) использовали миксер бытовой Gemlux с процессной емкостью 3 литра и дискретным переключением скоростей вращения мешалки. В качестве мешалки использовали венчиковую насадку, применяемую для взбивания

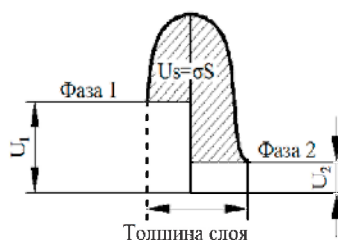


Рис. 1. Схема сгущения энергии на поверхности контакта разнородных сред

Fig. 1. Scheme of energy condensation on the contact surface of dissimilar media



Рис. 2. Исследовательское оборудование для изучения свойств воды

Fig. 2. Research equipment for studying the properties of water

маловязких дисперсных систем. Температура воды контролировалась термометром электронным REXANT с ценой деления 0,1 градус Цельсия.

Основным методом исследования применили метод капиллярного поднятия жидкости в трубке малого сечения, частично погруженной в жидкость. Использовали трубки лабораторные стеклянные капиллярные диаметром 0,1 мм.

Получали зависимости параметров от времени перемешивания воды и при

частоте перемешивания 100 оборотов в минуту.

Основные результаты

Результаты экспериментов после статистической обработки представлены на рисунках 3–8. Повторность при каждом измерении составляла не менее пяти раз. Капиллярная трубка не менялась в течение всего эксперимента. При обработке результатов экспериментов «сглаживание» флуктуаций результатов измерений не проводили, т.к.

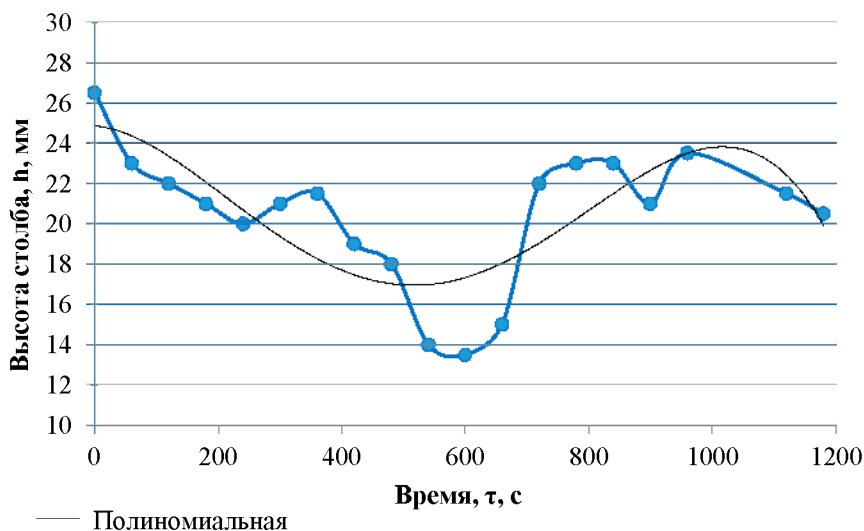


Рис. 3. Изменение высоты h (мм) столба дистиллированной воды в капилляре 0,1 мм во времени τ (с) при перемешивании с частотой 100 мин⁻¹

Fig. 3. Change in the height h (mm) of a column of distilled water in a 0.1 mm capillary in time τ (s) with stirring at a frequency of 100 min⁻¹

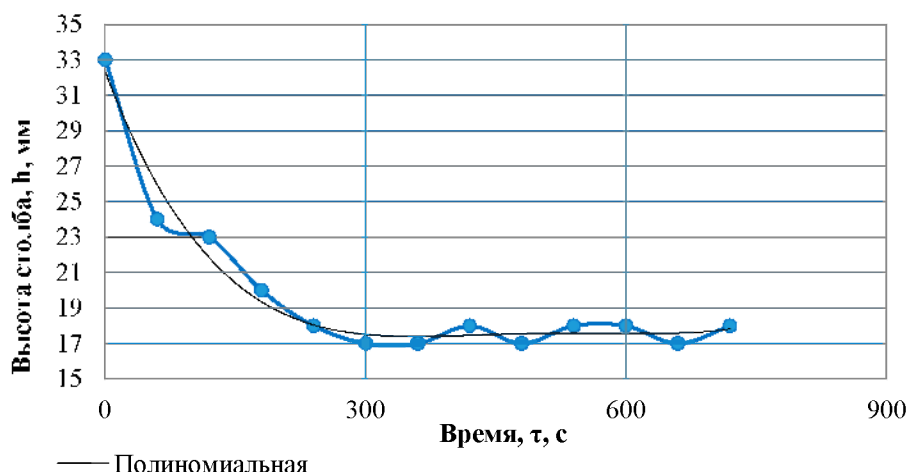


Рис. 4. Изменение высоты столба h (мм) воды питьевой «Бердовская таежная» в капилляре 0,1 мм во времени τ (с) при перемешивании с частотой 100 мин⁻¹

Fig. 4. Change in the height of the column h (mm) of drinking water "Berdovskaya taiga" in a capillary 0.1 mm in time τ (s) with stirring with a frequency of 100 min⁻¹

каждый из них требует дополнительно анализа.

В первый период перемешивания высота подъема воды в капилляре (рисунок 3) в промежутке времени до 600 секунд уменьшается, а затем переходит в нестабильную область. Снижение высоты подъема воды в капилляре – прямое подтверждение падения поверхностной энергии воды в первые 10 минут процесса

до 40%. Затем происходит нестабильный рост высоты столба жидкости, что предположительно связано с понижением температуры воды.

Заметна разница поверхностных энергий воды дистиллированной и питьевой бутилированной «Бердовская таежная» (Свидетельство о государственной регистрации № RU.42.21.01.006.E.000032.04.11 от 21 апреля 2011 г.). Перемешивание

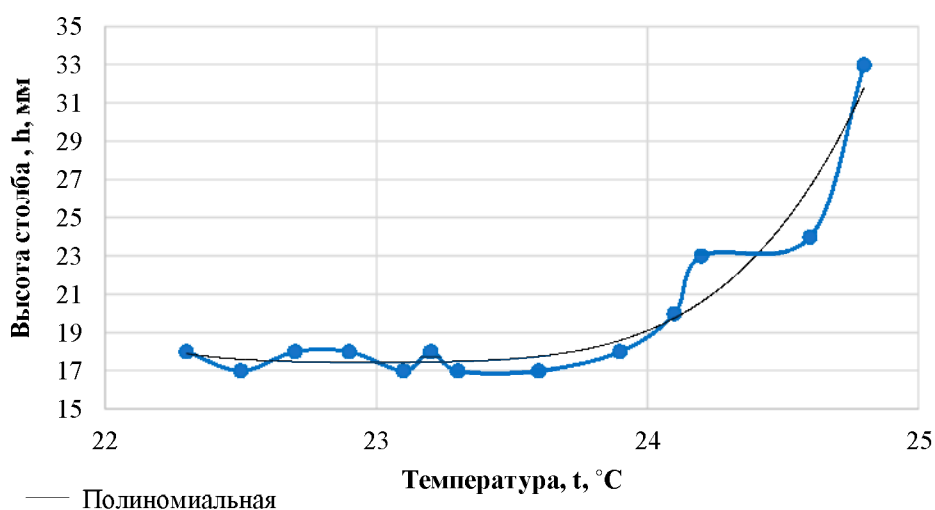


Рис. 5. График зависимости высоты столба h (мм) воды дистиллированной в капилляре 0,1 мм от температуры t (°C)

Fig. 5. Graph of the dependence of the height of the column h (mm) of distilled water in a 0.1 mm capillary on temperature t (°C)

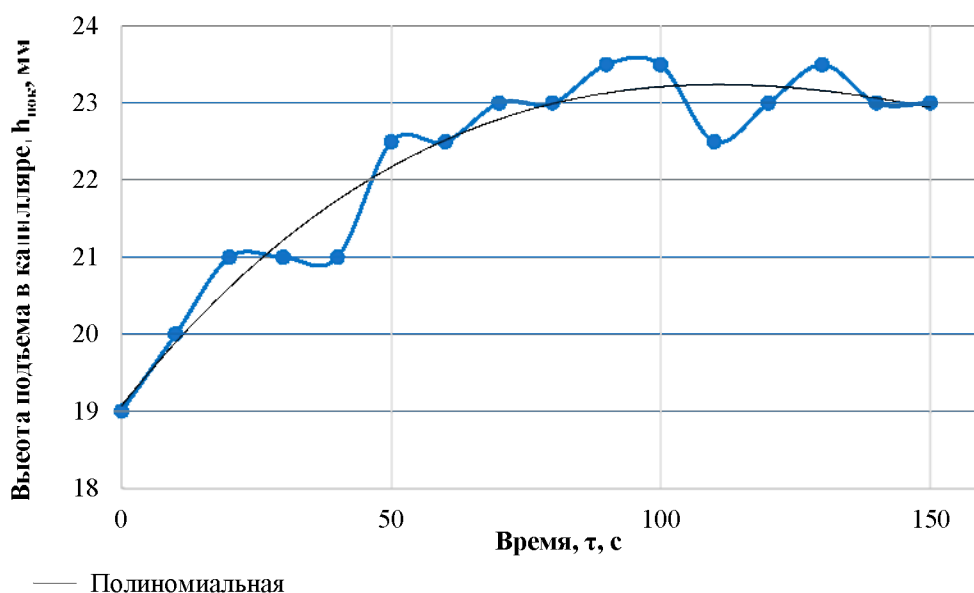


Рис. 6. Изменение высоты столба воды в капилляре 0,1 мм во времени после механоактивации в состоянии покоя

Fig. 6. Change in the height of the water column in the capillary 0.1 mm in time after mechanoactivation at rest

воды, содержащей ионы, состав которых определяется местом происхождения, снижается значительно быстрее. График показан на рисунке 4.

На графике (рисунок 5) показана зависимость высоты столба в капилляре (поверхностной энергии) от температуры воды, изменяющейся при перемешивании. Как видно, для механоактивированной воды даже понижение температуры не дает эффекта повышения поверхностного натяжения, наблюдается обратное явление.

Как долго сохраняется пониженная поверхностная энергия воды после механической активации, показывает график на рисунке 6. Для дистиллированной воды достаточно одной минуты для восстановления свойств, характерных состоянию покоя.

Закономерен вопрос о продолжительности состояния механоактивации воды. Проведены измерения параметров механоактивированной воды, находящейся в покое (рисунок 6). Поверхностное натяжение начинает расти и стабилизируется через 100–120 с.

Проведены измерения температуры и поверхностного натяжения механоактивированной воды, находящейся в покое. При сохранении всех условий эксперимента постоянными, поверхностное натяжение начинает расти и стабилизируется довольно быстро – через 100–120 с. Вывод: использовать механоактивированную воду для технологических процессов нужно в течение ближайших 60–100 с. Время, достаточное для механоактивации, – 60–120 секунд.

Исследовались поверхностные свойства растворов воды, применяемых при замесе теста в производстве. Для составления растворов использовалось традиционное соотношение «мука/вода/соль» 100/60/2, которое еще называют «золотой пропорцией». Пересчет произвели на 2 литра воды. В натуральном выражении это соотношение составило 3,330 кг муки / 2,000 кг воды / 0,066 кг соли. Соотношение «вода/соль» дало концентрацию водно-солевого раствора 3,33%.

На рисунке 7 представлены результаты измерений высоты подъема раствора

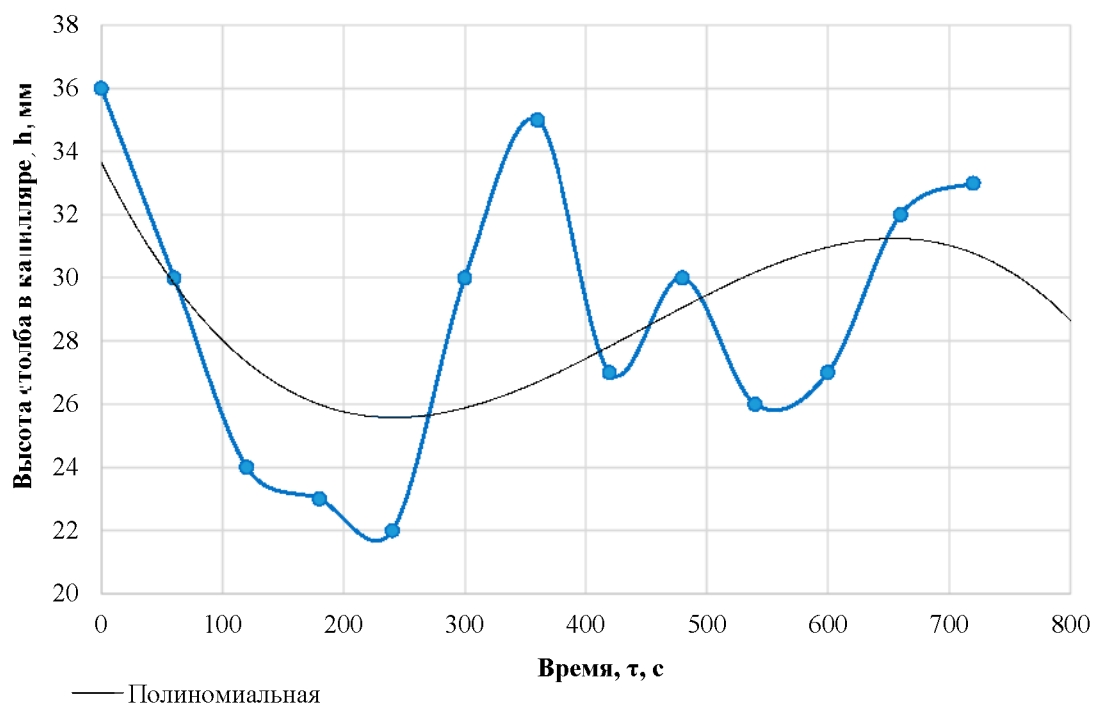


Рис. 7. Зависимость высоты подъема раствора NaCl (3,33%) в капилляре диаметром 0,1 мм от времени перемешивания

Fig. 7. Dependence of the rise height of the NaCl solution (3.33%) in a capillary with a diameter of 0.1 mm on the stirring time

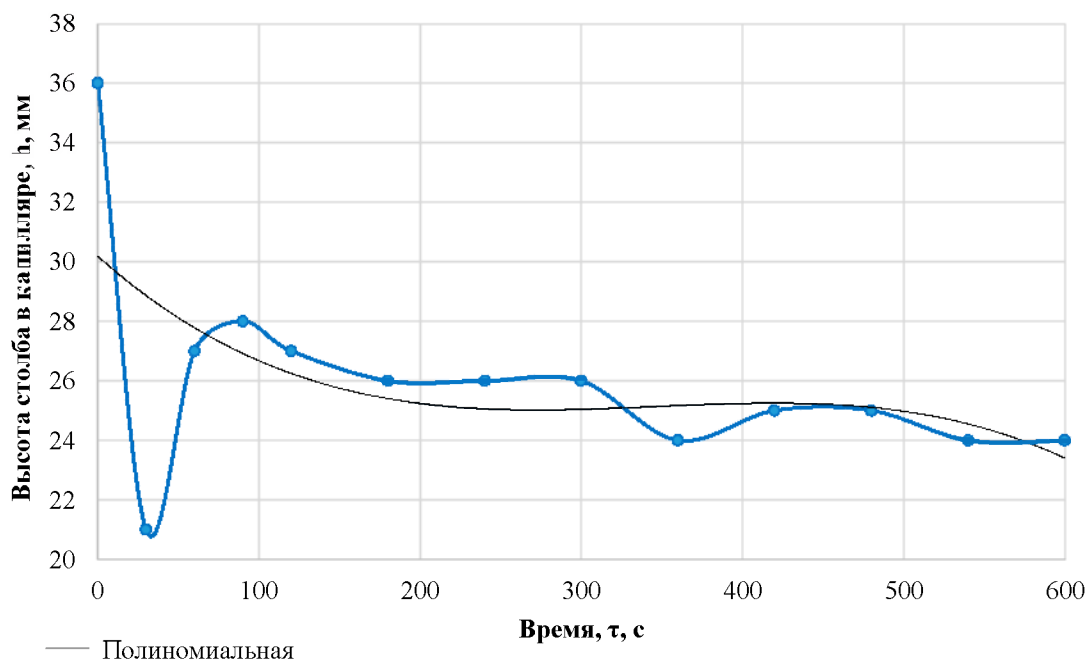
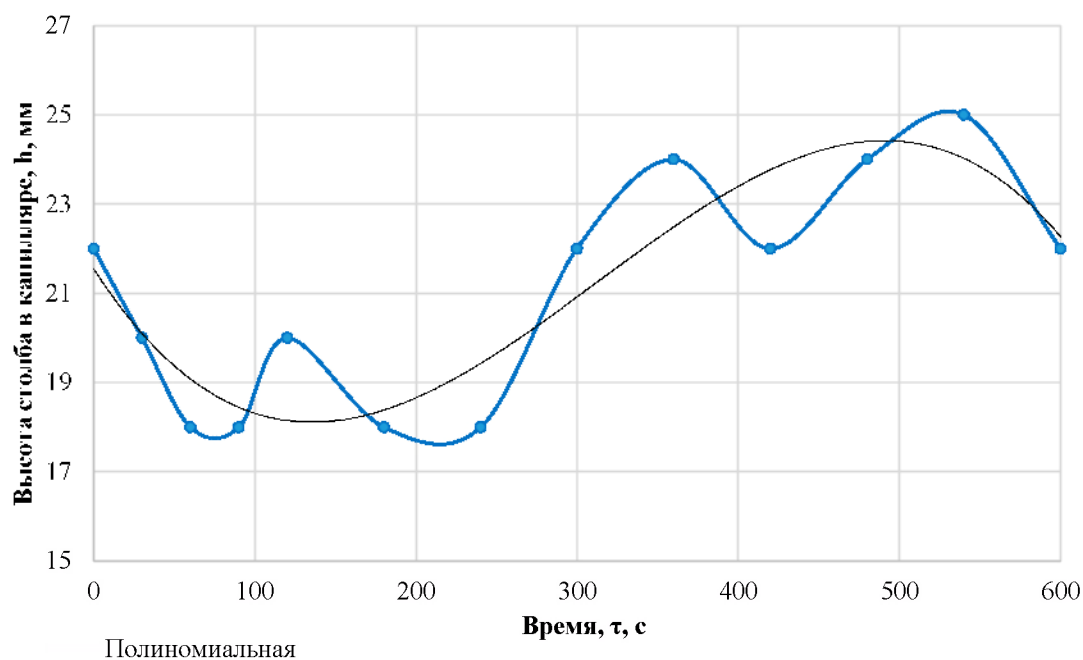


Рис. 8. Зависимость высоты подъема h (мм) 1%-го водного раствора муки в капилляре диаметром 0,1 мм от времени перемешивания

Fig. 8. The dependence of the lifting height h (mm) of a 1% aqueous solution of flour in a capillary with a diameter of 0.1 mm on the mixing time



Полиномиальная

Рис. 9. Зависимость высоты подъема раствора NaCl (3,33%) и муки (1%) в капилляре диаметром 0,1 мм от времени перемешивания

Fig. 9. Dependence of the rise height of the NaCl solution (3.33%) and flour (1%) in a capillary with a diameter of 0.1 mm on the mixing time

NaCl (3,33%) в капилляре диаметром 0,1 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 8. Высота столба раствора в капилляре в начале процесса резко падает, снижаясь в первые 60 с на 40%, затем немного увеличивается, но сохраняет пониженное значение на уровне 25–30%.

Вывод: для механоактивации 1%-го водного раствора муки достаточно 60 с перемешивания.

Был проведен эксперимент по измерению поверхностной энергии при перемешивании 3,3%-го раствора NaCl с 1%-м раствором муки. Результаты представлены на рисунке 9.

Минимальное значение высоты столба раствора в капилляре соответствовало времени перемешивания 60–90 с. Снижение поверхностной энергии раствора составило около 20%.

При изучении влияния перемешивания растворов показано, что минимумы поверхностной энергии достигаются при времени перемешивания 60–120 с при числе оборотов мешалки 100 в минуту.

Изучение влияния СВЧ-обработки проводили также капиллярным способом трубкой диаметром 0,1 мм. СВЧ-воздействие проводили в микроволновой печи Samsung при мощности 750 Вт. Обработке подвергались порции по 100 мл (0,1 кг). Удельная мощность обработки составила 7500 Вт/кг. Интервалы обработки приняты в 10 секунд. Измерялось не только поверхностное натяжение, но и температура жидкости термометром электронным REXANT. Исследовались вода «Бердовская» бутилированная, водный соляной раствор

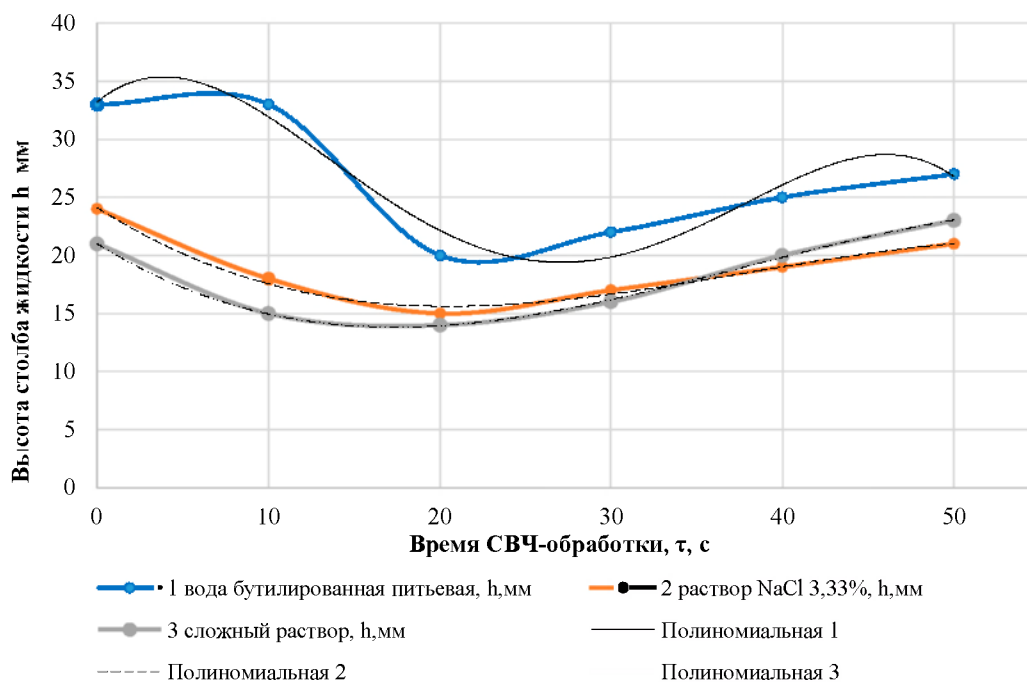


Рис. 10. Зависимость высоты столба жидкости h (мм) в капилляре 0,1 мм от времени τ (с) СВЧ-обработки при удельной мощности 7500 Вт/кг

Fig. 10. Dependence of the liquid column height h (mm) in a 0.1 mm capillary on the time τ (s) of microwave treatment at a specific power of 7500 W/kg

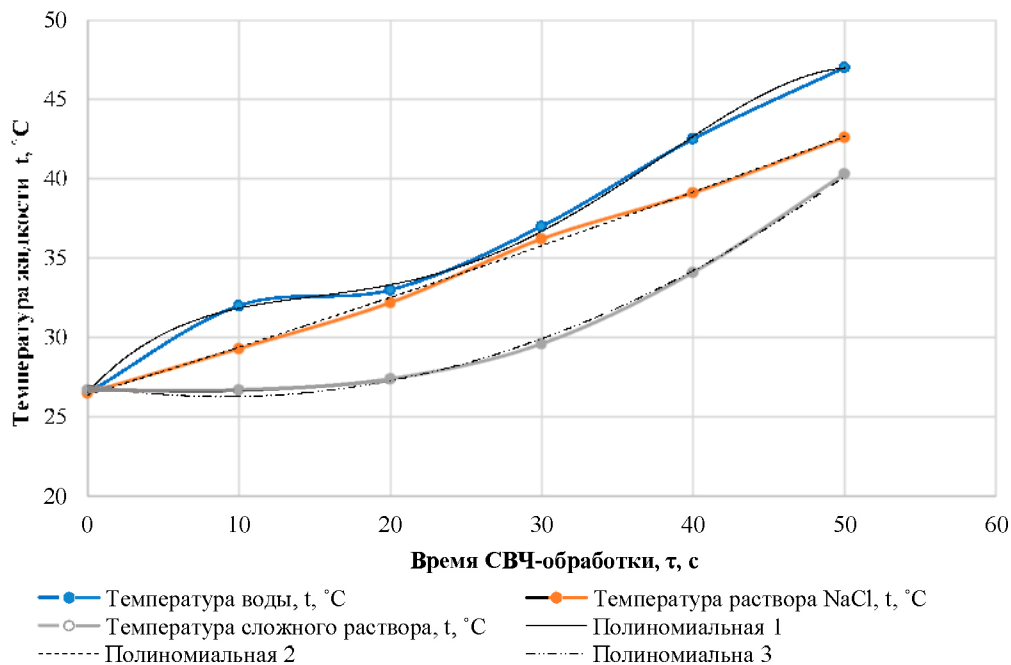


Рис. 11. Зависимость температуры жидкости T (град. С) от времени t (с) СВЧ-обработки при удельной мощности 7500 Вт/кг

Fig. 11. Dependence of the liquid temperature T (deg. C) on the time t (s) of microwave treatment at a specific power of 7500 W/kg

NaCl (3,33%), сложный водно-соляно-мучной раствор с добавлением к соляному (3,33%) 1% муки пшеничной высшего сорта. Результаты экспериментов после статистической обработки показаны на рисунках 10 и 11.

Результаты измерений поверхностного натяжения посредством капилляра показывают, что чем больше в воде посторонних веществ, тем ниже и ее поверхностная энергия. Причем минимум достигнут при 20 секундах обработки. Темпы роста температуры водных растворов показали, что чем больше посторонних веществ в воде, тем ниже прирост температуры. Этому явлению можно найти объяснение с позиции энергий межмолекулярных взаимодействий. Однако не обошлось и без аномалий. Несмотря на рост температуры растворов, их поверхностное натяжение после 20 секунд СВЧ-обработки росло.

Заключение

И механическое, и электромагнитное воздействие изменяют поверхностную энергию воды и водных растворов. Но их влияние неоднозначно. Никаких линейных зависимостей в этих процессах не наблюдается. Поверхностное натяжение при механической активации перемешиванием снижается до определенного минимума в течение различных для разных растворов промежутков времени, а затем возрастает до определенного уровня. Наблюдается тенденция заметного влияния примесей на поверхностное натяжение. Чем сложнее раствор и выше концентрация примесей, тем ниже его поверхностная энергия. По результатам исследований для технологических целей, например замеса теста, рекомендуем следующие параметры: механообработка (перемешивание) растворов для замеса теста в течение 60–70 с, СВЧ-обработка – 20 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Руднев С.Д. Селективная дезинтеграция растительного сырья: монография. Кемерово: КемТИПП, 2010. 294 с.
2. Арет В.А., Руднев С.Д. Реология и физико-механические свойства материалов пищевой промышленности: учебное пособие. СПб.: Интермедия, 2014. 252 с.
3. Закономерности термодинамики поверхностных явлений в трехфазных системах [Электронный ресурс]. URL: <https://portal.tpu.ru/SHARED/v/VORONOVA/process/Tab/lec6.pdf>.
4. Природа поверхностной энергии. Поверхностное натяжение [Электронный ресурс]. URL: <https://farmf.ru/lekci/priroda-poverhnostnoj-energii-poverhnostnoe-natyazhenie/>.
5. Технологические особенности и теоретическое обоснование применения активированной воды в производстве мучных изделий / С.Д. Руднев [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. № 4. С. 12–21.
6. Об изменении свойств механоактивированных водных дисперсных систем / С.Д. Руднев [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 7 (109), ч. 1. С. 96–101.
7. Мелихов И.В. Физико-химическая эволюция твердого вещества. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2009. 309 с.
8. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2007. 416 с.
9. Quercia G., Hüskén G., Brouwers H.J.H. Water demand of amorphous nano silica and its impact on the workability of cement paste. Cement and Concrete Research. 2012; 42.
10. Stuzman P. Chemistry and structure of hydration products. Cement Research Progress. 1999; 2.

REFERENCES:

1. Rudnev S.D. Selective disintegration of plant raw materials: a monograph. Kemerovo: KemTIPP, 2010. 294 p. (In Russ.)

2. Aret V.A., Rudnev S.D. Rheology and physical and mechanical properties of food industry materials: a tutorial. St. Petersburg: Intermedia, 2014. 252 p. (In Russ.)
3. Regularities of thermodynamics of surface phenomena in three-phase systems [Electronic resource]. URL: <https://portal.tpu.ru/SHARED/v/VORONOVA/process/Tab/lec6.pdf> (In Russ.)
4. Nature of surface energy. Surface tension [Electronic resource]. URL: <https://farmf.ru/lekicii/priroda-poverhnostnoj-energii-poverhnostnoe-natyazhenie/> (In Russ.)
5. Technological features and theoretical justification for the use of activated water in the production of flour products / S. D. Rudnev [et al.] // Technique and technology of food production. 2021. No. 4. P. 12–21. (In Russ.)
6. On the change in the properties of mechanically activated aqueous disperse systems / S.D. Rudnev [et al.] // International Research Journal. 2021. No. 7 (109), part 1. P. 96–101. (In Russ.)
7. Melikhov I.V. Physico-chemical evolution of a solid. M.: BINOM, Laboratory of Knowledge, 2009. 309 p. (In Russ.)
8. Gusev A.I. Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies. M.: Fizmatlit, 2007. 416 p. (In Russ.)
9. Quercia G., Husken G., Brouwers H.J.H. Water demand of amorphous nano silica and its impact on the workability of cement paste. Cement and Concrete Research. 2012; 42.
10. Stuzman P. Chemistry and structure of hydration products. Cement Research Progress. 1999; 2.

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Дмитриевич Руднев, д.т.н., профессор, профессор кафедры мехатроники и автоматизации технологических систем

sdrudnev@yandex.ru

Александра Игоревна Крикун, к.т.н., доцент кафедры технологических машин и оборудования
aleksa13@list.ru

Вероника Вячеславовна Феоктистова, аспирантка кафедры мехатроники и автоматизации технологических систем
feonika13@mail.ru

Виктор Владимирович Иванов, соискатель степени к.т.н. по научной специальности 4.3.3 Пищевые системы, преподаватель-исследователь
v-ivanow2013@yandex.ru

Максим Викторович Суменков, студент магистратуры направления подготовки "Технологические машины и оборудование"
sumen-kov@avtодук.ru

Sergey Dm. Rudnev, Doctor of Technical Sciences, a professor, a professor of the Department of Mechatronics and Automation of Technological Systems

sdrudnev@yandex.ru

Alexandra I. Krikun, Candidate of Technical Sciences, an associate professor of the Department of Technological Machines and Equipment
aleksa13@list.ru

Veronika V. Feoktistova, a post-graduate student of the Department of Mechatronics and Automation of Technological Systems
feonika13@mail.ru

Victor V. Ivanov, an applicant for the degree of Candidate of Technical sciences in the field of 4.3.3 Food systems, a research instructor

v-ivanow2013@yandex.ru

Maxim V. Sumenkov, a Master student in the field of "Technological machines and equipment"
sumen-kov@avtодук.ru