

Формование хлебопекарных дрожжей: исследование реологических характеристик и кинетика процесса

Сергей В. Лавров

1

ya-serglavrov@ya.ru

ID 0000-0002-7031-7738

Александр С. Белозерцев

1

alex_bel77@mail.ru

ID 0000-0002-7391-0254

1 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В работе представлено исследование процесса формования хлебопекарных дрожжей на промышленном автомате. Изучены реологические свойства прессованных дрожжей и кинетика их формования. Установлено, что дрожжи относятся к вязким неньютоновским материалам. Их эффективная вязкость значительно снижается с повышением влажности и температуры продукта, а также с ростом скорости сдвига. Полученные зависимости аппроксимированы степенной функцией. Анализ кинетики процесса выявил характерное распределение давления по рабочим зонам автомата: от атмосферного в зоне загрузки до максимального в зоне прессования с последующим снижением. Повышение начальной температуры дрожжей приводит к увеличению давления в системе из-за роста вязкого трения. Температура продукта возрастает по ходу формования, достигая максимума в конечных зонах вследствие перехода механической энергии в теплоту, при этом система не возвращается к исходному температурному состоянию. Основной вывод заключается в том, что для обеспечения стабильного качества дрожжей и снижения энергозатрат необходимо организовать отвод тепла непосредственно в процессе формования, например, путем охлаждения рабочей камеры. Полученные результаты реологических характеристик и кинетики процесса представляют практическую ценность для оптимизации режимов работы, проектирования формовочного оборудования и разработки систем автоматизации данного технологического этапа.

Ключевые слова: хлебопекарные дрожжи, формование, реологические свойства, эффективная вязкость, неньютоновская жидкость, кинетика процесса, формовочный автомат, температура, давление.

Molding of baker's yeast: study of rheological characteristics and process kinetics.

Sergey V. Lavrov

1

ya-serglavrov@ya.ru

ID 0000-0002-7031-7738

Alexandr S. Belozertsev

1

alex_bel77@mail.ru

ID 0000-0002-7391-0254

1 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. This paper presents a study of the molding process of baker's yeast on an industrial molding machine. The rheological properties of pressed yeast and the kinetics of their molding were investigated. It was established that yeast belongs to viscous non-Newtonian materials. Its effective viscosity significantly decreases with an increase in product moisture and temperature, as well as with an increase in shear rate. The obtained dependencies were approximated by a power function. The analysis of the process kinetics revealed a characteristic pressure distribution across the machine's working zones: from atmospheric in the loading zone to a maximum in the pressing zone, followed by a decrease. An increase in the initial yeast temperature leads to an increase in system pressure due to increased viscous friction. The product temperature increases during the molding process, reaching a maximum in the final zones due to the conversion of mechanical energy into heat, while the system does not return to its initial temperature state. The main conclusion is that to ensure stable yeast quality and reduce energy costs, it is necessary to organize heat removal directly during the molding process, for example, by cooling the working chamber. The obtained results on rheological characteristics and process kinetics are of practical value for optimizing operating modes, designing molding equipment, and developing automation systems for this technological stage.

Keywords: baker's yeast, molding, rheological properties, effective viscosity, non-Newtonian fluid, process kinetics, molding machine, temperature, pressure.

Введение

Процесс формования прессованных хлебопекарных дрожжей является ключевой операцией, определяющей потребительские свойства готового продукта [1–5]. Качество формования напрямую зависит от реологического состояния дрожжевой массы и параметров работы оборудования. Однако управление этим процессом часто осуществляется эмпирически, без полного учета взаимосвязи между свойствами сырья, режимами экструзии и характеристиками конечного продукта [6–10].

Для цитирования

Лавров С.В., Белозерцев А.С. Формование хлебопекарных дрожжей: исследование реологических характеристик и кинетика процесса // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 80–85. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-80-85

© 2025, Лавров С.В. и др. / Lavrov S.V. et al.

Цель работы – комплексное экспериментальное исследование реологических характеристик прессованных дрожжей и кинетики процесса их формования на промышленном автомате. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: изучение зависимости эффективной вязкости дрожжей от влажности, температуры и скорости сдвига; анализ распределения давления и температуры по длине рабочей камеры формующего автомата; качественное описание механизма течения материала в различных зонах. Объектом исследования служили прессованные хлебопекарные дрожжи.

For citation

Lavrov S.V., Belozertsev A.S. Molding of baker's yeast: study of rheological characteristics and process kinetics.. Vestnik VGUIt [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 80–85. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-80-85

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

Материалы и методы

Исследование процесса формования дрожжей проводилось на установке, включающей промышленный формовочный автомат фирмы Bouwpraco BPEX 4500 (рисунок 1), оснащенный приборами контроля параметров.

Установка включает привод 1, щит управления 2, приемный бункер 3, ворошилели 4, шнек 5, формующий канал 6, калибровочный мундштук 7 и раму 8. В состав установки входит контрольно-измерительная аппаратура для измерения температуры обработки и давления.

Привод автомата состоит из электродвигателя мощностью 22 кВт и редуктора.

Основным рабочим органом автомата является шнек. Общая длина шнека составляет 1500 мм, диаметр цилиндрической части – 270 мм, глубина витков изменяется от 100 до 50 мм, а шаг шнека – от 180 мм в зоне загрузки до 120 мм в зоне формования. Скорость формования составляла 0,116 м/с.

В верхней и нижней частях рабочей камеры автомата выполнены отверстия соответственно под спай термопар прибора ОВЕН 2 ТРМО и датчик давления КРТ-СТ-25-0,5-12.

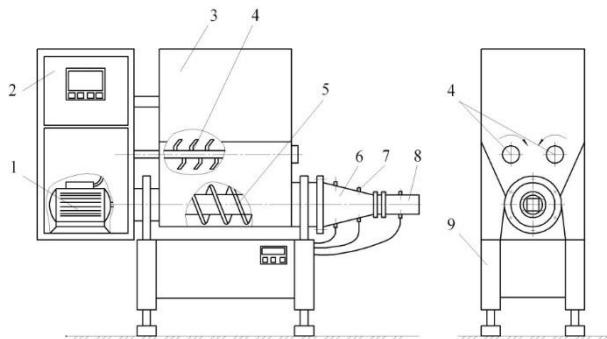


Рисунок 1. Формовочный автомат фирмы Bouwpraco BPEX4500: 1 – привод; 2 – щит управления; 3 – приемный бункер; 4 – ворошилели; 5 – шнек; 6 – формующий канал; 7 – датчик давления; 8 – мундштук, 9 – рама

Figure 1. Bouwpraco BPEX4500 molding machine: 1-drive; 2 – control panel; 3 – receiving hopper; 4 – feeders; 5 – auger; 6 – forming channel; 7 – pressure sensor; 8 – mouthpiece, 9 – frame

Дрожжи после вакуум-фильтра, установленного на втором этаже, непрерывным потоком по желобу поступали в приемный бункер автомата и последовательно перемещались шнеком через зоны: I – загрузки формуемой массы, II – прессования, III – формования, IV – калибровки (рисунок 2).

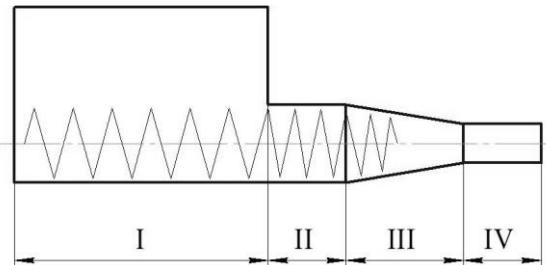


Рисунок 2. Рабочие зоны формовочного автомата: I – зона загрузки формуемой массы; II – зона прессования; III – зона формования; IV – зона калибровки

Figure 2. Working zones of the molding machine: I – loading zone of the molded mass; II – pressing zone; III – molding zone; IV – calibration zone

Количество энергии, затрачиваемой на прессование, формование и на работу привода рассчитывалась по формуле $E = UI$, где U , I – напряжение, Вт и сила тока, А.

Показания U и I снимались со щита управления. Поскольку автомат работал в стационарном режиме, количество энергии не зависело от времени, то есть $dE / d\Delta t = 0$. По данным многократных замеров количество энергии $E = 7,22 \dots 12,2$ кВт.

Измерение производительности формовочного автомата выполнялось весовым методом и составило 2000 т/ч по прессованным дрожжам с влажностью 68%. Отсчет времени при этом проводился с использованием секундомера 16 кл. 2.

С целью проверки воспроизводимости полученных результатов часть опытов проводилась в трехкратной повторности.

Полученные таким образом экспериментальные данные позволяют достаточно полно судить о процессах, происходящих при формировании дрожжей в автомате.

Результаты

Исследование реологических характеристик хлебопекарных дрожжей. Определяющее влияние на протекание процесса формования и качество продукта оказывают реологические свойства, зависящие, в свою очередь, от влажности продукта, температурного режима процесса, а также давления в формующем узле.

Результаты изучения реологических свойств дрожжей необходимы при построении математической модели процесса формования, позволяющей прогнозировать поведение материала в формующем узле установки, а также при создании формующих машин, регулировании основных параметров процесса формования и разработке средств автоматизации.

Реологические исследования различных авторов, позволяют отнести прессованные дрожжи к вязким неньютоновским материалам, поскольку они после снятия нагрузки не восстанавливают первоначальную форму, то есть имеет место необратимая деформация.

Наиболее важным реологическим параметром, определяющим состояние дрожжей, является вязкость (внутреннее трение) – мера сопротивления течению.

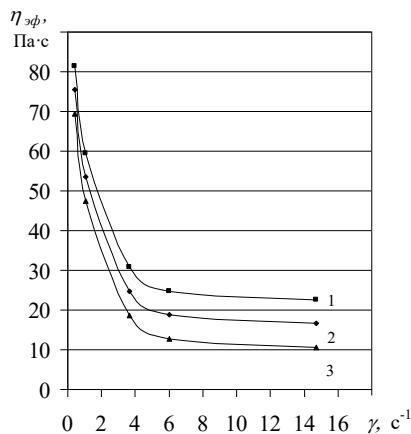


Рисунок 3. Зависимость эффективной вязкости дрожжей η_{eff} от скорости сдвига γ при различной влажности $W, \%$: 1 – 68; 2 – 70; 3 – 72. $t = 10^{\circ}\text{C}$

Figure 3. Dependence of the effective viscosity of yeast η_{eff} on the shear rate γ at different moisture $W, \%$: 1 – 68; 2 – 70; 3 – 72. $t = 10^{\circ}\text{C}$

Кривые, построенные по экспериментальным данным, имеют одинаковый вид для всех влажностей (рисунок 3) и температур (рисунок 4). Как видно, с повышением влажности и температуры вязкость падает. С увеличением скорости сдвига (при небольших значениях) вязкость резко снижается, затем отмечается плавный переход в область плотной однородной структуры. Так, при скорости сдвига $\gamma = 2 \text{ c}^{-1}$ и $W = 68\%$ (рисунок 3) эффективная вязкость составила $46 \text{ Па}\times\text{с}$, а при $\gamma = 6 \text{ c}^{-1}$ – $25 \text{ Па}\times\text{с}$. Аналогичная зависимость прослеживается и при разных температурах. Например, при $\gamma = 2 \text{ c}^{-1}$ и $t = 10^{\circ}\text{C}$ (рисунок 4) эффективная вязкость составила $40 \text{ Па}\times\text{с}$, а при $\gamma = 12 \text{ c}^{-1}$ она равнялась $16 \text{ Па}\times\text{с}$.

Опытные данные аппроксимируются степенной зависимостью

$$y = a + bx + cx^2 + dx^{2,5} + ex^3.$$

Значения постоянных a, b, c, d, e сведены в таблицу 1

Исследования проводились на ротационном вискозиметре РВ-8. Принцип определения вязкости основан на измерении скорости вращения внутреннего цилиндра (при неподвижном внешнем) в прессованных дрожжах под действием определенного груза.

Влажность дрожжей изменялась от 68 до 72%, их температура – от 2 до 18°C .

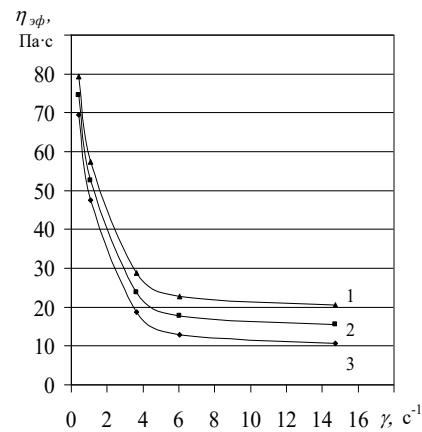


Рисунок 4. Зависимость эффективной вязкости дрожжей η_{eff} от скорости сдвига γ при различной температуре $t, ^{\circ}\text{C}$: 1 – 2; 2 – 10; 3 – 18. $W = 70\%$

Figure 4. The dependence of the effective viscosity of yeast η_{eff} on the shear rate γ at different temperatures $t, ^{\circ}\text{C}$: 1 – 2; 2 – 10; 3 – 18. $W = 70\%$

Таблица 1.

Значения постоянных a, b, c, d, e при различной влажности и температуре дрожжей

Table 1.

Values of constants a, b, c, d, e at different humidity and temperature of yeast

Влажность, % Moisture (%)	a	b	c	d	e
68	82.178	-34.380	10.246	-3.430	0.334
70	88.617	-33.229	9.337	-3.036	0.287
72	93.510	-29.452	7.370	-2.241	0.197
Температура, °C Temperature (°C)	a	b	c	d	e
2	92.341	-31.321	8.061	-2.474	0.219
10	87.801	-33.715	9.751	-3.217	0.308
18	82.178	-34.380	10.246	-3.430	0.334

Кинетика процесса формования дрожжей. Важными параметрами процесса являются давление и температура дрожжей в рабочей камере установки. Знание этих параметров необходимо для получения продукта высокого качества, управления технологическим процессом, расчета формующего оборудования и их рабочих элементов.

В результате выполненных экспериментов были построены кривые изменения давления на дрожжи по длине рабочей камеры при различных температурах (рисунок 5).

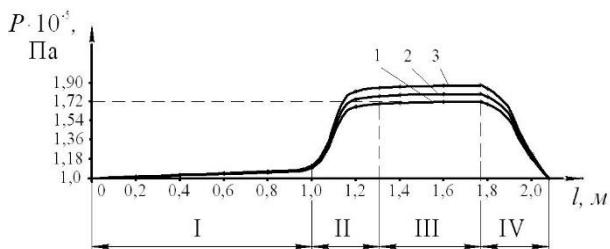


Рисунок 5. Изменение давления p по длине рабочей камеры при различных температурах t_h : 1 – 5 °C, 2 – 10 °C, 3 – 15 °C

Figure 5. The change in pressure along the length of the working chamber at various temperatures: 1 – 5 °C, 2 – 10 °C, 3 – 15 °C

Как видно из рисунка 5, например, при температуре дрожжей $t_h = 5$ °C в зоне загрузки I давление практически остается постоянным и равным атмосферному $p_0 = 10^5$ Па; в зоне прессования II оно существенно возрастает и достигает максимального значения $p_{np} = 1,7 \cdot 10^5$ Па. В зоне формования давление продолжает незначительно возрастать до $p_f = 1,72 \cdot 10^5$ Па, после чего снижается. С повышением температуры дрожжей от 5 до 15 °C давление возрастает из-за увеличения вязкого трения массы о стенки камеры.

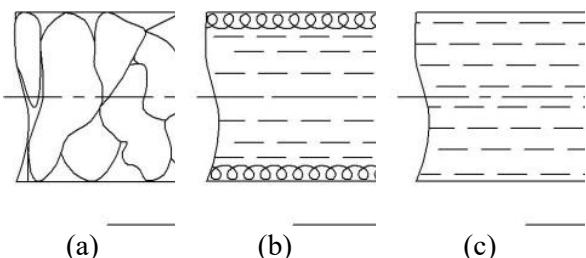


Рисунок 6. Схема перемещения дрожжей в рабочей камере: (а) – зона загрузки; (б) – зона прессования и формования; (с) – зона калибровки

Figure 6. Scheme of yeast movement in the working chamber: (a) – loading zone; (b) – zone of pressing and molding; (c) – calibration zone

Качественная оценка процесса вязко-пластического формования дрожжей такова. Перемещение дрожжей в начальный момент загрузки протекает с незначительной деформацией при произвольном расположении пластов вследствие того, что давление в камере равно практически атмосферному давлению. По мере перемещения дрожжей к зоне прессования II давление постепенно повышается (рисунок 6, а).

В зонах прессования II и формования III давление повышается из-за изменения геометрии шнека, имеет место ламинарное течение (сдвиг) спрессованной массы со скольжением материала по внутренней стенке цилиндра рабочей камеры под действием сил трения. Происходит частичная перестройка периферийных слоев (рисунок 6, б). В конце зоны формования вследствие снижения давления трение периферийных слоев материала о стенки рабочей камеры также снижается. В зоне калибровки имеет место чистый сдвиг жгута, а давление выравнивается до атмосферного (рисунок 6, в). Изменение температуры дрожжей по длине рабочей камеры приведено на рисунок 7. Как видно, температура начинает повышаться в зоне прессования и достигает максимального значения в зонах формования и калибровки. Это объясняется переходом части механической энергии в теплоту, то есть диссипацией.

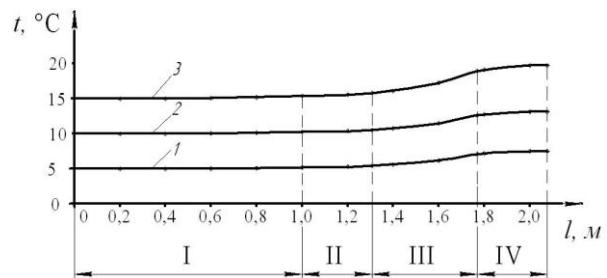


Рисунок 7. Изменение температуры дрожжей по длине рабочей камеры при различных температурах t_h : 1 – 5 °C, 2 – 10 °C, 3 – 15 °C

Figure 7. Variation of yeast temperature along the length of the working chamber at different temperatures t_h : 1 – 5 °C, 2 – 10 °C, 3 – 15 °C

Казалось бы, что температура должна снижаться в конце процесса формования (по аналогии с уменьшением давления, рисунок 5). Однако в состояние температурного равновесия система не возвращается, то есть материал по завершении процесса не релаксирует, поскольку не охлаждается до стартовой температуры. Это объясняется следующим: нагревание дрожжей происходит под действием давления, а теплоотдача от наружной стенки рабочей камеры к окружающей среде затруднена вследствие того, что температура последней, как правило, превышает температуру дрожжей. В летний период теплопритоки увеличиваются, что отрицательно сказывается на качестве дрожжей и повышает энергозатраты на их охлаждение в холодильной камере. Напрашивается вывод о необходимости охлаждения дрожжей в процессе их перемещения с помощью, например, холода воды.

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы. Прессованные хлебопекарные дрожжи проявляют свойства вязкого неиньютоновского материала, и их эффективная вязкость существенно снижается с повышением влажности, температуры и скорости сдвига, что подтверждается полученными зависимостями. Кинетика процесса формования характеризуется значительным ростом давления в зоне прессования и последующим его спадом, причем повышение начальной температуры дрожжей ведет к увеличению рабочего давления в системе. Установлено, что в процессе формования происходит монотонный рост температуры продукта вследствие диссипации механической энергии, и система не возвращается в исходное температурное состояние.

Основной практический вывод работы заключается в необходимости организации активного отвода тепла непосредственно в процессе формования для стабилизации качества дрожжей и снижения энергетических затрат на их последующее охлаждение. Наиболее целесообразным решением является внедрение системы охлаждения рабочей камеры. Полученные экспериментальные данные о реологических свойствах и кинетических закономерностях процесса представляют собой научную основу для оптимизации режимов работы, совершенствования конструкции формующего оборудования и разработки систем автоматического управления технологическим процессом формования дрожжей.

Литература

- 1 Shahryari S., Azizi M.H., Ghavidel R.A. et al. Application of sprouted soybean sourdough to improve textural features, mold-free shelf-life, aroma and amino acid profiles of the supplemented wheat bread // Applied Food Research. 2025. V. 5. P. 101540.
- 2 Moulaei S., Shahidi F., Varidi M. et al. Effect of magnetized water on rheological properties of wheat flour, quality characteristics of frozen dough, and subsequent bread // Journal of Food Measurement and Characterization. 2025. V. 19. P. 1–14.
- 3 Montes L., Correa M.J., Ferrero C. Effect of polyphenols from *Ascophyllum nodosum* seaweeds on the rheology and digestion of corn starch gels and gluten-free bread features // Heliyon. 2024. V. 10. № 7. P. e28544.
- 4 She Z., Wang X., Li H. et al. Partial substitution of wheat flour with kiwi starch: Rheology, microstructure changes in dough and the quality properties of bread // Food Chemistry: X. 2024. V. 23. P. 101614.
- 5 Merijs-Meri R., Zicans J., Ivanova T. et al. Melt-Processed Polybutylene-Succinate Biocomposites with Chitosan: Development and Characterization of Rheological, Thermal, Mechanical and Antimicrobial Properties // Polymers. 2024. V. 16. № 19. P. 2808.
- 6 Nikolaou E.N., Krokida M.K., Karathanos V.T. Enrichment of bakery products with different formulations of bioactive microconstituents from black Corinthian grape: Impact on physicochemical and rheological properties in dough matrix and final product // Journal of Cereal Science. 2022. V. 108. P. 103566.
- 7 Saleh O., Hrušková M., Smejkalová E. Enhancing rheological properties of dough and quality of potato fibre-enriched bread // Czech Journal of Food Sciences. 2025. V. 43. P. 1–12.
- 8 Demarinis C., Verni M., Pinto L. et al. Effect of LAB starters on technological and functional properties of composite carob and chickpea flour plant-based gurt // Future Foods. 2024. V. 9. P. 100289.
- 9 Boltenko Ya.A., Ivanov S.S., Petrova O.V. et al. The effect of the dosage of table salt on the change of rheological properties of wheat dough // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 5 (131). С. 3–10.
- 10 Chochkov R., Taneva D., Petkova N. et al. Effects of teff-based sourdoughs on dough rheology and gluten-free bread quality // Foods. 2022. V. 11. № 7. P. 1012.
- 11 Якияева М., Истаев А., Якияева М.А. и др. Исследование реологических свойств бездрожжевого теста из пшеничной муки первого и второго сорта // Известия НАН РК. Серия химии и технологии. 2021. № 5–6. С. 99–111.
- 12 Невзоров В.Н., Петров А.С., Сидорова О.В. и др. Способ производства пшенично-ячменного зернового хлеба из шелущенного зерна // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2024. № 1 (202). С. 215–221.
- 13 Ковалева А.Е., Пьяникова Э.А., Ткачева Е.Д. Совершенствование рецептуры и технологии хлеба пшеничного с использованием яблочных выжимок // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82. № 2 (84). С. 61–66.
- 14 Зинина О.В., Хиценко А.В., Неверова О.П. и др. Разработка рецептуры хлеба, обогащенного концентратом пищевых волокон из вторичного растительного сырья // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2022. Т. 10. № 4. С. 57–67.
- 15 Al-Sharify Z.T., Al-Sharify T.A., Al-Sharify N.H. et al. Non-Thermal Technologies in Food Processing: Implications for Food Quality and Rheology // Applied Sciences. 2025. V. 15. № 6. P. 2512.
- 16 Premi M., Sharma V. Mixing and forming // Agro-Processing and Food Engineering: Operational and Application Aspects / Ed. by M. Premi, V. Sharma. Singapore: Springer Singapore, 2022. P. 253–305.
- 17 Cappelli A., Bettacini L., Cini E. The kneading process: A systematic review of the effects on dough rheology and resulting bread characteristics, including improvement strategies // Trends in Food Science & Technology. 2020. V. 104. P. 91–101.
- 18 Bykova N.Y., Chernykh V.Y. Development of a modern methodology for experimental laboratory baking of rye bread // AIP Conference Proceedings. 2022. V. 2478. № 1. P. 060002.
- 19 Qian X., Zhang Y., Li J. et al. Milling and roasting impact pasting and rheological properties of oat flours and quality of steamed oat cakes // LWT – Food Science and Technology. 2023. V. 175. P. 114477.
- 20 Dong Y.N., Karboune S. A review of bread qualities and current strategies for bread bioprotection: Flavor, sensory, rheological, and textural attributes // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2021. V. 20. № 2. P. 1937–1981.

References

- 1 Shahryari S., Azizi M.H., Ghavidel R.A. et al. Application of sprouted soybean sourdough to improve textural features, mold-free shelf-life, aroma and amino acid profiles of the supplemented wheat bread. *Applied Food Research*. 2025. vol. 5. p. 101540.
- 2 Moulaei S., Shahidi F., Varidi M. et al. Effect of magnetized water on rheological properties of wheat flour, quality characteristics of frozen dough, and subsequent bread. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2025. vol. 19. pp. 1–14.
- 3 Montes L., Correa M.J., Ferrero C. Effect of polyphenols from *Ascophyllum nodosum* seaweeds on the rheology and digestion of corn starch gels and gluten-free bread features. *Heliyon*. 2024. vol. 10. no. 7. p. e28544.
- 4 She Z., Wang X., Li H. et al. Partial substitution of wheat flour with kiwi starch: Rheology, microstructure changes in dough and the quality properties of bread. *Food Chemistry*: X. 2024. vol. 23. p. 101614.
- 5 Merijs-Meri R., Zicans J., Ivanova T. et al. Melt-Processed Polybutylene-Succinate Biocomposites with Chitosan: Development and Characterization of Rheological, Thermal, Mechanical and Antimicrobial Properties. *Polymers*. 2024. vol. 16. no. 19. p. 2808.
- 6 Nikolaou E.N., Krokida M.K., Karathanos V.T. Enrichment of bakery products with different formulations of bioactive microconstituents from black Corinthian grape: Impact on physicochemical and rheological properties in dough matrix and final product. *Journal of Cereal Science*. 2022. vol. 108. p. 103566.
- 7 Saleh O., Hrušková M., Smejkalová E. Enhancing rheological properties of dough and quality of potato fibre-enriched bread. *Czech Journal of Food Sciences*. 2025. vol. 43. pp. 1–12.
- 8 Demarinis C., Verni M., Pinto L. et al. Effect of LAB starters on technological and functional properties of composite carob and chickpea flour plant-based gurt. *Future Foods*. 2024. vol. 9. p. 100289.
- 9 Boltenko Ya.A., Ivanov S.S., Petrova O.V. et al. The effect of the dosage of table salt on the change of rheological properties of wheat dough. *International Research Journal*. 2023. no. 5 (131). pp. 3–10. (in Russian)
- 10 Chochkov R., Taneva D., Petkova N. et al. Effects of teff-based sourdoughs on dough rheology and gluten-free bread quality. *Foods*. 2022. vol. 11. no. 7. p. 1012.
- 11 Yakiyayeva M., Istayev A., Yakhiiayeva M.A. et al. Study of rheological properties of yeast-free dough from first and second grade wheat flour. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Chemistry and Technology*. 2021. no. 5-6. pp. 99–111. (in Russian)
- 12 Nevezorov V.N., Petrov A.S., Sidorova O.V. et al. Method for producing wheat-barley grain bread from husked grain. *Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University*. 2024. no. 1 (202). pp. 215–221. (in Russian)
- 13 Kovaleva A.E., Pyankova E.A., Tkacheva E.D. Improvement of the recipe and technology of wheat bread using apple pomace. *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2020. vol. 82. no. 2 (84). pp. 61–66. (in Russian)
- 14 Zinina O.V., Khitsenko A.V., Neverova O.P. et al. Development of a recipe for bread enriched with a dietary fiber concentrate from secondary plant raw materials. *Bulletin of South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*. 2022. vol. 10. no. 4. pp. 57–67. (in Russian)
- 15 Al-Sharify Z.T., Al-Sharify T.A., Al-Sharify N.H. et al. Non-Thermal Technologies in Food Processing: Implications for Food Quality and Rheology. *Applied Sciences*. 2025. vol. 15. no. 6. p. 2512.
- 16 Premi M., Sharma V. Mixing and forming. *Agro-Processing and Food Engineering: Operational and Application Aspects*. Ed. by M. Premi, V. Sharma. Singapore: Springer Singapore, 2022. pp. 253–305.
- 17 Cappelli A., Bettacini L., Cini E. The kneading process: A systematic review of the effects on dough rheology and resulting bread characteristics, including improvement strategies. *Trends in Food Science & Technology*. 2020. vol. 104. pp. 91–101.
- 18 Bykova N.Y., Chernykh V.Y. Development of a modern methodology for experimental laboratory baking of rye bread. *AIP Conference Proceedings*. 2022. vol. 2478. no. 1. p. 060002.
- 19 Qian X., Zhang Y., Li J. et al. Milling and roasting impact pasting and rheological properties of oat flours and quality of steamed oat cakes. *LWT – Food Science and Technology*. 2023. vol. 175. p. 114477.
- 20 Dong Y.N., Karboune S. A review of bread qualities and current strategies for bread bioprotection: Flavor, sensory, rheological, and textural attributes. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2021. vol. 20. no. 2. pp. 1937–1981.

Сведения об авторах

Сергей В. Лавров к.т.н., доцент, кафедра физики, теплотехники и теплоэнергетики, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ya-serglavrov@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-7031-7738>

Александр С. Белозерцев к.т.н., доцент, кафедра физики, теплотехники и теплоэнергетики, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, alex_bel77@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-7391-0254>

Вклад авторов

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Sergey V. Lavrov Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, physics, heat engineering and heat power engineering department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ya-serglavrov@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-7031-7738>

Alexandr S. Belozertsev Cand. Sci. (Engin.), physics, heat engineering and heat power engineering department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, alex_bel77@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-7391-0254>

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 03/11/2025	После редакции 20/11/2025	Принята в печать 15/12/2025
Received 03/11/2025	Accepted in revised 20/11/2025	Accepted 15/12/2025