

Особенности влияния ультразвука на микробиологическую ферментациюКанд. техн. наук **Н.А. Березина**, jrdan@yandex.ru**А.С. Комоликов**, komolikovaleksey1994@mail.ruканд. техн. наук **Т.В. Галаган**, tamaragalagan@mail.ruд-р техн. наук **Г.А. Осипова**, galina_osipova@list.ruд-р техн. наук **В.А. Гаврилина**, chemistry@ostu.ru*Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева**302026, Россия, Орел, ул. Комсомольская, 95*Канд. техн. наук **И.А. Никитин**, nikitinia@mgutm.ru*Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского**(Первый Казачий университет)**109004, Россия, Москва, ул. Земляной Вал, 73*

Определяли положительное влияние ультразвукового (УЗ) излучения на микробиологическую ферментацию на примере бродильной микрофлоры тестового полуфабриката. Установление влияния силы удара ультразвука осуществляли с помощью экспериментальных излучателей с частотой УЗ колебаний 100 ± 6 и 20 ± 2 кГц. Влияние продолжительности воздействия ударной волны производили на стадиях замеса теста, брожения и расстойки тестовых заготовок в течение 100 мин на протяжении всего технологического цикла до выпечки, в течение 60 мин при брожении, в течение 30 мин при расстойке. Ферментативные процессы, протекающие в тестовых полуфабрикатах, оценивались по накоплению дрожжевой биомассы и количеству сброженных сахаров в конце брожения. Активность ферментативных систем дрожжей оценивалась по качеству хлебобулочных изделий (булочек), в них определяли диаметр и высоту изделия; формоустойчивость оценивали как отношение высоты изделия к его диаметру; объем изделия рассчитывали, условно принимая его форму в виде конуса. Определено, что частота колебаний ультразвуковой волны 100 кГц оказывает большее отрицательное влияние на ферментативные процессы брожения в тестовых полуфабрикатах, чем 20 кГц. Разница тем значительней, чем дольше воздействие на тестовый полуфабрикат. Максимальный положительный эффект на микробиологическую ферментацию оказывает воздействие ультразвуковой волной 20 ± 2 кГц в течение 30 мин в процессе расстойки тестовых заготовок. При этом количество сброженных сахаров в полуфабрикате увеличивается на 29,4%, накопление биомассы дрожжевых клеток – в 3,6 раз, объем готового изделия – в 2,7 раза, а формоустойчивость меняется незначительно по сравнению с контрольным образцом. Вкусовые свойства булочек из тестового полуфабриката, подвергнутого ультразвуковой обработке не отличались от контрольного образца. Определено, что размещение генераторов ультразвука вблизи экспериментальных образцов способствует образованию в них больших полостей (каверн). Для обеспечения равномерной микробиологической ферментации оборудование для ультразвуковой обработки должно охватывать и равномерно обрабатывать всю поверхность тестовой заготовки.

Ключевые слова: хлебопекарное производство; влияние ультразвука; микробиологическая ферментация; подготовка теста; хлебобулочные изделия.

DOI: 10.17586/2310-1164-2018-11-3-35-41

The effect of ultrasound on microbiological fermentationPh. D. **Natalya A. Berezina**, jrdan@yandex.ru**Aleksey S. Komolikov**, komolikovaleksey1994@mail.ruPh. D. **Tamara V. Galagan**, tamaragalagan@mail.ruD. Sc. **Galina A. Osipova**, galina_osipova@list.ruD. Sc. **Vera A. Gavrilina**, chemistry@ostu.ru*Orel State University named after I.S. Turgenev**95, Komsomolskaya str., Orel, 302026, Russia*Ph. D. **Igor A. Nikitin**, nikitinia@mgutm.ru*Moscow State University of technologies and management named after K.G. Razumovsky**(the First Cossack University)**73, Zemlyanoy Val str., Moscow, 109004, Russia*

The positive effect of ultrasonic radiation on microbiological fermentation was determined by the example of the fermentation microflora of a semi-finished product. The influence of the impact force of ultrasound was determined using experimental emitters with a frequency of ultrasonic vibrations of 100 ± 6 kHz and 20 ± 2 kHz. The impact of the shock wave impact duration was analyzed at the stages of kneading dough, fermentation, and proofing dough pieces for 100 minutes throughout the technological cycle before baking, for 60 minutes during fermentation, for 30 minutes during proofing. The enzymatic processes occurring in the test semi-finished products were evaluated by the accumulation of yeast biomass and the amount of fermented sugars at the end of fermentation. The activity of yeast enzymatic systems was evaluated by the quality of bakery products (buns): the diameter and height of the product was determined, the shape of the products was evaluated as the ratio of the height of the product to its diameter, the volume of the product was calculated adopting its form is a cone. It was determined that the oscillation frequency of an ultrasonic wave of 100 kHz has a greater negative effect on the enzymatic fermentation processes in the semi-finished products tested than the oscillation frequency of 20 kHz. The difference is the greater, the longer the effect on the semi-finished product tested. The maximum positive effect of the ultrasonic wave on the microbiological fermentation is made by an ultrasonic wave of 20 ± 2 kHz for 30 minutes during the proofing of the dough tested. At the same time, the amount of fermented sugars in the semi-finished product increases by 29.4%, the accumulation of the bio-mass of yeast cells by 3.6 times, the volume of the finished product by 2.7 times, and dimensional stability varies slightly compared to the control sample. The taste properties of the buns from the tested semi-finished product subjected to ultrasonic treatment did not differ from the control sample. It is determined that the placement of ultrasound generators close to the experimental samples contributes to the formation of large cavities in them. To ensure uniform microbiological fermentation, the equipment for ultrasonic processing must cover and process the entire surface of the dough piece uniformly.

Keywords: bakery production; influence of ultrasound; microbiological fermentation; dough preparation; bakery products.

Введение

В различных отраслях промышленности ультразвуковые излучатели используют для биоризации, обеззараживания и консервирования. Наиболее распространенные электроакустические преобразователи линейны, то есть удовлетворяют требованию неискаженной передачи сигнала, и обратимы, то есть могут работать как излучатель, и как приемник, подчиняясь принципу взаимности [1].

В линейных преобразователях излучение ультразвука происходит параллельно друг другу. Главным их недостатком является неравномерное распределение ультразвуковых волн по всей поверхности обрабатываемого сырья или материала [2].

Излучатели УЗ могут быть выполнены в виде различных датчиков, которые в дальнейшем прикрепляются на некоторое время (либо располагаются рядом) или полностью внедряются в необходимое оборудование.

Исследования влияния УЗ колебаний на ферментативные процессы в промышленности показали, что качество конечного продукта изменяется и чаще в лучшую сторону [3–5]. Такое улучшение можно особо наблюдать в бродильных отраслях.

Управление бродильными процессами под действием ферментных систем микроорганизмов являются крайне непростым и трудоемким. Непредсказуемость его требует особого внимания. При формировании конечного продукта протекание ферментативного гидролиза может происходить неодинаково. Ввиду этого, необходимо осуществлять контроль микробиологического синтеза на каждой технологической стадии [6, 7].

Для этого немаловажно обладать знаниями и опытом, чтобы на каждой технологической стадии микробиологических производств вовремя определить интенсивность протекания ферментативного гидролиза и при надобности принять решение по внесению корректировок в процесс для получения качественного конечного продукта.

Несмотря на все эти трудности, бродильные производства все время совершенствуются. Появляются новые рецепты [8], изменяются технологические режимы, внедряется современное оборудование. К одному из таких внедрений можно, отнести ультразвуковую обработку теста с целью воздействия на процессы микробиологической ферментации при производстве хлеба.

При замесе теста образуется гомогенная во всей массе смесь пропорциональная объему муки, воды, дрожжей и других компонентов рецептуры. Происходит набухание компонентов муки – белков,

крахмала, клетчатки их диспергирование, агрегация. Также происходит трансформация высокомолекулярных полимеров – белков и формирование клейковинного каркаса, связывающего крахмальные зерна. При этом они частично измельчаются и обволакиваются белковыми пленками. При замесе в тесте образуется газообразная фаза. Это явление возникает вследствие захвата и удержания тестом (окклюзии) пузырьков воздуха и газовыделения бродильной микрофлорой теста. Доказано, что объем газа в тесте во время замеса увеличивается. В тесте, при обычной продолжительности замеса, газообразная фаза доходит до 10% от общего объема теста, а при увеличении продолжительности замеса, объем газовой фазы иногда возрастает до 20%. Воздух попадает в тесто вместе с мукой и в небольших количествах – с водой [9].

Применение ультразвуковых колебаний при приготовлении теста может оказывать сдавливающее влияние на газообразную фазу и сырьевые компоненты, что приведет к равномерному распределению компонентов и дополнительному измельчающему эффекту крахмальных полисахаридов муки. Это положительно повлияет на его амилолиз с образованием сбраживаемых сахаров, что повысит активность ферментных систем бродильной микрофлоры [10] и позволит улучшить качество полуфабриката на стадии брожения теста и расстойки тестовых заготовок. Бродильная энергия за счет активации ферментных процессов хлебопекарных дрожжей возрастает примерно на 15%, если обрабатывать их ультразвуком всего один час. При этом в дрожжах наблюдается возрастание содержания эргостерина (провитамина D₂), имеющегося в данном сырье [11]. Кроме того, увеличение степени поврежденности крахмала может быть причиной торможения его ретроградации при хранении хлеба, что окажет положительный эффект на увеличение сроков хранения.

Ультразвук положительно влияет на такие процессы, как экстрагирование и эмульгирование [12, 13], что предположительно будет способствовать лучшему распределению жирового компонента рецептуры, оказывая влияние на качество теста за счет создания глиодин-гликолипид-глутениновых комплексов [14].

При условии осуществления технологических операций под ультразвуковым излучением, остается предположить, что влияние ультразвука на качественные показатели хлеба окажет воздействие на размер пузырьков газообразной фазы и сырьевых компонентов – они станут меньше и расположатся в тесте равномернее. Диспергирование твердой фазы теста улучшит газообразующую способность теста. Компоненты теста распределятся равномерно, что улучшит структурно-механические свойства теста и положительно повлияет на качество конечного продукта.

Цель исследования – определить влияние силы и продолжительности воздействия ультразвуковой волны на микробиологическую ферментацию в тестовом полуфабрикате в процессе замеса, брожения и расстойки.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись тесто и хлебобулочные изделия, приготовленные из муки пшеничной хлебопекарной высшего сорта, дрожжей хлебопекарных пресованных, маргарина столового, соли поваренной пищевой, сахара и воды в соответствии с рецептурой и технологией булочки столичной, массой 0,1 кг по ГОСТ 27844-88 «Изделия булочные. Технические условия» [15].

Для установления влияния силы удара, времени воздействия ударной волны были собраны два излучателя УЗ с частотой колебаний 100 ± 6 и 20 ± 2 кГц. Принцип их работы заключается в следующем: прикрепленный к корпусу генератор (пьезокерамический элемент) при прохождении электрического тока начинает излучать ультразвуковые волны, которые направляются на обрабатываемый материал (тесто и тестовые заготовки). Излучение ультразвука происходит линейно, т.е. лучи распространяются параллельно друг другу. Человеческое ухо его не слышит, поэтому работа не может спровоцировать ощущение дискомфорта. Такой излучатель представлен на рисунке.

При проведении экспериментальных исследований ультразвуковые излучатели прикрепляли к оборудованию для замеса теста, брожения и расстойки тестовых заготовок.

Для установления влияния воздействия ультразвука на ферментные системы бродильной микрофлоры теста, в нем определяли накопление биомассы дрожжевой микрофлоры в конце расстойки путем микроскопирования и расчета с помощью микробиологической камеры после предварительного разведения навески полуфабриката с водой в соотношении 1:1000. Активность ферментных систем изучали путем определения содержания восстанавливающих сахаров в полуфабрикате в начале и конце

брожения по методу Бертрана [15], основанному на способности альдегидной группы сахаров восстанавливать окись меди до закиси меди в щелочных растворах, выпадающей в виде осадка красного цвета.

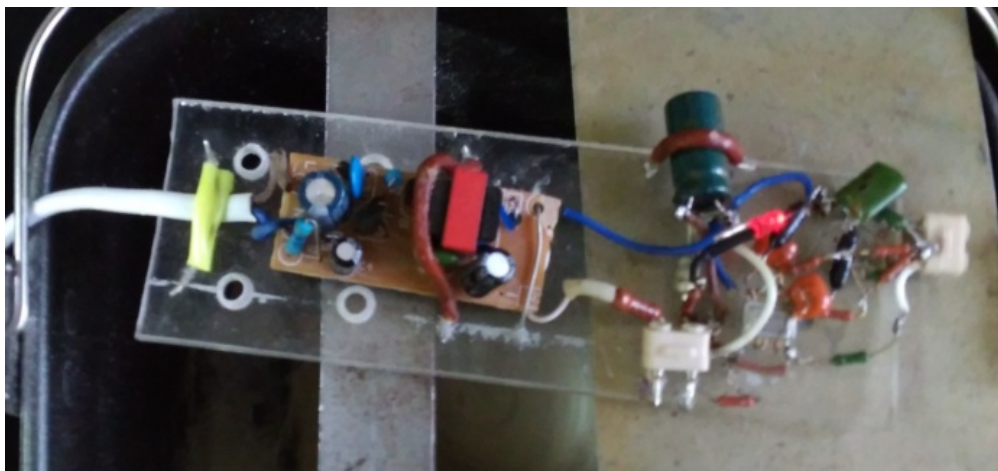


Рисунок – Экспериментальный ультразвуковой излучатель
Fig. – Experimental ultrasonic transducer

Показателем активности ферментных систем теста является качество конечного продукта. В готовых хлебобулочных изделиях (булочках) определяли диаметр и высоту изделия, формоустойчивость оценивали как отношение высоты изделия к его диаметру [16]. Объем изделия, рассчитывали, условно принимая его форму в виде конуса, по формуле

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4h},$$

где d – диаметр булочки, мм;

h – высота булочки, мм.

При проведении эксперимента обработку воздействия на ферментные системы тестового полуфабриката осуществляли тремя способами. Первый заключался в обработке УЗ в течение 100 мин на протяжении всего технологического цикла до выпечки: 10 мин при замесе, 60 мин при брожении и 30 мин при расстойке; второй способ – в течение 60 мин при брожении; третий способ в течение 30 мин при расстойке. Контрольный образец обработке ультразвуком не подвергался.

Результаты и их обсуждение

Ультразвуковые волны имеют большую механическую силу и служат источником различных процессов.

В тесте содержится немало ферментов, которые определяют его качество до и после выпечки. Несомненно, ультразвук влияет на живые ферментные системы [17]. Результаты исследований влияния ультразвукового излучения на ферментную систему дрожжей теста представлены в таблице 1.

Данные исследований показывают, что ферментные системы теста подвержены влиянию ультразвукового воздействия, глубина которого зависит как от продолжительности обработки, так и от частоты колебания ультразвуковой волны.

Увеличение продолжительности воздействия оказывает отрицательное влияние на ферментные системы теста. Так в способе 1 (продолжительность воздействия 100 мин) и способе 2 (60 мин) было определено большее количество сахаров, сброженных микрофлорой, и меньшее количество дрожжевых клеток, чем при минимальном воздействии в способе 3 (30 мин). Воздействие на ферментные системы теста в течение 30 мин позволило увеличить в нем количество дрожжевой биомассы в 3,3–3,6 раза при одновременном увеличении количества сброженных сахаров – в 1,3 раза по сравнению с контрольным образцом.

Таблица 1 – Влияние силы и продолжительности воздействия УЗ волны в процессе замеса, брожения и расстойки полуфабриката на продукты гидролиза ферментных систем и накопление дрожжевой биомассы
 Table 1 – The influence of the force and time of ultrasound wave impact at the stage of kneading, fermentation, and proofing semi-finished product on the products of enzyme hydrolysis and yeast biomass accumulation

Способы	Продолжительность воздействия УЗ волной, мин	Частота УЗ колебаний, кГц	Содержание восстанавливающих сахаров в начале брожения, %	Содержание восстанавливающих сахаров в конце брожения, %	Количество дрожжевых клеток, 10 ⁴ в 1 г теста, шт
Контроль	–	–	2,4 ± 0,1	1,7 ± 0,1	1,2 ± 0,05
Способ 1	100	20	2,3 ± 0,1	1,4 ± 0,1	3,2 ± 0,05
		100	2,4 ± 0,1	1,7 ± 0,1	2,7 ± 0,05
Способ 2	60	20	2,3 ± 0,1	1,4 ± 0,1	4,0 ± 0,05
		100	2,3 ± 0,1	1,6 ± 0,1	1,9 ± 0,05
Способ 3	30	20	2,3 ± 0,1	1,2 ± 0,1	4,3 ± 0,05
		100	2,2 ± 0,1	1,3 ± 0,1	4,0 ± 0,05

При сравнении влияния частоты ультразвуковых колебаний можно отметить, что частота колебаний УЗ волны 100 кГц оказывает большее отрицательное влияние на бродильную микрофлору, чем частота колебаний 20 кГц. Разница тем значительней, чем дольше воздействие на тестовый полуфабрикат. Таким образом, максимальный положительный эффект влияния ультразвуковой волны на тестовый полуфабрикат оказывает воздействие в течение 30 мин в процессе расстойки тестовых заготовок ультразвуковой волной 20 кГц. При этом количество сахаров в полуфабрикате увеличивается на 29,4%, дрожжевой биомассы – в 3,6 раза по сравнению с контрольным образцом.

Экспериментальные данные влияния ультразвукового излучения на качество выпеченного хлеба (булочки столичной) представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Влияние силы и продолжительности воздействия УЗ волны на качество конечного продукта
 Table 2 – The influence of the force and time of ultrasound wave impact on the finished product quality

Способы	Продолжительность воздействия УЗ волной, мин	Частота УЗ колебаний, кГц	Диаметр булочки, d, мм	Высота булочки, h, мм	Формоустойчивость булочки	Объем булочки, см ³
Контроль	–	–	67 ± 0,5	44 ± 0,5	0,6	51,7
Способ 1	100	20	77 ± 0,5	53 ± 0,5	0,7	82,3
		100	69 ± 0,5	49 ± 0,5	0,7	61,1
Способ 2	60	20	82 ± 0,5	61 ± 0,5	0,7	107,3
		100	69 ± 0,5	46 ± 0,5	0,7	57,4
Способ 3	30	20	90 ± 0,5	68 ± 0,5	0,7	144,2
		100	71 ± 0,5	49 ± 0,5	0,7	93,7

Проведенные исследования показывают, что формоустойчивость опытных образцов булочек незначительно отличалась от контрольного образца. Значительные различия были в объеме булочек. Увеличение времени воздействия и частоты ультразвука влияет на объем булочек отрицательно. Однако все опытные образцы были больше по объему, чем контрольный образец. Самый большой объем имели образцы булочек из тестового полуфабриката, подвергнутого воздействию в течение 30 мин в процессе расстойки тестовых заготовок ультразвуковой волной 20 кГц. При этом объем булочки в 2,7 раза выше, чем у контрольного образца.

Вкусовые свойства булочек из тестового полуфабриката подвергнутого ультразвуковой обработке не отличались от контрольного образца. Следует также отметить наличие больших полостей (каверн) у экспериментальных образцов, находившихся вблизи генераторов ультразвука. Чтобы убедиться в полученном результате были размещены два излучателя ультразвука с разных краев изделия и в готовом изделии получили каверны с двух сторон.

Заключение

Воздействие ультразвуковой волны на ферментные системы хлебопекарного теста изменяет качество конечного продукта. Это изменение зависит от продолжительности воздействия и частоты ультразвука. Чем частота ниже, тем сильнее она оказывает положительное воздействие на ферментные системы теста. При оценке продолжительности воздействия определено, что наибольшее положительное влияние ультразвуковой обработки наблюдалось при минимальном времени воздействия, принятом в эксперименте. Таким образом, наилучшее положительное влияние ферментные системы тестового полуфабриката на качество хлебобулочных изделий оказывает обработка тестового полуфабриката в течение 30 мин ультразвуковой волной 20 кГц в процессе расстойки тестовых заготовок. При этом количество дрожжевой биомассы увеличилось в 3,3–3,6 раза, при одновременном увеличении количества сброженных сахаров – в 1,3 раза, объем булочки – в 2,7 раза по сравнению с контрольным образцом. Для обеспечения равномерной микробиологической ферментации оборудование для ультразвуковой обработки должно охватывать и равномерно обрабатывать всю поверхность тестовой заготовки.

References

1. Feitelson L.N. Laser, Microwaves, Ultraviolet, and Ultrasound: Biophysical and Biological Basis, Applications, and Hazards in Medicine and Industry Program. *Journal of the National Cancer Institute*. 2009, V. 68, Is. 6, p. 1043.
2. Muller H. Ausbeutcerhöhung durch ultraschall. *Eur. Dairy Mag.*, 2010, no. 2, pp. 6–12.
3. Tao W., Zivanovic S., Hayes D.G., Weiss J. Efficient Reduction of Chitosan Molecular Weight by High-Intensity Ultrasound: Underlying Mechanism and Effect of Process Parameters. *J Agric Food Chem*. 2010, no. 56(13), pp. 5112–5119.
4. Villamiel M., de Jong P. Influence of High-Intensity Ultrasound and Heat Treatment in Continuous Flow on Fat, Proteins, and Native Enzymes of Milk. *J Agric Food Chem*. 2009, no. 48(2), pp. 472–478.
5. İlhan H., Savaroglu G. Temperature and Composition Dependence of Ultrasound Properties of Medical Nutrition Solutions Containing Carbohydrate, Protein, and Lipid. *J Chem Eng Data*. 2009, no. 54(12), pp. 3281–3283.
6. Tiwari B.K., Muthukumarappan K., O'Donnell C.P., Cullen P.J. Effects of Sonication on the Kinetics of Orange Juice Quality Parameters. *J Agric Food Chem*. 2011, no. 56(7), pp. 2423–2428.
7. Naota T., Koori H. Molecules that Assemble by Sound: an Application to the Instant Gelation of Stable Organic Fluids. *Chemical Society Reviews*. 2009, no. 127(26), pp. 9324–9325.
8. Auerman L.Ya. *Tekhnologiya khlebopekarnogo proizvodstva* [Bakery technology]. St. Petersburg, Professiya Publ., 2009, 416 p. (In Russian)
9. Chen L., Chen J., Ren J., Zhao M. Effects of Ultrasound Pretreatment on the Enzymatic Hydrolysis of Soy Protein Isolates and on the Emulsifying Properties of Hydrolysates. *J Agric Food Chem*. 2011, no. 59(6), pp. 2600–2609.
10. Breitbach M., Bathen D., Schmidt-Traub H. Effect of Ultrasound on Adsorption and Desorption Processes. *Ind Eng Chem Res*. 2012, no. 42(22), pp. 5635–5646.
11. Pingret D., Durand G., Fabiano-Tixier A.S., Rockenbauer A., Ginies Ch., Chemat F. Degradation of Edible Oil During Food Processing by Ultrasound: Electron Paramagnetic Resonance, Physicochemical, and Sensory Appreciation. *J Agric Food Chem*. 2012, no. 60(31), pp. 7761–7768.
12. Ye Y., Martini S. Application of High-Intensity Ultrasound to Palm Oil in a Continuous System. *J Agric Food Chem*. 2015, no. 63(1), pp. 319–327.
13. Benedito J., Mulet A., Velasco J., Dobarganes M.C. Ultrasonic Assessment of Oil Quality during Frying. *J Agric Food Chem*. 2010, no. 50(16), pp. 4531–4536.

14. Lim K.S., Barigou M. Ultrasound-Assisted Generation of Foam. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2010, no. 44(9), pp. 3312–3320.
15. Magomedov G.O., Lobosova L.A., Oleinikova A.Ya. *Khimiko-tehnologicheskii kontrol' na predpriyatiyakh khlebopekarnoi, makaronnoi i konditerskoi otrasli (teoriya i praktika)* [Chemical and technological control at the enterprises of the baking, macaroni and confectionery industry (theory and practice)] . Voronezh, Voronezh State University of Engineering Technologies Publ., 2014, 76 p. (*In Russian*)
16. Dennehy R.D. Particle Engineering Using Power Ultrasound. *Organic Process Research & Development*. 2013, no. 7(6), pp. 1002–1006.
17. Vercet A., Oria R., Marquina P., Crelier S., Lopez-Buesa P. Rheological Properties of Yoghurt Made with Milk Submitted to Manothermosonication. *J Agric Food Chem*. 2012, no. 50(21), pp. 6165–6171.

Статья поступила в редакцию 06.11.2018