

УДК 663.14.039.3

Активация пивных дрожжей посредством предварительной обработки ультразвуком

Д. В. Карпенко*, А. Г. Гришин, Т. В. Прудник

**Российский биотехнологический университет, г. Москва, Россия;*

e-mail: karpenkovd@mgupp.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7885-1150>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
09.06.2025;

получена
после доработки
13.08.2025;

принята
к публикации
22.08.2025

Ключевые слова:
пивные дрожжи,
бродильная активность,
количество
дрожжевых клеток,
нежизнеспособные
и упитанные клетки,
активация, обработка
ультразвуком

Бродильная активность дрожжей и интенсивность развития их популяции определяют технологические и экономические результаты производственного цикла в пивоварении. Обработку ультразвуком суспензии засевных дрожжей проводили в течение фиксированного времени при частоте 40 кГц и мощности 30 Вт перед введением их в питательные среды: обедненную (стерильный 5%-й раствор сахарозы); полноценную (пивное сусло с различной концентрацией сухих веществ). Культивирование осуществляли в течение 4 сут при 28–30 °С (на обедненной питательной среде) и 6 сут при 16–18 °С (на полноценной). Экспериментально выявлено нелинейное, но значимое влияние предварительной обработки ультразвуком на показатели питательных сред и дрожжевых популяций, которые сравнивались с контрольными образцами. Наибольшая убыль веса обедненной питательной среды (25 %) достигнута в результате воздействия ультразвуком на засевные дрожжи в течение двух минут; прирост количества клеток дрожжей на ней (около 100 %) – после трехминутной обработки. Содержание этанола в пивном сусле, сброженном дрожжами после двухминутной обработки, увеличилось на 27 %; после трехминутной – на 11 %. Воздействие ультразвуком в течение трех минут обеспилило наибольший прирост количества клеток дрожжей по окончании их культивирования на полноценной питательной среде (на 153 %). По совокупности результатов наиболее целесообразной признана обработка ультразвуком в течение трех минут; эксперимент в этих условиях был повторен еще дважды, полученные данные подтвердили установленные закономерности. На основе полученных результатов сделан вывод о перспективности применения ультразвуковой обработки в процессах дрожжегенерации и сбраживания пивного сусла, отмечена необходимость продолжения исследований в данном направлении.

Для цитирования

Карпенко Д. В. и др. Активация пивных дрожжей путем предварительной обработки ультразвуком. Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 4/2. С. 602–613. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-4/2-602-613>.

Activation of brewer's yeast by pre-treatment with ultrasound

Dmitry V. Karpenko*, Artem G. Grishin, Timofej V. Prudnik

**Russian Biotechnological University, Moscow, Russia;*

e-mail: karpenkovd@mgupp.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7885-1150>

Article info

Received
09.06.2025;

received
in revised;
13.08.2025;

accepted
22.08.2025

Key words:
brewer's yeast,
fermentation activity,
cell titer, non-viable
and well-fed cells,
activation,
sonication

Abstract

Fermentation activity of yeast and intensity of their population development determine technological and economic results of the production cycle in brewing. Ultrasonic treatment of pitching yeast suspension has been carried out for a fixed time at frequency of 40 kHz and power of 30 W before their introduction into nutrient media: depleted (sterile 5 % sucrose solution); complete (beer wort with different concentration of dry substances). Cultivation has been carried out for 4 days at 28–30 °C (on a depleted nutrient medium) and 6 days at 16–18 °C (on a complete one). A nonlinear, but significant effect of preliminary ultrasound treatment on the parameters of nutrient media and yeast populations compared with the control samples, is experimentally revealed. The greatest weight loss of the depleted nutrient medium (25 %) is achieved as a result of ultrasound exposure to pitching yeast for two minutes; an increase in the number of yeast cells on it (approximately 100 %) is observed after a three-minute treatment. The ethanol content in beer wort fermented with yeast after a two-minute treatment has increased by 27 %; after a three-minute treatment, by 11 %. Exposure to ultrasound for 3 minutes provided the greatest increase in the number of yeast cells at the end of their cultivation on a complete nutrient medium (by 153 %). Based on the combined results, ultrasound treatment for three minutes is recognized as the most appropriate; the experiment under these conditions has been repeated twice more, and the obtained data confirm the established patterns. Based on the obtained results, a conclusion is drawn about the potential of using ultrasound treatment in the processes of yeast generation and fermentation of beer wort, and the need for continued research in this area has been noted.

For citation

Karpenko, D. V. et al. 2025. Activation of brewer's yeast by pre-treatment with ultrasound. *Vestnik of MSTU*, 28(4/2), pp. 602–613. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-4/2-602-613>.

Введение

Дрожжи являются одним из основных видов сырья, применяемых в бродильных производствах. От состояния популяции и интенсивности метаболизма дрожжей зависит технологическая и экономическая эффективность производственного цикла пивоварения, потребительские характеристики готового напитка и его безопасность.

Решение задачи активации развития дрожжевой популяции заключается в поддержании оптимальных условий культивирования, однако данный подход не может быть реализован в большинстве бродильных производств. Так, при производстве пива низового брожения температура культивирования ниже оптимальной (7–14 °C вместо 25–28 °C), содержание сухих веществ (СВ) в питательной среде (ПС) (пивном сусле) выше (как правило, 11 и более % вместо 5–6 %), отсутствуют сбалансированность состава питательной среды (часто лимитирующим компонентом является усваиваемый азот) и ее стерильность. На практике реализуются иные способы культивирования, одним из которых является применение комплексных подкормок, в состав которых входят азотсодержащие соединения, витамины, минеральные вещества, в частности цинк (его роль, по нашему мнению, зависит от суммарной концентрации в сусле). Данное технологическое решение обладает преимуществами, но требует регулярных значительных расходов, а также не всегда предсказуемо меняет спектр накапливаемых метаболитов дрожжей.

В настоящее время определенное внимание уделяется улучшению свойств пивных дрожжей посредством их генетических модификаций (придание осмо- и этанолтолерантности, улучшение флокуляционной способности, "настройка" биосинтетического пути изолейцина-лейцина-валина и т. д.), однако в этом случае существуют законодательные ограничения, устанавливаемые государственными органами стран и регионов мира.

Перспективной альтернативой представляется использование волновых и полевых воздействий, доказавшее свою эффективность при решении широкого круга задач в пищевых производствах (*Зарубина и др., 2001, 2002; Данильчук, 2011; Карпенко и др., 2024; Петракова и др., 2002*). На кафедре технологии бродильных производств и виноделия Российского биотехнологического университета (РОСБИОТЕХ) в течение 15 лет проведен ряд исследований, посвященных влиянию на объекты различной природы света видимого диапазона (*Карпенко и др., 2017; Гришин и др., 2023*) и звука с частотами слышимого диапазона (*Карпенко и др., 2015, 2016; Karpenko et al., 2019*). Ультразвук (УЗ) разных частот и мощности оказывает разнонаправленное влияние на характеристики обрабатываемого объекта; в ходе исследования установлены параметры, обеспечивающие технологически и экономически значимые улучшения контролируемых характеристик (*Abesinghe et al., 2022; Aladjadjiyan, 2002; Yaldagard et al., 2008*).

Воздействие ультразвуком различной интенсивности и частоты является способом обработки не только интенсивно исследуемым, но и уже промышленно применяемым (*Knorr et al., 2004; Lan et al., 2023; Zhou et al., 2023*). Часто УЗ используется для разрушения различных биологических структур (*Chemat et al., 2011; Xue et al., 2024; Zhao et al., 2022*), в том числе для подавления нежелательной микрофлоры (*Nguyen et al., 2022; Oliveira et al., 2022; Park et al., 2019*). Однако публикуются результаты исследований (*Awad et al., 2012*), свидетельствующие о возможности интенсификации ультразвуком процессов, идущих с участием биохимических (*Данильчук и др., 2008*) и биологических объектов (*Mo et al., 2020*). В публикациях доказана возможность интенсификации развития популяций спиртовых дрожжей (*Kalugina et al., 2021*), а также высказываются различные точки зрения по поводу частоты ультразвука и характера влияния, оказываемого им на микроорганизмы. В ряде работ (*Мацулевич и др., 2017; Установка..., 2004*) отмечено положительное влияние частоты около 40 кГц, хотя существуют и иные мнения (*Калужина и др., 2025*).

В настоящем исследовании на основании экспериментальных данных и анализа информации литературных источников проведена оценка эффективности обработки ультразвуком пивных дрожжей: накопление ими биомассы и повышение бродильной активности. Текущий этап исследований включает культивирование дрожжевых популяций на модельных средах (5%-м растворе глюкозы) и при сбраживании пивного сусла.

Материалы и методы

Объектом исследований служили сухие пивные дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* Saflager S-189 (Fermentis).

В качестве питательных сред использовали стерилизованный автоклавированием при 121 °C в течение 20 мин 5%-й раствор сахарозы в водопроводной воде или пивное сусло, приготовленное из охмеленного концентрата "Жигулевский лагер" (торговой марки "Своя кружкаTM", производитель "Компания СК", Россия).

Обработку дрожжей перед засевом ими питательной среды проводили в ультразвуковой ванне BAKU 3550 (КНР) (частота генерируемого звука 40 кГц, мощность 30 Вт) в течение фиксированного

времени. Обработке подвергали суспензию дрожжей в стерилизованной водопроводной воде, после чего определяли в ней общее количество дрожжевых клеток методом подсчета в камере Горяева.

Культивирование вели в течение 4 сут при 28–30 °С на растворе сахарозы и 6 сут при 16–18 °С на пивном сусле.

Бродильную активность в опытных и контрольных образцах (в серии с использованием в качестве питательной среды раствора глюкозы) определяли весовым методом: в каждом варианте стерилизованную питательную среду, засеянную дрожжами, помещали в колбу; последнюю закрывали затвором Мейселя и взвешивали на технических весах с точностью до 0,01 г в течение культивирования, фиксируя убыль веса за счет удаления углекислого газа как метаболита дрожжей. В серии со сбраживанием пивного сусла бродильную активность определяли в процессе и по окончании культивирования тем же весовым методом, а также оценивали по содержанию в молодом пиве этилового спирта и действительного экстракта, установленному дистилляционным способом.

При использовании в качестве питательной среды пивного сусла в процессе его сбраживания определяли видимый экстракт пикнометрическим методом.

В процессе культивирования как характеристики состояния дрожжевой популяции устанавливали общее количество дрожжевых клеток (методом подсчета в камере Горяева), число нежизнеспособных (мертвых) дрожжевых клеток (методом окрашивания мертвых клеток метиленовым синим) и упитанность дрожжей (по методу окрашивания упитанных клеток раствором Люголя).

Каждый эксперимент проводили в трех повторностях для опытного и контрольного вариантов; в качестве контроля использовали варианты, засеянные суспензией дрожжей, не подвергавшихся акустической обработке.

Результаты и обсуждение

На первом этапе исследований, целью которого являлось установление наличия или отсутствия влияния УЗ на пивные дрожжи, использовали устройство, генерирующее ультразвук фиксированной частоты и мощности. Вследствие этого варьируемым параметром предварительной обработки являлась только ее продолжительность. На основе литературных данных был сделан вывод, что большое количество введенной в обрабатываемый объект (систему) энергии (длительное время воздействия УЗ) с высокой вероятностью приводит к разрушению его компонентов или их дезинтеграции. При этом малое количество энергии (короткое время обработки УЗ) не вызывает детектируемых изменений контролируемых показателей. В силу этого диапазон варьирования в разных сериях экспериментов имел пределы от 30 с до 5 мин.

В первой серии экспериментов в качестве питательной среды использовали 5%-й раствор глюкозы. Такой выбор был обусловлен следующими соображениями: 1) пивное сусло, даже приготовленное из концентрата определенной марки, имеет большие или меньшие вариации химического состава, что обуславливает наличие трудно контролируемых факторов, влияющих на развитие дрожжевой популяции, помимо изучаемого способа воздействия; 2) питательная среда "минимального" состава создает более сложные условия для дрожжевой популяции, что делает ее более чувствительной к внешним воздействиям, включая обработку УЗ.

Ввиду того что культивирование вели в "смешанных" условиях (более аэробных в начале процесса и более анаэробных ближе к его концу), на данном этапе решено было оценивать бродильную активность дрожжей по убыли веса питательной среды, обусловленной накоплением среди прочих метаболитов углекислого газа, самопроизвольно выделяющегося из питательной среды.

Продолжительность культивирования на модельной питательной среде равнялась 4 сут, так как, во-первых, в настоящее время в производственных условиях наблюдается тенденция к сокращению длительности стадии главного брожения, во-вторых, представлялось целесообразным не доводить культуру до второй половины стационарной фазы, тем более до начала фазы отмирания, в которой заметно меняется как морфология, так и физиология дрожжей.

Сразу после формирования опытного и контрольного образцов и в течение каждых суток культивирования отбирали пробы для определения контролируемых показателей, указанных в п. "Материалы и методы".

Необходимо отметить следующее. По организационным причинам даже в рамках одной серии эксперименты проводились последовательно, в силу чего условия культивирования в них в большей или меньшей степени отличались, даже в контрольных вариантах, режимы работы с которыми (начальное количество клеток дрожжей, температура) старались стабилизировать на определенных уровнях. В силу этого для облегчения сопоставления решено было представить результаты не в абсолютных величинах. Значения контролируемых показателей опытных вариантов выражены в процентах по отношению к значениям аналогичных характеристик контрольных образцов в соответствующих опытах, последние принимались за 100 % и на диаграммах не приведены. На рис. 1–8 приведена разность (положительная или отрицательная) между значениями в опытном и контрольном вариантах каждого эксперимента.

Результаты оценки бродительной активности дрожжей по убыли веса модельной питательной среды приведены на рис. 1.

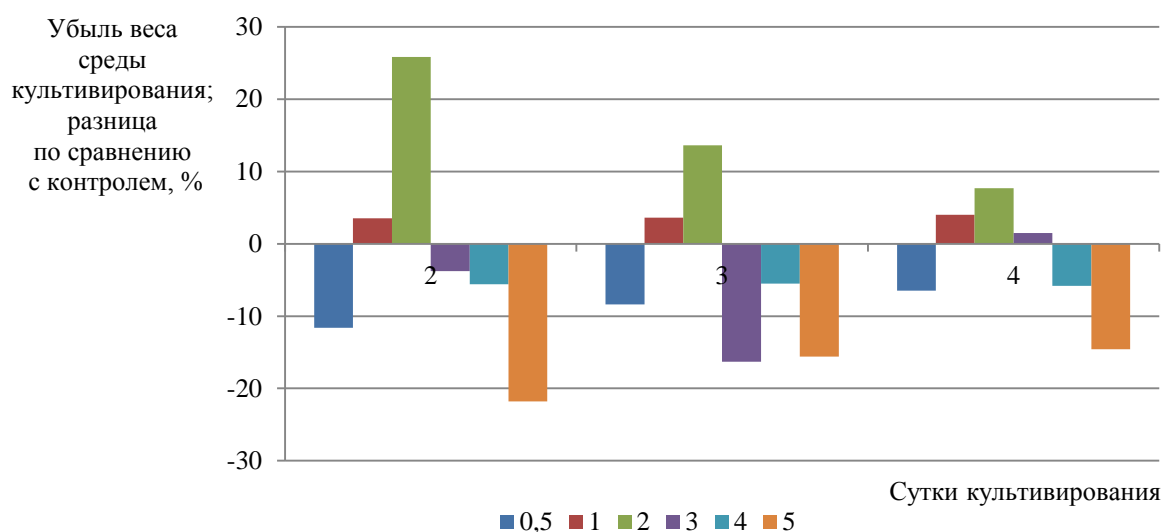


Рис. 1. Влияние продолжительности предварительной обработки (мин) засевных дрожжей ультразвуком на убыль веса питательной среды в процессе культивирования на модельной питательной среде
Fig. 1. Effect of duration of preliminary treatment of seed yeast (minutes) with ultrasound on the loss of weight of the model nutrient medium during cultivation

Исходя из приведенных данных, можно сделать следующие выводы:

- обработка засевных пивных дрожжей ультразвуком в использованном режиме оказывает воздействие, хотя и разнонаправленное, на состояние дрожжевых клеток;
- продолжительность обработки значимо и нелинейно влияет на интенсивность потребления пивными дрожжами питательных веществ: длительное воздействие приводит к угнетению обменных процессов; минимальная из апробированных продолжительность обработки (30 с) уменьшает убыль веса среды культивирования;
- эффект предварительного воздействия ультразвуком снижается в процессе культивирования и достигает минимума к его завершению (это утверждение требует дополнительной проверки);
- полученные результаты предполагают возможность практического использования исследуемого способа обработки для активации развития дрожжевых популяций (при установлении рациональных параметров предварительного воздействия ультразвуком).

Ряд показателей устанавливали только по окончании культивирования дрожжевых популяций. На рис. 2 представлены результаты определения количества дрожжевых клеток после 4 сут выращивания популяции на модельной питательной среде.

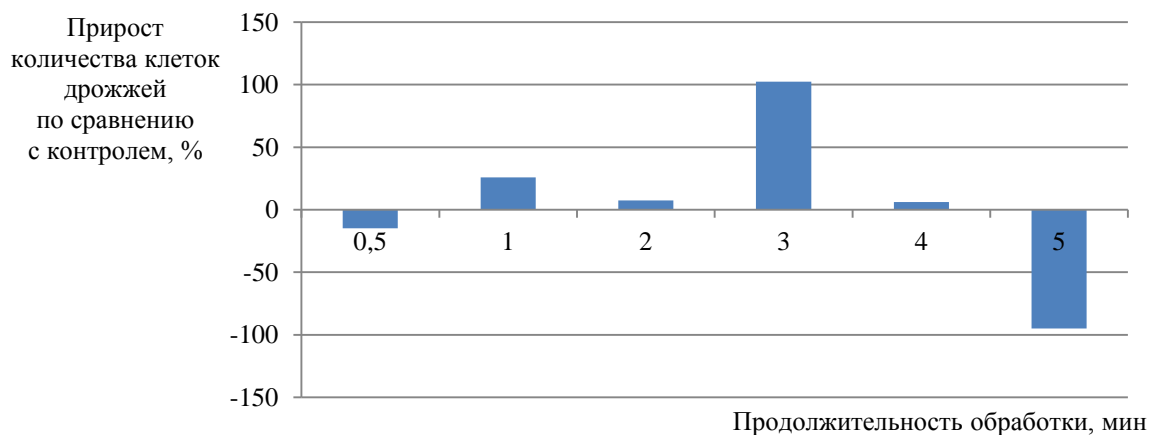


Рис. 2. Влияние продолжительности предварительной обработки засевных дрожжей ультразвуком на прирост количества клеток по окончании культивирования на модельной питательной среде
Fig. 2. Effect of duration of preliminary treatment of seed yeast with ultrasound on the increase in cell titer at the end of cultivation on a model nutrient medium

Данные, указанные на рис. 2, подтверждают предположение о наличии значимого влияния предварительной обработки УЗ на состояние дрожжевой популяции, в том числе на накопление ее биомассы. Однако противоречивыми являются результаты обработки УЗ в течение 2 мин, обусловившей более интенсивную утилизацию питательных веществ, но существенно меньший прирост биомассы. При этом воздействие в течение 3 мин, напротив, привело к снижению убыли веса ПС при двукратном приросте количества клеток по сравнению с контролем. Следует отметить, что стрессовое воздействие того или иного типа на популяцию пивных дрожжей может приводить к интенсификации метаболизма клеток, переживших обработку, снизивших свою численность, но проявляющих большую физиологическую активность.

Результаты определения числа нежизнеспособных и упитанных дрожжевых клеток по окончании процесса культивирования представлены на рис. 3 и 4.

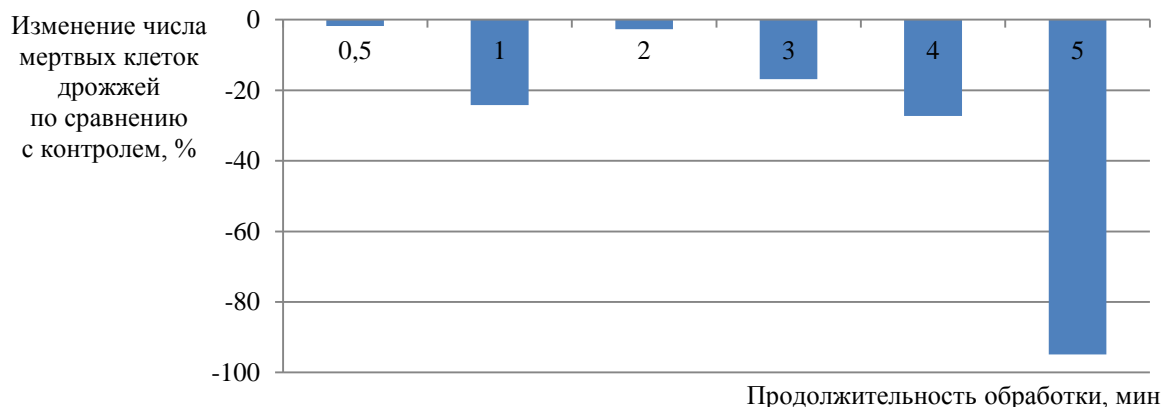


Рис. 3. Влияние продолжительности предварительной обработки засевных дрожжей ультразвуком на число нежизнеспособных клеток дрожжей по окончании культивирования на модельной питательной среде

Fig. 3. Effect of duration of pretreatment of seed yeast with ultrasound on the amount of dead yeast cells at the end of cultivation on a model nutrient medium

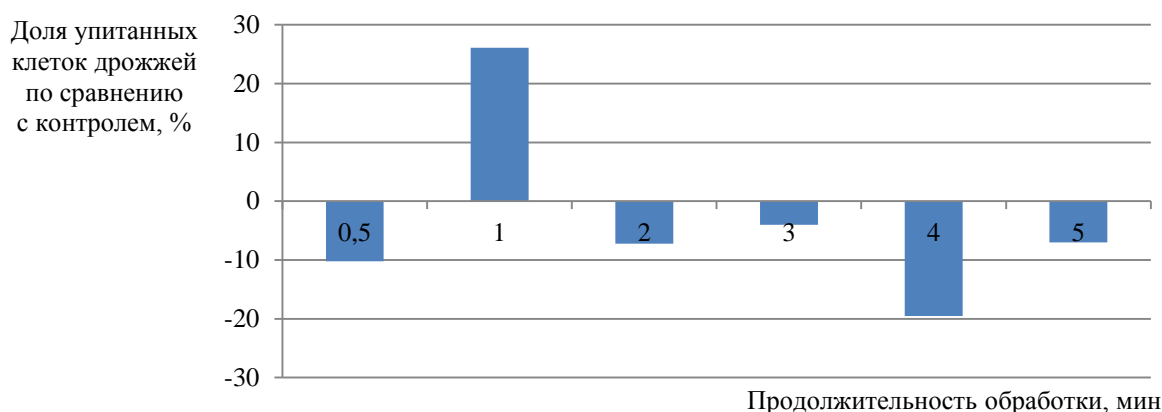


Рис. 4. Влияние продолжительности предварительной обработки засевных дрожжей ультразвуком на долю упитанных клеток дрожжей по окончании культивирования на модельной питательной среде

Fig. 4. Effect of duration of preliminary treatment of seed yeast with ultrasound on the well-fed yeast cells amount at the end of cultivation on a model nutrient medium

В условиях эксперимента при разной продолжительности обработки УЗ зафиксировано снижение числа нежизнеспособных клеток по окончании культивирования, причем наиболее выраженное их уменьшение наблюдалось после 5 мин воздействия. Можно предположить, что это связано с минимальной из всех вариантов интенсивностью метаболизма в данном образце. Несколько неожиданным является заметный прирост упитанных клеток после обработки УЗ продолжительностью 1 мин. Возможным объяснением является умеренная активация дрожжевой популяции после воздействия длительностью 1 мин: по всем контролируемым показателям данный опытный вариант превосходил контрольный. Однако достигнутые улучшения представляются недостаточными как с технологической, так и с экономической точек зрения, а по показателю убыли веса питательной среды близки к диапазону погрешности определения.

На основании результатов первой серии экспериментов был сделан вывод о целесообразности продолжения исследований в условиях, близких к производственным (на стадии главного брожения) по составу питательной среды и концентрации в ней сухих веществ (СВ).

Для этого проведена серия экспериментов, в которой в качестве питательной среды использовали пивное сусло, приготовленное из концентрата; продолжительность культивирования при температуре 16–18 °С составила 6 сут.

В данной серии экспериментов применяли диапазон варьирования продолжительности обработки 0,5–4 мин. Более длительное воздействие УЗ приводит к повышению температуры обрабатываемой суспензии дрожжей до значений около 30 °С, что может стать дополнительным трудно учитываемым фактором, влияющим на значения контролируемых показателей. Для оценки эффективности метаболизма дрожжевых популяций использовали значения видимого экстракта в процессе сбраживания сусла, а также действительного экстракта (ДЭ) и содержания этилового спирта по окончании культивирования. Результаты определения этанола приведены на рис. 5.

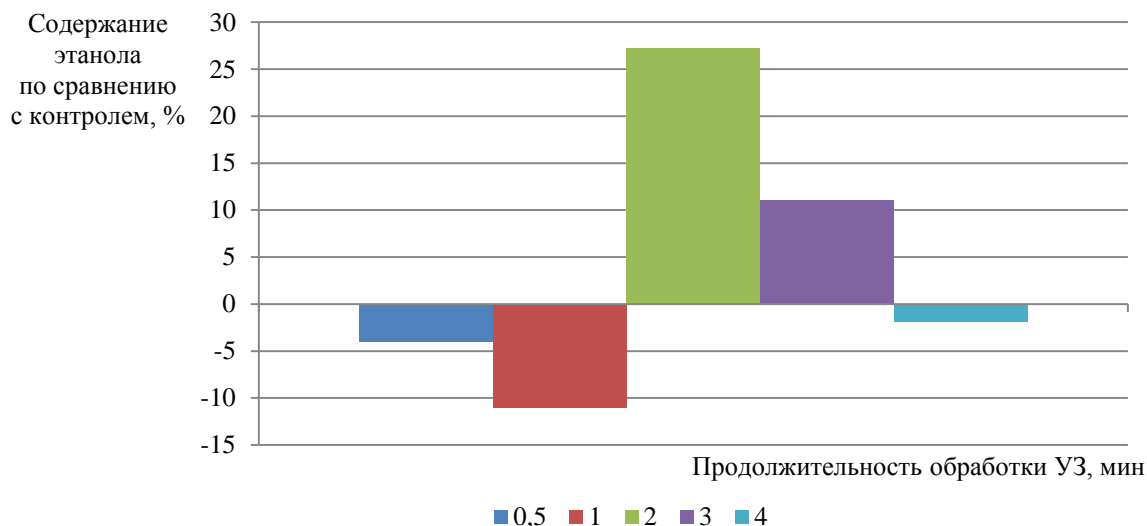


Рис. 5. Влияние продолжительности предварительной обработки засевных дрожжей ультразвуком на содержание этилового спирта (мас.%) в сброженном сусле (молодом пиве)

Fig. 5. Effect of duration of preliminary treatment of pitching yeast with ultrasound on the content of ethyl alcohol (% by weight) in fermented wort (green beer)

Следует отметить, что приведенная зависимость по многим значениям совпадает с зависимостью, полученной при использовании модельной среды (4 сут) (рис. 1), за исключением варианта с обработкой в течение 1 мин. На обеих питательных средах наибольшее повышение физиологической активности дрожжей обеспечило воздействие УЗ в течение 2–3 мин, а большая или меньшая длительность обработки обусловила снижение утилизации питательных веществ и выхода дрожжевых метаболитов.

Результаты определения количества клеток в опытных вариантах по сравнению с контрольными приведены на рис. 6.

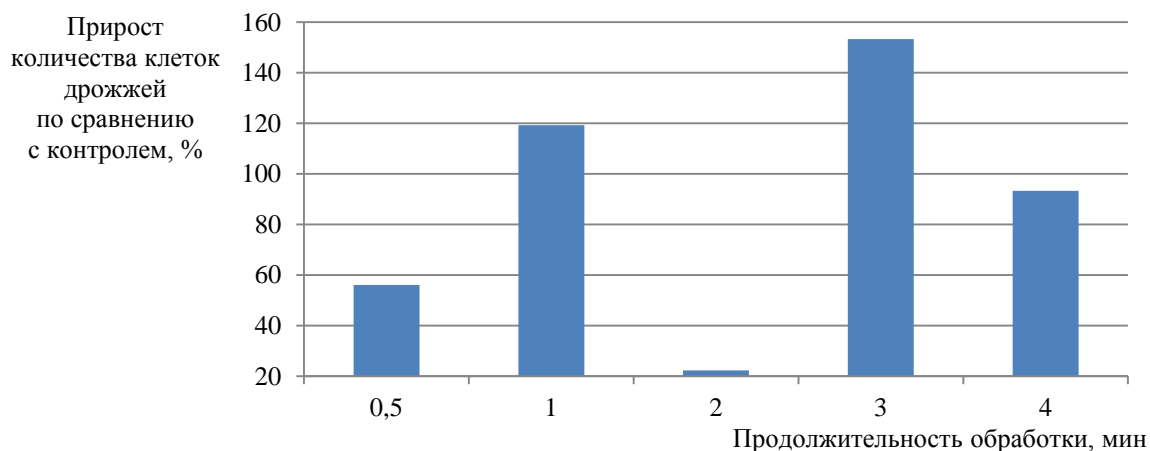


Рис. 6. Влияние продолжительности предварительной обработки засевных дрожжей ультразвуком на прирост количества клеток по окончании культивирования на пивном сусле

Fig. 6. Effect of duration of preliminary treatment of seed yeast with ultrasound on the increase in cell titer at the end of cultivation on beer wort

В условиях экспериментов не удалось выявить какой-либо взаимосвязи между накоплением биомассы и степенью сбраживания сусла: в некоторых вариантах (после обработки в течение 2 и 3 мин) оба показателя возрастали. В остальных случаях при достаточно существенном увеличении количества клеток содержание накопленного ими этанола в сброженном сусле было ниже, чем в контроле. В целом наблюдалось положительное воздействие предварительной обработки ультразвуком на накопление дрожжевых клеток при культивировании на пивном сусле.

Результаты определения доли нежизнеспособных клеток дрожжей в сброженном сусле приведены на рис. 7.

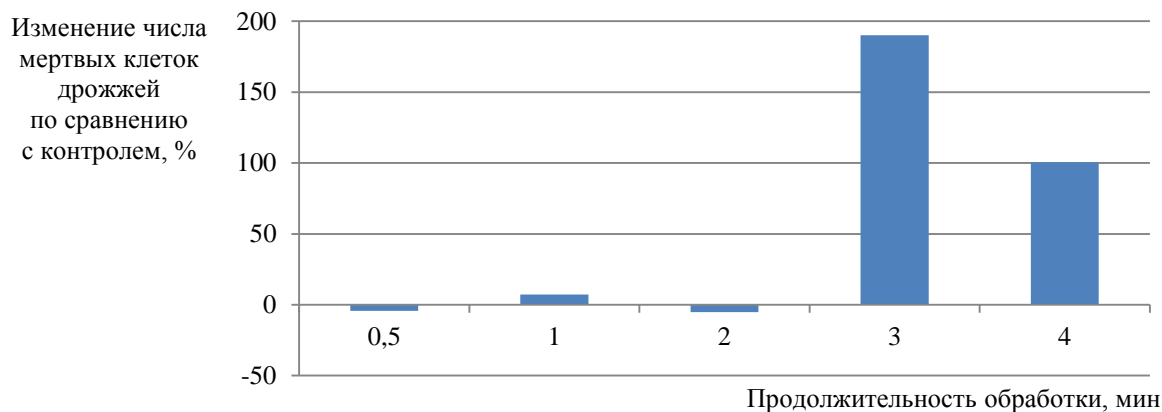


Рис. 7. Влияние продолжительности предварительной обработки засевных дрожжей ультразвуком на число нежизнеспособных клеток дрожжей по окончании культивирования на пивном сусле
Fig. 7. Effect of duration of pretreatment of seed yeast with ultrasound on the amount of dead yeast cells at the end of cultivation on beer wort

Предварительная обработка ультразвуком существенно влияет на изменение доли нежизнеспособных клеток в конце культивирования на пивном сусле. Наибольшее увеличение значения данного показателя зафиксировано в варианте после обработки в течение 3 мин. Необходимо отметить, что в контрольном варианте данного эксперимента доля мертвых клеток была существенно ниже, чем в контролях других экспериментов серии. С учетом этого и величины, зафиксированной в варианте после 4-минутной обработки, можно предположить рост доли нежизнеспособных клеток, что логично, при интенсификации накопления биомассы и увеличении конечного количества дрожжевых клеток.

Доля упитанных клеток (рис. 8) во всех опытных вариантах существенно превышала аналогичные показатели контрольных образцов вне зависимости от величин прочих контролируемых характеристик.

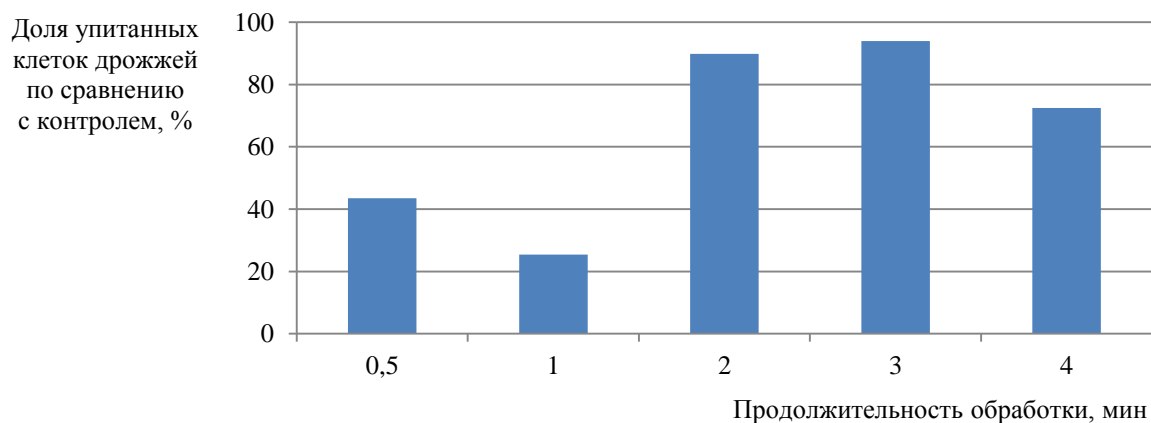


Рис. 8. Влияние продолжительности предварительной обработки засевных дрожжей ультразвуком на долю упитанных клеток дрожжей по окончании культивирования на пивном сусле
Fig. 8. Effect of duration of preliminary treatment of seed yeast with ultrasound on the well-fed yeast cells amount at the end of cultivation on beer wort

На основании массива приведенных данных отдано предпочтение обработке продолжительностью 3 мин, так как она обеспечила улучшение всех контролируемых характеристик, за исключением доли нежизнеспособных клеток.

Для проверки достоверности полученных результатов эксперимент с длительностью УЗ-воздействия 3 мин повторен еще дважды в тех же условиях. Плотность начального сусла составляла 10,6 % (эксперимент 1, результаты которого, выраженные в процентах, уже приведены выше как составная часть рассмотренной серии), 12,9 % (эксперимент 2) и 12,5 % (эксперимент 3). Полученные данные (абсолютные величины) суммированы в таблице.

Таблица. Показатели сусел, сброженных дрожжами
после их предварительной обработки ультразвуком продолжительностью 3 мин
Table. Indicators of worts fermented by yeast after their preliminary ultrasound treatment for 3 minutes

Вариант	Экстрактивность начального сусла, %	Этанол, об. %	Прирост количества клеток, млн/см ³	Доля нежизнеспособных клеток, %	Доля упитанных клеток, %
Эксперимент 1					
Контроль	10,6 ± 0,2	3,30 ± 0,11	10,33 ± 0,91	8,99 ± 1,01	13,08 ± 1,27
Опыт	10,6 ± 0,2	3,66 ± 0,12	26,17 ± 1,12	26,09 ± 1,46	25,38 ± 1,88
Эксперимент 2					
Контроль	12,9 ± 0,3	2,45 ± 0,09	12,08 ± 1,01	22,44 ± 1,93	50,00 ± 2,03
Опыт	12,9 ± 0,2	2,73 ± 0,08	19,17 ± 1,23	44,74 ± 1,44	44,88 ± 1,09
Эксперимент 3					
Контроль	12,5 ± 0,2	3,87 ± 0,10	11,30 ± 0,98	26,35 ± 1,73	59,00 ± 2,13
Опыт	12,5 ± 0,3	4,16 ± 0,09	н/д*	45,16 ± 2,04	59,57 ± 1,88

Примечание. *н/д – нет данных.

Результаты обсуждаемых экспериментов не являются идентичными, однако прослеживаются общие закономерности. Прежде всего это касается накопления этилового спирта в молодом пиве: прирост данного показателя в опытных вариантах по сравнению с контрольными составил 10,9; 11,4; 7,5 % в экспериментах 1, 2 и 3 соответственно. Прирост тем выше, чем меньше этанола накоплено в соответствующем контроле. С учетом отсутствия данных в опытном варианте эксперимента 3 можно предположить, что и прирост количества клеток значимо увеличивается в результате воздействия УЗ в течение 3 мин. Доля нежизнеспособных клеток в опытном варианте в каждом эксперименте существенно возрастала, что обусловлено более интенсивным накоплением общего количества клеток. В ходе исследования не выявлено какой-либо закономерности влияния УЗ-обработки на число упитанных клеток; возможной причиной этого является наличие многих факторов, влияющих в процессе культивирования на данную характеристику микробной популяции, некоторые из которых оставались нестабилизированными в условиях экспериментов.

Более важным представляется то, что в различных условиях (плотность начального сусла, температура процесса, посевная доза дрожжей и т. д.) несколько раз подтверждена возможность интенсификации, как минимум, спиртового брожения. В пивоварении этот показатель важен не только с точки зрения повышения содержания этилового спирта в готовом напитке (которое регламентируется нормативной документацией на конкретный сорт пива), но и как возможность сокращения стадии главного брожения, что обеспечивает существенные экономические преимущества.

Заключение

На основании анализа литературных данных, полученных разными группами исследователей, а также результатов проведенных нами экспериментов доказана перспективность обработки ультразвуком как способа активации развития популяций пивных дрожжей и интенсификации клеточного метаболизма. Эффективность обработки УЗ при фиксированной частоте и мощности значимо зависит от ее продолжительности.

При рациональной продолжительности воздействия УЗ (2–3 мин) на засевные дрожжи улучшаются результаты культивирования популяции как на модельной (обедненной), так и на полноценной питательных средах. Наибольшее положительное влияние УЗ-обработка оказала на процессы утилизации питательных веществ и накопления этилового спирта (в серии экспериментов со сбраживанием пивного сусла). Кроме того, при указанной продолжительности она обеспечила существенное увеличение количества клеток по окончании процесса культивирования.

Практическое применение обработки ультразвуком заключается в сокращении продолжительности стадии главного брожения и интенсификации процессов накопления дрожжевой биомассы (дрожжегенерации) в пивоваренном производстве, а также в пищевой и микробиологической промышленности. На основе полученных результатов необходимо продолжить исследования в данной области с целью определения влияния частоты и мощности УЗ на значения контролируемых показателей.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Гришин А. Г., Карпенко Д. В., Карагод В. А. Влияние продолжительности волновой обработки на развитие дрожжевых популяций // Food Metaengineering. 2023. Т. 1, № 1. С. 17–25. DOI: <https://doi.org/10.37442/fme.2023.1.11>. EDN: YVWEGS.
- Данильчук Т. Н. Влияние низкоинтенсивной акустической обработки на водопоглощение ячменей в процессе солодоращения // Пиво и напитки. 2011. № 1. С. 15–17. EDN: NDZJVD.
- Данильчук Т. Н., Юрьев Д. Н., Ратников А. Ю. Стимуляция биохимических процессов в прорастающем зерне акустическими и электрофизическими методами воздействия // Пиво и напитки. 2008. № 6. С. 11–14. EDN: NDCFUV.
- Зарубина Е. П., Данько С. Ф., Данильчук Т. Н., Юрьев Д. Н. [и др.]. Влияние микроэлектротока на солодоращение ячменя // Пиво и напитки. 2001. № 5. С. 20–21.
- Зарубина Е. П., Данько С. Ф., Данильчук Т. Н., Юрьев Д. Н. [и др.]. Влияние переменного микроэлектротока на солодоращение ячменя // Пиво и напитки. 2002. № 2. С. 24–25.
- Калужина О. Ю., Ахметова А. М. Обоснование выбора частоты ультразвука для дальнейшего применения в пищевых технологиях // Продукты питания: производство, безопасность, качество : материалы междунар. науч.-практ. конф., Уфа, 25 декабря 2024 г. Уфа : Башкирский государственный аграрный университет, 2025. С. 108–113. EDN: HKFDYQ.
- Карпенко Д. В., Гришин А. Г., Заграничная А. Д., Гордюшин М. Г. [и др.]. Волновые и полевые воздействия в пищевых технологиях: обзор предметного поля // Хранение и переработка сельхозсырья. 2024. Т. 32, № 3. С. 58–81. DOI: <https://doi.org/10.36107/spfp.2024.3.566>. EDN: KVBINX.
- Карпенко Д. В., Кравченко В. С., Шалагинов К. В. Активация амилолитического ферментного препарата волновыми воздействиями // Пиво и напитки. 2017. № 5. С. 16–19. EDN: ZTSZJX.
- Карпенко Д. В., Позднякова И. Э. Повышение экстрактивности хмеля с помощью акустической обработки // Пиво и напитки. 2016. № 6. С. 46–49. EDN: XEPKZR.
- Карпенко Д. В., Тихонова Т. А., Ходарев К. К., Овчинников Ю. Б. [и др.]. Способ активации амилолитического ферментного препарата // Пиво и напитки. 2015. № 4. С. 42–44. EDN: UNFEWF.
- Мацулевич Ю. С., Бирагова С. Р. Использование ультразвуковой обработки засевных дрожжей местной селекции для интенсификации процессов брожения // Научно-техническая конференция обучающихся и молодых ученых СКГМИ (ГТУ) "НТК-2017" : сб. докл. по итогам науч.-исслед. работ, Владикавказ, 26–30 апреля 2017 г. Владикавказ : Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), 2017. С. 169–171. EDN: YTOJKB.
- Петракова Л. Ф., Егоров В. В., Данько С. Ф. Фотоактивация солодоращения ячменя // Пиво и напитки. 2002. № 6. С. 16–17.
- Установка для ультразвуковой обработки суспензии : полезная модель к пат. № 40574 Рос. Федерация / В. И. Демченко, В. И. Корчагин, А. Е. Варнаков, А. О. Малишевский, № 2004113496/22 ; заявл. 05.05.2004; опубл. 20.09.2004, Бюл. № 26.
- Abesinghe A. M. N. L., Vidanarachchi J. K., Islam N., Karim M. A. Effects of ultrasound on the fermentation profile and metabolic activity of lactic acid bacteria in buffalo's (*Bubalus bubalis*) milk // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2022. Vol. 79. Article number: 103048. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103048>.
- Aladjadjian A. Increasing carrot seeds (*Daucus carota* L.), cv. Nantes, viability through ultrasound treatment // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2002. Vol. 8. P. 469–472.
- Awad T. S., Moharram H. A., Shaltout O. E., Asker D. [et al.]. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review // Food Research International. 2012. Vol. 48, Iss. 2. P. 410–427. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.05.004>
- Chemat F., Zill-e-Huma, Khan M. K. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction // Ultrasonics Sonochemistry. 2011. Vol. 18, Iss. 4. P. 813–835. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.023>.
- Kalugina O., Nafikova A., Chernenkov E., Leonova S. [et al.]. Application of ultrasound for enhancing fermentation rates in brewing technology // Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria. 2021. Vol. 20, Iss. 3. P. 301–312. DOI: <https://doi.org/10.17306/J.AFS.2021.0950>.
- Karpenko D. V., Gernet M. V., Krjukova E. V., Gribkova I. N. [et al.]. Acoustic vibration effect on genus *Saccharomyces* yeast population development // News of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. 2019. Vol. 4(43). P. 103–112. DOI: <https://doi.org/10.32014/2019.2518-170X.103>.
- Knorr D., Zenker M., Heinz V., Lee D.-U. Applications and potential of ultrasonics in food processing // Trends in Food Science & Technology. 2004. Vol. 15, Iss. 5. P. 261–266. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.12.001>.

- Lan M., Luo D., Yue C., Bai Z. [et al.]. Ultrasound-assisted separation of wheat flour: Enhancing the degree of separation and characterization analysis // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2023. Vol. 90. Article number: 103493. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103493>.
- Mo Z., Liu Q., Xie W., Ashraf U. [et al.]. Ultrasonic seed treatment and Cu application modulate photosynthesis, grain quality, and Cu concentrations in aromatic rice // *Photosynthetica*. 2020. Vol. 58, Iss. 3. P. 682–691. DOI: <https://doi.org/10.32615/ps.2020.009>.
- Nguyen C. H., Tikekar R. H., Nitin N. Combination of high-frequency ultrasound with propyl gallate for enhancing inactivation of bacteria in water and apple juice // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2022. Vol. 82. Article number: 103149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103149>.
- Oliveira G. A. R., Guimarães J. T., Ramos G. L. P. A., Esmerino E. A. [et al.]. Benefits of thermosonication in orange juice whey drink processing // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2022. Vol. 75. Article number: 102876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102876>.
- Park J.-S., Ha J.-W. Ultrasound treatment combined with fumaric acid for inactivating food-borne pathogens in apple juice and its mechanisms // *Food Microbiology*. 2019. Vol. 84. Article number: 103277. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fm.2019.103277>.
- Xue H., Wang W., Wu J., Xie K. [et al.]. Ultrasound assisted aqueous two-phase extraction of polysaccharides from corn stigma: Process optimization, structure characterization, and immunomodulatory activity // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2024. Vol. 91. Article number: 103531. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103531>.
- Yaldagard M., Mortazavi S. A., Tabatabaie F. Application of ultrasonic waves as a priming technique for accelerating and enhancing the germination of barley seed: Optimization of method by the Taguchi approach // *Journal of the Institute of Brewing*. 2008. Vol. 114, Iss. 1. P. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2008.tb00300.x>.
- Zhao L., Poh C. N., Wu J., Zhao X. [et al.]. Effects of electrolysed water combined with ultrasound on inactivation kinetics and metabolite profiles of *Escherichia coli* biofilms on food contact surface // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2022. Vol. 76. Article number: 102917. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102917>.
- Zhou J., Wang M., Barba F. J., Zhu Z. [et al.]. A combined ultrasound + membrane ultrafiltration (USN-UF) process for enhancing saccharides separation from *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2023. Vol. 85. Article number: 103341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103341>.

References

- Grishin, A. G., Karpenko, D. V., Karagod, V. A. 2023. The impact of the duration of wave treatment on the development of yeast populations. *Food Metaengineering*, 1(1), pp. 17–25. DOI: <https://doi.org/10.37442/fme.2023.1.11>. EDN: YVWEGS. (In Russ.)
- Danilchuk, T. N. 2011. Effect of low-intensity acoustic treatment on water absorption of barley during malting. *Beer and Beverages*, 1, pp. 15–17. EDN: NDZJVD. (In Russ.)
- Danilchuk, T. N., Jur'ev, D. N., Ratnikov, A. Ju. 2008. Stimulation of biochemical processes in germinating grain by acoustic and electrophysical methods of influence. *Beer and Beverages*, 6, pp. 11–14. EDN: NDCFUV. (In Russ.)
- Zarubina, E. P., Dan'ko, S. F., Danilchuk, T. N., Jur'ev, D. N. et al. 2001. Effect of micro-electric current on malting of barley. *Beer and Beverages*, 5, pp. 20–21. (In Russ.)
- Zarubina, E. P., Dan'ko, S. F., Danilchuk, T. N., Jur'ev, D. N. et al. 2002. Effect of alternating microelectric current on barley malting. *Beer and Beverages*, 2, pp. 24–25. (In Russ.)
- Kaluzhina, O. Ju., Ahmetova, A. M. 2025. Justification for the choice of ultrasound frequency for further application in food technology. Proceedings of the International scientific and practical conference *Food products: production, safety, quality*, Ufa, 25 December, 2024. Ufa, pp. 108–113. EDN: HKFDYQ. (In Russ.)
- Karpenko, D. V., Grishin, A. G., Zagranichnaya, A. D., Gordjushin, M. G. et al. 2024. Wave and field impacts in food technologies: A scoping review. *Storage and Processing of Farm Products*, 32(3), pp. 58–81. DOI: <https://doi.org/10.36107/spfp.2024.3.566>. EDN: KVBINX. (In Russ.)
- Karpenko, D. V., Kravchenko, V. S., Shalaginov, K. V. 2017. Activation of amylolytic enzyme preparation by wave effects. *Beer and Beverages*, 5, pp. 16–19. EDN: ZTSZJX. (In Russ.)
- Karpenko, D. V., Pozdnjakova, I. Je. 2016. Increasing the extractability of hops using acoustic treatment. *Beer and Beverages*, 6, pp. 46–49. EDN: XEPKZR. (In Russ.)
- Karpenko, D. V., Tikhonova, T. A., Hodarev, K. K., Ovchinnikov, Ju. B. et al. 2015. Method for activating amylolytic enzyme preparation. *Beer and Beverages*, 4, pp. 42–44. EDN: UNFEWF. (In Russ.)
- Maculevich, Ju. S., Biragova, S. R. 2017. Using ultrasonic treatment of locally selected pitching yeast to intensify fermentation processes. Coll. of articles *Scientific and technical conference of students and young scientists of SKMMI (STU) "STC-2017"*. Vladikavkaz, pp. 169–171. EDN: YTOJKB. (In Russ.)

- Petrakova, L. F., Egorov, V. V., Dan'ko, S. F. 2002. Photoactivation of barley malting. *Beer and Beverages*, 6, pp. 16–17. (In Russ.)
- Demchenoko, V. I., Korchagin, V. I., Varnakov, A. E., Malishevskij, A. O. 2004. Installation for ultrasonic treatment of suspension, Russian Federation, Open Joint Stock Company "Bread Factory No. 2" (2004), Pat. RU 40 574 U1. (In Russ.)
- Abesinghe, A. M. N. L., Vidanarachchi, J. K., Islam, N., Karim, M. A. 2022. Effects of ultrasound on the fermentation profile and metabolic activity of lactic acid bacteria in buffalo's (*Bubalus bubalis*) milk. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 79. Article number: 103048. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103048>.
- Aladjadjiyan, A. 2002. Increasing carrot seeds (*Daucus carota* L.), cv. Nantes, viability through ultrasound treatment. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 8, pp. 469–472.
- Awad, T. S., Moharram, H. A., Shaltout, O. E., Asker, D. et al. 2012. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Research International*, 48(2), pp. 410–427. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.05.004>
- Chemat, F., Zill-e-Huma, Khan, M. K. 2011. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(4), pp. 813–835. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.023>.
- Kalugina, O., Nafikova, A., Chernenkov, E., Leonova, S. et al. 2021. Application of ultrasound for enhancing fermentation rates in brewing technology. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 20(3), pp. 301–312. DOI: <https://doi.org/10.17306/J.AFS.2021.0950>.
- Karpenko, D. V., Gernet, M. V., Krjukova, E. V., Gribkova, I. N. et al. 2019. Acoustic vibration effect on genus *Saccharomyces* yeast population development. *News of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*, 4(43), pp. 103–112. DOI: <https://doi.org/10.32014/2019.2518-170X.103>.
- Knorr, D., Zenker, M., Heinz, V., Lee, D.-U. 2004. Applications and potential of ultrasonics in food processing. *Trends in Food Science & Technology*, 15(5), pp. 261–266. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.12.001>.
- Lan, M., Luo, D., Yue, C., Bai, Z. et al. 2023. Ultrasound-assisted separation of wheat flour: Enhancing the degree of separation and characterization analysis. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 90. Article number: 103493. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103493>.
- Mo, Z., Liu, Q., Xie, W., Ashraf, U. et al. 2020. Ultrasonic seed treatment and Cu application modulate photosynthesis, grain quality, and Cu concentrations in aromatic rice. *Photosynthetica*, 58(3), pp. 682–691. DOI: <https://doi.org/10.32615/ps.2020.009>.
- Nguyen, C. H., Tikekar, R. H., Nitin, N. 2022. Combination of high-frequency ultrasound with propyl gallate for enhancing inactivation of bacteria in water and apple juice. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 82. Article number: 103149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103149>.
- Oliveira, G. A. R., Guimarães, J. T., Ramos, G. L. P. A., Esmerino, E. A. et al. 2022. Benefits of thermosonication in orange juice whey drink processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 75. Article number: 102876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102876>.
- Park, J.-S., Ha, J.-W. 2019. Ultrasound treatment combined with fumaric acid for inactivating food-borne pathogens in apple juice and its mechanisms. *Food Microbiology*, 84. Article number: 103277. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fm.2019.103277>.
- Xue, H., Wang, W., Wu, J., Xie, K. et al. 2024. Ultrasound assisted aqueous two-phase extraction of polysaccharides from corn stigma: Process optimization, structure characterization, and immunomodulatory activity. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 91. Article number: 103531. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103531>.
- Yaldagard, M., Mortazavi, S. A., Tabatabaie, F. 2008. Application of ultrasonic waves as a priming technique for accelerating and enhancing the germination of barley seed: Optimization of method by the Taguchi approach. *Journal of the Institute of Brewing*, 114(1), pp. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2008.tb00300.x>.
- Zhao, L., Poh, C. N., Wu, J., Zhao, X. et al. 2022. Effects of electrolysed water combined with ultrasound on inactivation kinetics and metabolite profiles of *Escherichia coli* biofilms on food contact surface. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 76. Article number: 102917. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102917>.
- Zhou, J., Wang, M., Barba, F. J., Zhu, Z. et al. 2023. A combined ultrasound + membrane ultrafiltration (USN-UF) process for enhancing saccharides separation from *Spirulina* (*Arthrospira platensis*). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 85. Article number: 103341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103341>.

Сведения об авторах

Карпенко Дмитрий Валерьевич – Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет, д-р техн. наук, профессор;
e-mail: karpenkov@mgu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7885-1150>

Dmitry V. Karpenko – 11 Volokolamskoe Shosse, Moscow, Russia, 125080;
Russian Biotechnological University, Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: karpenkov@mgu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7885-1150>

Гришин Артем Геннадиевич – Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет, ст. преподаватель;
e-mail: grishin3@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2360-3149>

Artem G. Grishin – 11 Volokolamskoe Shosse, Moscow, Russia, 125080;
Russian Biotechnological University, Senior Lecturer;
e-mail: grishin3@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2360-3149>

Прудник Тимофей Васильевич – Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет, студент;
e-mail: timofei.prudnik@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8142-7927>

Timofej V. Prudnik – 11 Volokolamskoe Shosse, Moscow, Russia, 125080;
Russian Biotechnological University, Student;
e-mail: timofei.prudnik@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8142-7927>