



Ультразвуковое кавитационное воздействие на гетерогенные системы со сплошной жидкой фазой при повышенных температурах

В.Н. Хмелёв*, А.Н. Сливин*, Р.Н. Голых*✉, А.Р. Барсуков*, Ж.-Б. Карра**

*Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного
технического университета им. И.И. Ползунова, Бийск, Российская Федерация

**Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация. Целью работы являлось изучение возможностей повышения эффективности воздействия ультразвуковыми колебаниями на жидкие среды при повышенной температуре. Проведены исследования функциональных возможностей технологического аппарата при повышении эффективности процессов в жидких средах, граничащих с газовой фазой, за счет обеспечения кавитационного ультразвукового воздействия при повышенных температурах до 60 °С и более (вплоть до 75 °С). Показана необходимость согласования выходных параметров электронного генератора с колебательной системой с учетом влияния температуры на свойства обрабатываемых сред для обеспечения максимального ультразвукового воздействия. Результаты исследования влияния повышенных температур обрабатываемых сред на изменения основных параметров аппарата позволили установить оптимальные режимы согласования электронного генератора и ультразвуковой колебательной системы и обеспечить возможность применения ультразвуковой технологии для решения задач повышения эффективности процессов в лабораторных и производственных условиях. Экспериментально подтверждена возможность увеличения межфазной поверхности границы жидкой и газовой фаз в вязких средах за счет снижения затухания капиллярных волн при повышении температуры. Проведенные исследования подтвердили возможность практического применения ультразвуковых технологий как интенсифицирующего фактора при повышенных температурах для обеспечения максимальной эффективности интенсификации процессов, протекающих в жидких средах в кавитационном режиме с интенсивностью от 15 Вт/см² при температурах в диапазоне 55–75 °С, что открывает перспективы для дальнейшего совершенствования подходов к реализации технологических процессов.

Ключевые слова: ультразвук, кавитация, межфазная граница, обработка сред, интенсификация процессов

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00278, <https://rscf.ru/project/23-12-00278/>.

Для цитирования: Хмелёв В.Н., Сливин А.Н., Голых Р.Н., Барсуков А.Р., Карра Ж.-Б. Ультразвуковое кавитационное воздействие на гетерогенные системы со сплошной жидкой фазой при повышенных температурах // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2026. Т. 16. N 2. С. 277–286. DOI: 10.21285/achb.1030. EDN: KXROQX.

Ultrasonic cavitation in heterogeneous systems with a continuous liquid phase at elevated temperatures

Vladimir N. Khmelev*, Alexey N. Slivin*, Roman N. Golykh*✉,
Aleksandr R. Barsukov*, Jean-Bastien Carrat**

*Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Biysk, Russian Federation

**Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. The study explores the feasibility of enhancing the impact of ultrasonic vibrations on liquid media at elevated temperatures. To intensify processes at the gas-liquid interface through ultrasonic cavitation at temperatures of up to 60–75°C, the functional capabilities of the equipment were investigated. It is shown that generator output parameters must be matched with the oscillatory system, factoring in temperature-induced changes in the medium's properties to ensure maximum ultrasonic impact. The study of how elevated temperatures affect key equipment parameters helped to establish the optimal matching modes between the generator and the ultrasonic oscillatory system. This enables the application of ultrasonic technology to improve process efficiency in both laboratory and industrial settings. Empirical results confirm that the gas-liquid interfacial area in viscous media can be increased by reducing the attenuation of capillary waves as the temperature rises. The findings validate the practical application of ultrasonic technologies as an intensifying factor at elevated temperatures. This approach ensures maximum intensification of processes occurring in liquid media during cavitation at temperatures of 55–75°C and intensities starting from 15 W/cm², which opens new prospects for optimizing technological processes.

Keywords: ultrasound, cavitation, phase boundary, ultrasonic processing, process intensification

Funding. The Russian Science Foundation supported this work (grant no. 23-12-00278, <https://rscf.ru/project/23-12-00278/>).

For citation: Khmelev V.N., Slivin A.N., Golykh R.N., Barsukov A.R., Carrat J.-B. Ultrasonic cavitation in heterogeneous systems with a continuous liquid phase at elevated temperatures. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2026;16(2):277-286. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.1030. EDN: KXROQX.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что воздействие ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности (более 15 Вт/см²) за счет обеспечения режима развитой кавитации в жидкой или гетерогенной среде с жидкой фазой позволяет повысить эффективность различных технологических процессов, таких как абсорбция, дегазация, экстракция, эмульгирование, гомогенизация, стерилизация и др. [1–12]. Во многих случаях, где это допустимо, максимальный эффект ультразвукового воздействия обеспечивается при обработке сред при повышенной температуре от 55 до 75 °С, поскольку при таких температурах снижается вязкость жидкости [13, 14], что уменьшает затухание всех волновых и других периодических процессов, возникающих на микроуровне. При этом повышение температуры дополнительно ускоряет многие химические и биотехнологические процессы.

В частности, повышение температуры ускоряет химические реакции, включая поверхностные [15, 16]. Что касается биотехнологических процессов, изучение бактерицидного и гомогенизирующего воздействий при обработке сырого молока [17], оказываемых ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности, позволило установить, что приемлемый уровень инактивации микроорганизмов наблюдается лишь при сочетании ультразвуковой обработки и нагрева

молока до 55 °С. Аналогичные результаты получены при повышении эффективности процессов экстракции при производстве морсов [18].

Другой пример – действие ультразвука на экстинции пантовых водных экстрактов. По лечебно-бальнеологическому эффекту и микробиологическим показателям необходимо проводить экстракцию ультразвуковыми колебаниями с одновременной пастеризацией не менее 45 мин при температуре в диапазоне 65–75 °С [19–21]. Именно данный температурный режим при массе навески пантов, равной ~200 г, позволяет снизить высокий показатель экстинции, являющийся токсичным для человека, и достичь лечебно-бальнеологической концентрации. Согласно данным публикации [19], показатель экстинции снижается с 0,40–0,45 до 0,12–0,25. Анализ представленных и других известных технологий свидетельствует о том, что применение ультразвуковых колебаний является перспективной технологией модифицирования растительных белков для разработки инновационных пищевых ингредиентов и новых продуктов питания [22].

Кроме того, ультразвуковые колебания в сочетании с повышенной температурой вызывают модификации функциональных свойств пищевых белков (гелеобразование), значительно (в 10 и более раз) уменьшают вязкость, увеличивают предел растворимости, увеличивают гидрофобность, уменьшают размер частиц и

ускоряют стерилизацию пищевых продуктов. Таким образом, применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности при температурах от 65 до 75 °С имеет важное значение для повышения эффективности процессов экстракции, пастеризации, стерилизации и т.п.

Основная проблема ультразвукового воздействия при повышенных температурах заключается в сниженной активности кавитации до 1,5 раза и более (активность кавитации пропорциональна энергии схлопывания пузырьков) [23]. Сниженная активность кавитации приводит к необходимости максимальной концентрации энергии колебаний, формируемой электронным генератором в среде. Большинство существующих ультразвуковых технологических аппаратов, к сожалению, работает в нерезонансном режиме и не обладает системой автоподстройки частоты [1, 3, 6, 9].

В связи с этим необходим поиск путей повышения эффективности ультразвукового технологического оборудования с целью концентрации максимальной доли энергии схлопывания кавитационных пузырьков в озвучиваемой среде при повышенных температурах. На разработку путей повышения эффективности данного оборудования направлены исследования, далее описанные в статье.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В настоящее время наибольшее распространение для реализации технологических процессов в жидких и жидкодисперсных средах получил ультразвуковой аппарат «Волна-М» (модель УЗТА1/22-ОРв), показанный на рис. 1. Данный аппарат предназначен для работы при нормальных условиях, обладает системой фазовой автоподстройки частоты при изменении акустического импеданса среды и позволяет обрабатывать вязкие жидкости [24–26]. Представленный аппарат был использован в описанных далее экспериментальных исследованиях влияния температуры на его акустические и электрические характеристики с целью выявления основных проблем реализации ультразвукового воздействия при повышенных температурах.



Рис. 1. Ультразвуковой технологический аппарат «Волна-М»

Fig. 1. "Volna-M" ultrasonic technological device

Исследуемый ультразвуковой аппарат имеет технические характеристики, приведенные в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики ультразвукового аппарата «Волна-М»

Table 1. Technical characteristics of the "Volna-M" ultrasonic device

Показатель	Значение
Мощность, ВА, не более	1000
Частота ультразвуковых колебаний, кГц	20±2
Питание от сети переменного тока напряжением, В	220±22
Интенсивность ультразвукового воздействия, Вт/см², не менее	15
Время непрерывной работы, ч	8
Габаритные размеры:	
электронный генератор, мм	430×290×115
колебательная система, мм	Ø100×450
диаметр рабочего инструмента, мм	40

В состав ультразвукового технологического аппарата входит электронный генератор, позволяющий преобразовать напряжение сети промышленной частоты 50 Гц в электрические колебания ультразвуковой частоты 20 кГц для питания ультразвукового излучателя (пьезоэлектрической ультразвуковой колебательной системы) [25]. Электронный генератор имеет систему фазовой автоматической подстройки частоты для обеспечения стабильной работы колебательной системы на резонансной частоте при возможных изменениях параметров обрабатываемых технологических сред. В состав генератора входит также система автоматического поддержания задаваемой амплитуды колебаний.

Пьезоэлектрическая ультразвуковая колебательная система, входящая в состав аппарата, выполнена по трехполуволновой конструктивной схеме [26]. Основным элемент ультразвуковой колебательной системы – преобразователь с четырьмя пьезоэлектрическими кольцевыми элементами (пьезокерамика PZT-8, или P-85), выполненный по полуволновой конструктивной схеме (схеме Ланжевена). Второй элемент колебательной системы – промежуточное бустерное звено, предназначенное для усиления амплитуды колебаний и имеющее специальный фланец для крепления ультразвуковой колебательной системы в проточные, или закрытые технологические объемы. Третий элемент ультразвуковой колебательной системы – это концентратор, выполненный по полуволновой схеме, заканчивающийся рабочим дисковым инструментом диаметром 40 мм, предназначенным для введения колебаний в обрабатываемую жидкую или жидкодисперсную среду в технологическом объеме.

Поскольку рабочий инструмент и часть колебательной системы в процессе эксплуатации находятся в обрабатываемой среде определенной плотности и вязкости в технологическом объеме, формируют и излучают в нее ультразвуковые колебания, обрабатываемая среда оказывает существенное влияние на параметры колебательной системы. Питание колебательной системы от электронного генератора должно обеспечивать ее работу на собственной резонансной частоте и с заданной амплитудой колебаний. В связи с этим одной из основных задач при создании и настройке ультразвукового оборудования является согласование выходного колебательного контура ультразвукового генератора с

ультразвуковой колебательной системой, параметры которой существенно изменяются при изменении свойств обрабатываемых сред. При этом согласование должно осуществляться с учетом не только воздействия физических свойств технологической среды, таких как нагрузки на колебательный контур ультразвукового генератора, но и влияния изменяющейся в течение нескольких часов обработки технологической жидкости [27], температуры среды и рабочей температуры нагревающегося при эксплуатации ультразвукового преобразователя.

Основная проблема заключается в том, что при нагреве жидкой технологической среды до температуры 75 °С происходит изменение физических свойств жидкости, оказывающих влияние на энергетические параметры основного действующего фактора ультразвукового воздействия – образование, накопление энергии и захлопывание парогазовых пузырьков в кавитационном облаке. Кроме этого происходит разогрев всех элементов ультразвуковой колебательной системы, в особенности пьезоэлектрического преобразователя.

В конечном счете все влияющие температурные факторы приводят к изменению емкости пьезоэлектрических элементов, добротности системы, скорости распространения и модуля упругости металлов, а также емкости выходного колебательного контура электронного генератора ультразвукового технологического аппарата, то есть к рассогласованию электронного генератора и колебательной системы, уменьшению амплитуды ее колебаний и существенному уменьшению вводимой в обрабатываемые среды энергии.

В табл. 2 представлены результаты измерений основных параметров ультразвуковой колебательной системы и электронного генератора при проведении экспериментальных исследований по обработке жидких сред в течение нескольких часов работы при изменениях температуры обрабатываемой среды от 22 до 75 °С.

Необходимо отметить, что температура на внешней поверхности пьезокерамических элементов ультразвукового преобразователя колебательной системы также достигала максимально возможных значений, после чего выходила на стабильное постоянное значение 80–85 °С.

Из представленных результатов измерений следует, что с увеличением температуры в связи с изменением физических свойств обрабатываемой технологической среды и кавитационного процесса при воздействии на жидкость в замкнутом объеме происходит уменьшение резонансной частоты колебательной системы и рост ее добротности и амплитуды колебаний. Таким образом, повышение температуры обрабатываемой технологической среды уменьшает нагрузку на ультразвуковую колебательную систему, что приводит к уменьшению полного (активного и реактивного) сопротивления ультразвуковой колебательной системы, увеличению добротности всей ультразвуковой колебательной системы и, как следствие, увеличению амплитуды колебаний рабочего инструмента. В связи с этим с увеличением температуры среды до 75 °С система стабилизации амплитуды колебаний ультразвуковой колебательной системы, предусмотренная в электронном генераторе, за счет контроля параметров контура и ультразвуковой колебательной системы осуществляет стабилизацию амплитуды. При этом активная потребляемая мощность

Таблица 2. Результаты экспериментальных исследований параметров ультразвуковой колебательной системы и генератора

Table 2. Results of experimental studies of the ultrasonic oscillating system and generator parameters

Параметр	Время работы аппарата, ч		
	0	1	2
Температура обрабатываемой среды, °С	24	67	75
Температура внешней поверхности пьезокерамики, °С	24	56	85
Резонансная частота системы, Гц	18953	18849	18756
Полное сопротивление системы, Ом	48	40	34
Добротность системы	1322	1517	1685
Ток в системе (пропорционально амплитуде колебаний), мА	130	165	200
Потребляемая генератором активная мощность, Вт	680	525	450

технологического аппарата снижается с 680 до 450 Вт при длительности работы аппарата в течение 2 ч.

Работа системы фазовой автоматической подстройки частоты и системы стабилизации амплитуды колебательной системы в технологической среде при изменении температуры, плотности или вязкости используемой технологической среды не обеспечивает оптимального согласования колебательного контура, то есть максимально возможного вывода энергии из генератора в ультразвуковую колебательную систему, стабильности работы ультразвукового электронного генератора и, как следствие, максимальной эффективности протекания в течение длительного времени всего технологического процесса экстракции, пастеризации, стерилизации и т.д.

Далее описаны пути увеличения эффективности ультразвукового воздействия при повышенной температуре. Целесообразность данного решения подтверждается принципиальной возможностью реализации процесса экстракции сырья животного происхождения (рог марала) при повышенных температурах 60–75 °С (наличие повышенных температур является принципиально необходимым, чтобы обеспечить нужные микробиологические показатели) [19]. Результаты были получены в водной технологической среде при извлечении пантовых водных экстрактов с применением установки «Пант-Эра 250».

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Пути повышения эффективности ультразвукового воздействия при повышенных температурах. Для эксплуатации ультразвуковых аппаратов в номинальном режиме и обеспечения максимально эффективного воздействия необходимо обеспечивать согласование электронного генератора и колебательной системы с учетом теплового режима эксплуатации.

Согласование генератора и колебательной системы предлагается реализовать двумя способами.

1. В случае, когда в процессе эксплуатации происходит изменение параметров обрабатываемых сред, обусловленное одновременно кавитационным и тепловым воздействием (при получении новых материалов или направленном изменении свойств обрабатываемых сред), необходимо обеспечивать непрерывную перестройку выходного каскада электронного генератора в соответствии с изменениями электрических параметров пьезоэлектрической колебательной системы. В таком случае одновременно с автоподстройкой частоты и стабилизацией амплитуды необходимо обеспечивать равенство активного и реактивного выходного сопротивления электронного генератора и сопротивления колебательной системы. На практике это реализуется в аппаратах большей мощности типа «Булава» [25, 26] при помощи перестраиваемых индуктивных элементов выходного каскада электронного генератора.

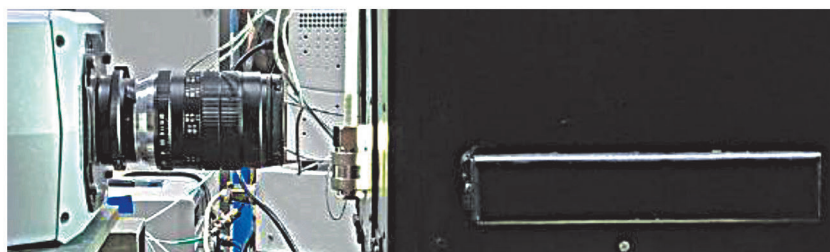
2. В случае, когда в процессе эксплуатации изначально задается необходимая температура реализуемого процесса и эта температура стабилизируется для обеспечения требуемого качества получаемого конечного продукта, необходимо обеспечить максимально эффективную работу аппарата при заданной температуре. В такой ситуации в ходе реализации процесса не происходит существенного изменения параметров обрабатываемых сред и колебательной системы. Это означает, что достаточно обеспечить оптимальное согласование генератора и колебательной системы при задаваемой температуре реализуемого процесса. В таком случае снижается универсальность предлагаемого оборудования, которая может быть

устранена методическими рекомендациями по эксплуатации аппаратов при исходных пониженных температурах при максимально установленной изначально мощности и понижении ее в процессе эксплуатации вручную при увеличении температуры процесса.

Эффективность реализации предложенного пути повышения эффективности была экспериментально проверена при реализации различных технологических процессов. Один из проведенных экспериментов заключался в увеличении межфазной поверхности «газ – вязкая жидкость». Дальнейший акцент внимания на данном эксперименте осуществлен по причине того, что данный процесс не реализуется при нормальных условиях из-за быстрого затухания капиллярных волн на границе вязкой жидкости [28], но при этом реализуется при повышенных температурах.

Экспериментальные исследования ультразвука на межфазную поверхность при повышенной температуре. Для проведения экспериментов был создан специализированный стенд, представленный на рис. 2. Стенд включает ультразвуковой аппарат с излучателем и технологическим объемом, заключенным в специальную термокамеру. Фиксация изображения межфазной поверхности осуществлялась с помощью высокоскоростной камеры Photron FASTCAM SA-Z.

Эксперименты проводились для водно-глицеринового раствора. Результаты экспериментов отражены на рис. 2. Повышение температуры приводит к снижению вязкости [13]. Проведенные исследования с помощью скоростной киносъемки позволили установить возможность реализации капиллярных возмущений при различных температурах (см. рис. 2).



Photron FASTCAM SA-Z

Термокамера

Технологический объем

Ультразвуковой излучатель



Рис. 2. Технологический объем с камерой для высокоскоростной киносъемки

Fig. 2. Technological volume with camera for high-speed imaging

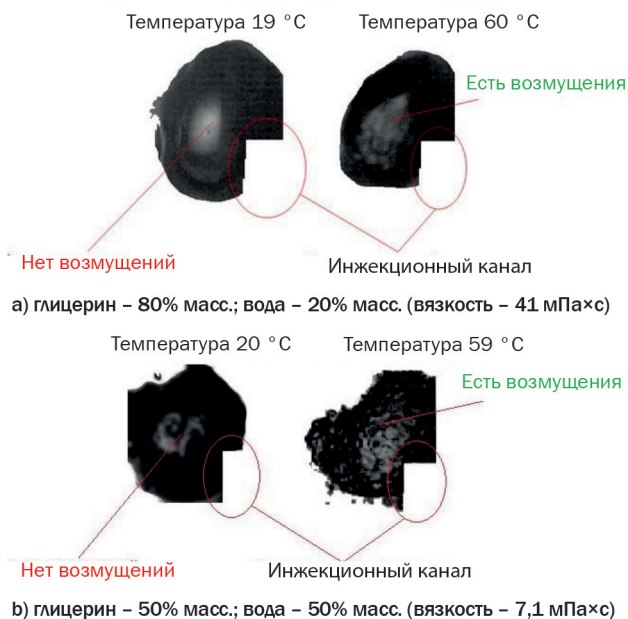


Рис. 3. Результаты исследования возможности повышения предельной вязкости исходной жидкости (изображения аэрационного пузырька в жидкости условным диаметром 5–7 мм)

Fig. 3. Results of studies on the possibility of increasing the maximum viscosity of the initial liquid (images of air bubble in liquid, bubble equivalent diameter is 5–7 mm)

Представленный рисунок свидетельствует о возможности повышения предельной вязкости, при которой имеет место эффект увеличения межфазной поверхности (наличие волнообразных возмущений), за счет повышения температуры с 20 до 55–60 °С. Например, при массовой концентрации глицерина 80% в водном растворе при температуре 19 °С эффекта практически не наблюдается, а при температуре 60 °С (та же интенсивность ультразвукового воздействия от 5 Вт/см²) наблюдаются возмущения на поверхности аэрационного пузырька. При массовой концентрации глицерина 50% происходит увеличение межфазной поверхности не менее чем в 1,3 раза.

Увеличение межфазной поверхности возникает несмотря на наличие двух взаимоисключающих факторов:

- снижение интенсивности кавитации при повышении температуры;

- уменьшение декремента затухания капиллярных волн за счет снижения вязкости при повышении температуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гумаров Г.С., Коновалов В.В., Сагингаиева А.Г. Классификация и аспекты применения в пищевых системах ультразвуковых технических средств // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2022. Т. 11. N 4. С. 128–136. EDN: HNCWBE. DOI: 10.46548/21vek-2022-1160-0020.

2. Бурак Л.Ч. Современные методы консервирования, применяемые в пищевой промышленности. Обзор // The Scientific Heritage. 2022. N 89. С. 106–124. EDN: CLHMWH. DOI: 10.5281/zenodo.6575888.

При этом, как уже говорилось, повышение температуры способно ускорять также химические реакции [15, 16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов проведенных исследований функциональных возможностей ультразвуковых технологических аппаратов, предназначенных для повышения эффективности процессов в жидких и гетерогенных средах с жидкой фазой (абсорбция, дегазация, экстракция, эмульгирование, стерилизация), показана необходимость согласования выходных параметров электронного генератора с колебательной системой с учетом влияния температуры на свойства обрабатываемых сред.

Результаты исследований влияния изменения основных параметров ультразвуковой колебательной системы при повышенных температурах в диапазоне свыше 50 °С на изменения основных параметров аппарата позволили выявить проблемы реализации воздействия.

Предложены пути повышения эффективности ультразвукового воздействия при повышенных температурах. С использованием предложенных путей установлена возможность увеличения поверхности раздела вязкой жидкости с газом несмотря на наличие двух взаимоисключающих факторов:

- снижение интенсивности кавитации при повышении температуры;
- уменьшение декремента затухания капиллярных волн за счет снижения вязкости при повышении температуры.

Например, при массовой концентрации глицерина в водном растворе 80% (вязкость – 41 мПа·с) и температуре 19 °С эффекта практически не наблюдается, а при температуре 60 °С (та же интенсивность ультразвукового воздействия от 5 Вт/см²) наблюдаются возмущения на поверхности аэрационного пузырька. При массовой концентрации глицерина 50% (вязкость – 7,1 мПа·с) отмечается увеличение межфазной поверхности не менее чем в 1,3 раза.

Реализация предложенных способов согласования обеспечила максимальную эффективность интенсификации процессов абсорбции, дегазации, экстракции, пастеризации, стерилизации в кавитационном режиме с интенсивностью от 5 Вт/см² при повышенных температурах в диапазоне 50–75 °С и позволила обеспечить возможность применения ультразвуковой технологии для решения задач повышения эффективности процессов в лабораторных и производственных условиях.

3. Бурак Л.Ч., Завалей А.П. Эффективность комбинированного воздействия ультразвука и микроволн при обработке пищевых продуктов. Обзор // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. N 2. С. 342–357. EDN: HYJQCX. DOI: 10.21603/2074-9414-2024-2-2510.

4. Gu R., Zhou R., Gao Sh., Guo H., Li Sh., Li Y., et al. Numerical analysis of multistage ultrasonic atomization enhanced ammonia-water falling film absorption // Applied Thermal Engineering. 2024. Vol. 257. P. 124438. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124438.

5. Tamidi A.M., Lau K.K., Ng L.H., Yusof S.M.M., Azmi N., Zakariya Sh., et al. Numerical modeling and economic analysis of ultrasonic-assisted CO₂ absorption process for offshore application // *Processes*. 2023. Vol. 11, no. 11. P. 3089. DOI: 10.3390/pr11113089.
6. Sharayei P., Azarpazhooh E., Zomorodi S., Einafshar S., Ramaswamy H.S. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of astaxanthin from green tiger (*Penaeus semisulcatus*) shrimp shell // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021. Vol. 76. P. 105666. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2021.105666.
7. Tang J., Zhu X., Dong G., Hannon S., Santos H.M., Sun D.-W., et al. Comparative studies on enhancing pea protein extraction recovery rates and structural integrity using ultrasonic and hydrodynamic cavitation technologies // *LWT*. 2024. Vol. 200. P. 116130. DOI: 10.1016/j.lwt.2024.116130.
8. Khadhraoui B., Ummat V., Tiwari B.K., Fabiano-Tixier A.S., Chemat F. Review of ultrasound combinations with hybrid and innovative techniques for extraction and processing of food and natural products // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021. Vol. 76. P. 105625. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2021.105625.
9. Udepurkar A.P., Clasen C., Kuhn S. Emulsification mechanism in an ultrasonic microreactor: Influence of surface roughness and ultrasound frequency // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2023. Vol. 94. P. 106323. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106323.
10. Romanova Y.N., Maryutina T.A., Musina N.S., Spivakov B.Ya. Application of ultrasonic treatment for demulsification of stable water-in-oil emulsions // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. Vol. 209. P. 109977. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109977.
11. Delmas H., Barthe L., Cleary R. Ultrasonic mixing, homogenization, and emulsification in food processing and other applications // *Power Ultrasonics. Applications of High-Intensity Ultrasound* / eds J.A. Gallego-Juárez, K.F. Graff, M. Lucas. Woodhead Publishing, 2023. P. 665–685. DOI: 10.1016/B978-0-12-820254-8.00020-8.
12. Tan W.K., Cheah S.C., Parthasarathy S., Rajesh R.P., Pang C.H., Manickam S. Fish pond water treatment using ultrasonic cavitation and advanced oxidation processes // *Chemosphere*. 2021. Vol. 274. P. 129702. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.129702.
13. Fogel'son R.L., Likhachev E.R. Temperature dependence of viscosity // *Technical Physics*. 2001. Vol. 46, no. 8. P. 1056–1059. DOI: 10.1134/1.1395131.
14. Li W., Li Zh., Han W., Li Y., Yan Sh., Zhao Q., et al. Measured viscosity characteristics of Fe₃O₄ ferrofluid in magnetic and thermal fields // *Physics of Fluids*. 2023. Vol. 35, no. 1. P. 012002. DOI: 10.1063/5.0131551.
15. Пушкин А.А., Леонтьев М.А., Римкевич В.С. Зона протекания гетерофазных физико-химических реакций // Математические исследования в естественных науках. 2014. N 11. С. 238–242. EDN: YQXOJN.
16. Takenaka N., Ueda A., Daimon T., Bando H., Dohmaru T., Maeda Y. Acceleration mechanism of chemical reaction by freezing: the reaction of nitrous acid with dissolved oxygen // *The Journal of Physical Chemistry*. 1996. Vol. 100, no. 32. P. 13874–13884. DOI: 10.1021/jp9525806.
17. Ахмадишина Л.Д., Крякунова Е.В. Перспективы применения ультразвука для улучшения качества молочной продукции // Пищевые технологии и биотехнологии: материалы XVIII Всерос. конф. с междунар. участием (г. Казань, 18–21 апреля 2023 г.). Казань: Изд-во КНИТУ, 2023. С. 721–725. EDN: IHHUGC.
18. Потороко И.Ю., Калинина И.В. Перспективы использования ультразвукового воздействия в технологии экстракционных процессов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2014. Т. 2. N 1. С. 42–47. EDN: RZCMMKX.
19. Гришаева И.Н., Хмелев В.Н., Галахов Н.Н. Исследование процесса ультразвуковой экстракции для приготовления пантовых ванн // Южно-Сибирский научный вестник. 2019. N 2. С. 199–203. EDN: QNQLYA. DOI: 10.25699/SSSB.2019.2(26).32550.
20. Калюжин А.С., Казарян К.А., Моргуль Е.В. Дезинфицирующая эффективность работы ультразвука высокой мощности в отношении энтеробактерий (обзор литературы) // Селекция и технология производства продукции животноводства: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (пос. Персиановский, 10 февраля 2021 г.). Персиановский: Изд-во Донского ГАУ, 2021. С. 78–82. EDN: IQKKTf.
21. Кондратенко В.В., Федосенко Т.В., Медведева Е.А., Наринянц Т.В., Пацюк Л.К., Лукьяненко М.В. Закономерности зависимостей плотностей фруктовых пюре от температуры // Садоводство и виноградарство. 2021. N 6. С. 51–58. EDN: FCNAHT. DOI: 10.31676/0235-2591-2021-6-51-58.
22. Бурак Л.Ч., Сапач А.Н. Влияние действия ультразвука на функциональные свойства растительных белков. Обзор предметного поля // Химия растительного сырья. 2024. N 4. С. 5–23. EDN: FPAZGJ. DOI: 10.14258/jcrpm.20240413599.
23. Котухов А.В., Красовский А.В., Шаплыко В.В., Дежкунов Н.В. Исследование зависимости активности акустической кавитации от температуры жидкости // Доклады БГУИР. 2015. N 6. С. 36–40. EDN: ZATLXV.
24. Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Барсуков Р.В., Хмелев М.В. Ультразвуковые аппараты для интенсификации процессов в системах с дисперсионной жидкой средой // Современные задачи инженерных наук: сборник науч. трудов VI Междунар. науч.-техн. симпозиума «Современные энерго- и ресурсосберегающие технологии СЭТТ – 2017» Междунар. науч.-техн. форума «Первые международные Косыгинские чтения – 2017» (г. Москва, 11–12 октября 2017 г.). М.: Изд-во РГУ им. А.Н. Косыгина, 2017. Т. 1. С. 268–271. EDN: YKWUOU.
25. Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Хмелев С.С., Цыганок С.Н. Ультразвук. Аппараты и технологии: монография. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2015. 687 с.
26. Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Нестеров В.А. Пути развития пьезоэлектрических преобразователей для увеличения мощности // Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы: материалы Междунар. науч. конф. (г. Витебск, 25–28 мая 2021 г.). Витебск: Изд-во ВГТУ, 2021. С. 82–85. EDN: GKHNDM.
27. Голых Р.Н., Хмелёв В.Н., Шалунов А.В., Боброва Г.А., Нестеров В.А., Титов Г.А. Выявление оптимальных условий ультразвуковой кавитационной обработки высоковязких и неньютоновских жидких сред // Ползуновский вестник. 2017. N 4. С. 123–128. EDN: YLWWOR.
28. Golykh R.N. Generalized functions of slow growth problem statement for capillary wave formation in gas-liquid interface under ultrasonic cavitation // *Mathematical notes of NEFU*. 2025. Vol. 32, no. 2. P. 65–80. EDN: NHONUF. DOI: 10.25587/2411-9326-2025-2-65-80.

REFERENCES

1. Gumarov G.S., Konovalov V.V., Sagingalieva A.G. Classification and aspects of application of ultrasonic technical means in food systems. *XXI Century: Past Results and Present Problems Plus*. 2022;4:128-136. (In Russian). EDN: HNCWBE. DOI: 10.46548/21vek-2022-1160-0020.
2. Burak L.Ch. Modern preserving methods used in the food industry. Review. *The Scientific Heritage*. 2022;89(89):106-124. (In Russian). EDN: CLHMWH. DOI: 10.5281/zenodo.6575888.
3. Burak L.Ch., Zavaley A.P. Combined ultrasound and microwave food processing: efficiency review. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2024;54(2):342-357. (In Russian). EDN: HYJQCX. DOI: 10.21603/2074-9414-2024-2-2510.
4. Gu R., Zhou R., Gao S., Guo H., Li S., Li Y., et al. Numerical analysis of multistage ultrasonic atomization enhanced ammonia-water falling film absorption. *Applied Thermal Engineering*. 2024;257:124438. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124438.
5. Tamidi A.M., Lau K.K., Ng L.H., Yusof S.M.M., Azmi N., Zakariya Sh., et al. Numerical modeling and economic analysis of ultrasonic-assisted CO₂ absorption process for offshore application. *Processes*. 2023;11(11):3089. DOI: 10.3390/pr11113089.
6. Sharayei P., Azarpazhooh E., Zomorodi S., Einafshar S., Ramaswamy H.S. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of astaxanthin from green tiger (*Penaeus semisulcatus*) shrimp shell. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;76:105666. DOI: 10.1016/j.ultrsonch.2021.105666.
7. Tang J., Zhu X., Dong G., Hannon S., Santos H.M., Sun D.-W., et al. Comparative studies on enhancing pea protein extraction recovery rates and structural integrity using ultrasonic and hydrodynamic cavitation technologies. *LWT*. 2024;200:116130. DOI: 10.1016/j.lwt.2024.116130.
8. Khadhraoui B., Ummat V., Tiwari B.K., Fabiano-Tixier A.S., Chemat F. Review of ultrasound combinations with hybrid and innovative techniques for extraction and processing of food and natural products. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;76:105625. DOI: 10.1016/j.ultrsonch.2021.105625.
9. Udepurkar A.P., Clasen C., Kuhn S. Emulsification mechanism in an ultrasonic microreactor: Influence of surface roughness and ultrasound frequency. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2023;94:106323. DOI: 10.1016/j.ultrsonch.2023.106323.
10. Romanova Y.N., Maryutina T.A., Musina N.S., Spivakov B.Ya. Application of ultrasonic treatment for demulsification of stable water-in-oil emulsions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022;209:109977. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109977.
11. Delmas H., Barthe L., Cleary R. Ultrasonic mixing, homogenization, and emulsification in food processing and other applications. In: Gallego-Juárez J.A., Graff K.F., Lucas M. (eds). *Power Ultrasonics. Applications of High-Intensity Ultrasound*. Woodhead Publishing; 2023, p. 665-685. DOI: 10.1016/B978-0-12-820254-8.00020-8.
12. Tan W.K., Cheah S.C., Parthasarathy S., Rajesh R.P., Pang C.H., Manickam S. Fish pond water treatment using ultrasonic cavitation and advanced oxidation processes. *Chemosphere*. 2021;274:129702. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.129702.
13. Fogel'son R.L., Likhachev E.R. Temperature dependence of viscosity. *Technical Physics*. 2001;46(8):1056-1059. DOI: 10.1134/1.1395131.
14. Li W., Li Zh., Han W., Li Y., Yan Sh., Zhao Q., et al. Measured viscosity characteristics of Fe₃O₄ ferrofluid in magnetic and thermal fields. *Physics of Fluids*. 2023;35(1):012002. DOI: 10.1063/5.0131551.
15. Pushkin A.A., Leontev M.A., Rimkevich V.S. Zone of heterophase physicochemical reactions. *Matematicheskie issledovaniya v estestvennykh naukakh*. 2014;11:238-242. (In Russian). EDN: YQXOJN.
16. Takenaka N., Ueda A., Daimon T., Bandow H., Dohmaru T., Maeda Y. Acceleration mechanism of chemical reaction by freezing: the reaction of nitrous acid with dissolved oxygen. *The Journal of Physical Chemistry*. 1996;100(32):13874-13884. DOI: 10.1021/jp9525806.
17. Akhmadishina L.D., Kryakunova E.V. The ultrasound application prospects to improve the quality of dairy products. In: *Food technologies and biotechnologies: Proc. 18th All-Russ. Conf. with Int. Part*. 18–21 April 2023, Kazan. Kazan: Kazan National Research Technological University; 2023, p. 486-489. (In Russian). EDN: IHHUGC.
18. Potoroko I.Yu., Kalinina I.V. Prospects of using ultrasound in extraction technology. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Food and Biotechnology"*. 2014;2(1):42-47. (In Russian). EDN: RZCMKX.
19. Grishaeva I.N., Khmelev V.N., Galahov N.N. Research of ultrasound extraction process for preparation of pant bathtubs. *South-Siberian Scientific Bulletin*. 2019;2:199-203. (In Russian). EDN: QNQLYA. DOI: 10.25699/SSSB.2019.2(26).32550.
20. Kaljuzhin A.S., Kazaryan K.A., Morgul E.V. Disinfecting efficiency of high power ultrasonic work against enterobacteria (literature review). In: *Breeding and technology of livestock production: Proc. Int. Sci. Pract. Conf.* 10 February 2021, Persianovsky. Persianovsky: Don State Agrarian University; 2021, p. 78-82. (In Russian). EDN: IQKKTf.
21. Kondratenko V.V., Fedosenko T.V., Medvedeva E.A., Nariniyants T.V., Patsyuk L.K., Lukyanenko M.V. Thermal dependencies of fruit puree density. *Horticulture and Viticulture*. 2021;6:51-58. (In Russian). EDN: FCNAHT. DOI: 10.31676/0235-2591-2021-6-51-58.
22. Burak L.Ch., Sapach A.N. Influence of ultrasound on the functional properties of plant proteins. Review of the subject field. *Chemistry of plant raw material*. 2024;4:5-23. (In Russian). EDN: FPAZGJ. DOI: 10.14258/jcprm.20240413599.
23. Kotukhov A.V., Krasovskiy A.V., Shaplyka V.V., Dezhkunov N.V. Study into dependence of cavitation activity on liquid temperature. *Doklady BGUIR*. 2015;6:36-40. (In Russian). EDN: ZATLXV.
24. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Barsukov R.V., Khmelev M.V. Ultrasonic devices for intensification of processes in systems with dispersion liquid medium. In: *Modern tasks of engineering sciences: Proc. 6th Int. Sci. Tech. Symp. "Modern energy- and resource-saving technologies of SETT – 2017" International Scientific and Technical Forum "The first international Kosygin Readings – 2017"*. 11–12 October 2017, Moscow. Moscow: A.N. Kosygin Russian State University; 2017, vol. 1, p. 268-271. (In Russian). EDN: YKWUOU.

25. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Khmelev S.S., Tsyganok S.N. *Devices and technologies*. Barnaul: Polzunov Altai State Technical University; 2015, 687 p. (In Russian).

26. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A. Ways to develop piezoelectric transducers to increase power. In: *Technical Acoustics: Developments, Problems, Prospects: Proc. Int. Sci. Conf.* 25–28 May 2021, Vitebsk. Vitebsk: Vitebsk State Technological University; 2021, p. 82-85. (In Russian). EDN: GKHNDM.

27. Golykh R.N., Khmelev V.N., Shalunov A.V., Bobrova G.A., Nesterov V.A., Titov G.A. Identification of optimal conditions for ultrasonic cavitation treatment of high-viscosity and non-newtonian liquids. *Polzunovskiy vestnik*. 2017;4:123-128. (In Russian). EDN: YLWWOR.

28. Golykh R.N. Generalized functions of slow growth problem statement for capillary wave formation in gas-liquid interface under ultrasonic cavitation. *Mathematical notes of NEFU*. 2025;32(2):65-80. EDN: NHONUF. DOI: 10.25587/2411-9326-2025-2-65-80.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хмелёв Владимир Николаевич,

д.т.н., профессор,
заместитель директора по научной работе,
Бийский технологический институт (филиал)
Алтайского государственного технического
университета им. И.И. Ползунова,
659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27,
Российская Федерация,
vnh@bti.secna.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7089-3578>

Сливин Алексей Николаевич,

к.т.н., доцент, доцент,
Бийский технологический институт (филиал)
Алтайского государственного технического
университета им. И.И. Ползунова,
659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27,
Российская Федерация,
san@bti.secna.ru
<https://orcid.org/0009-0007-0207-3579>

Гольх Роман Николаевич,

д.т.н., ведущий научный сотрудник,
Бийский технологический институт (филиал)
Алтайского государственного технического
университета им. И.И. Ползунова,
659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27,
Российская Федерация,
✉ grn@bti.secna.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7708-0665>

Барсуков Александр Романович,

старший преподаватель,
Бийский технологический институт (филиал)
Алтайского государственного технического
университета им. И.И. Ползунова,
659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27,
Российская Федерация,
barsukov.ar@bti.secna.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3804-3340>

Карра Жан-Бастьен,

доктор наук, научный сотрудник,
Институт гидродинамики
им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, г. Новосибирск, пр. Академика
Лаврентьева, 15, Российская Федерация,
jb.carrat@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-2335-4675>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir N. Khmelev,

Dr. Sci. (Engineering), Professor,
Deputy Director for Research,
Biysk Technological Institute (branch)
of the Altay State Technical University,
27, Trofimov St., Biysk, 659305,
Russian Federation,
vnh@bti.secna.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7089-3578>

Alexey N. Slivin,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Associate Professor,
Biysk Technological Institute (branch)
of the Altay State Technical University,
27, Trofimov St., Biysk, 659305,
Russian Federation,
san@bti.secna.ru
<https://orcid.org/0009-0007-0207-3579>

Roman N. Golykh,

Dr. Sci. (Engineering), Leading Researcher,
Biysk Technological Institute (branch)
of the Altay State Technical University,
27, Trofimov St., Biysk, 659305,
Russian Federation,
✉ grn@bti.secna.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7708-0665>

Aleksandr R. Barsukov,

Senior Lecturer,
Biysk Technological Institute (branch)
of the Altay State Technical University,
27, Trofimov St., Biysk, 659305,
Russian Federation,
barsukov.ar@bti.secna.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3804-3340>

Jean-Bastien Carrat,

Ph.D., Researcher,
Lavrentyev Institute of Hydrodynamics,
Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences,
15, Akademik Lavrentev Ave., Novosibirsk, 630090,
Russian Federation,
jb.carrat@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-2335-4675>

Вклад авторов

В.Н. Хмелёв – разработка концепции, научное руководство, предоставление ресурсов.
А.Н. Сливин – разработка методологии, курирование данных, проведение исследования, редактирование рукописи.
Р.Н. Голых – формальный анализ, валидация результатов.
А.Р. Барсуков – визуализация, написание черновика рукописи.
Ж.-Б. Карра – разработка программного обеспечения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 14.07.2025.
Одобрена после рецензирования 08.11.2025.
Принята к публикации 02.04.2026.

Contribution of the authors

Vladimir N. Khmelev – conceptualization, supervision, resources.
Alexey N. Slivin – methodology, data curation, investigation, editing.
Roman N. Golykh – formal analysis, validation.
Aleksandr R. Barsukov – visualization, writing – original draft.
Jean-Bastien Carrat – software.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 14.07.2025.
Approved after reviewing 08.11.2025.
Accepted for publication 02.04.2026.