

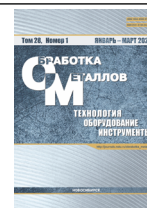
НГТУ



НЭТИ

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Особенности ультразвуковой обработки жидких сред и дисперсных систем различной вязкости

Сергей Сундуков *

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Ленинградский проспект, 64, г. Москва, 125319, Россия

 <https://orcid.org/0000-0003-4393-4471>,  sergey-lefmo@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 534-8 + 621.9.048.6

История статьи:

Поступила: 13 ноября 2025

Рецензирование: 01 декабря 2025

Принята к печати: 17 декабря 2025

Доступно онлайн: 15 марта 2026

Ключевые слова:

Ультразвук

Кавитация

Акустические потоки

Дисперсные системы

Вязкость

Обработка

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00013, <https://rscf.ru/project/25-29-00013/>.

АННОТАЦИЯ

Введение. Дисперсные системы типа «твердые частицы в жидкой среде» имеют широкое распространение в машиностроении и применяются в технологических процессах получения соединений из металлических деталей, обеспечения качества поверхностного слоя, нанесения функциональных и защитных покрытий. Независимо от материала дисперсных частиц и матрицы основным требованием к рассматриваемым системам является однородность размеров дисперсной фазы и равномерность распределения в жидкой среде. В этом случае эффективным способом воздействия служит ультразвуковая обработка, которая позволяет за счет схлопывания кавитационных пузырьков диспергировать крупные образования или агломераты частиц при одновременном перемешивании компонентов акустическими потоками. Несмотря на наличие определенных достижений по отдельным системам, в настоящее время отсутствуют исследования, направленные на установление взаимосвязи свойств жидкой среды и дисперсной фазы с параметрами режима ультразвуковой обработки, которые определяют кавитационно-эрозионную активность и интенсивность акустических потоков. **Цель работы:** исследование влияния параметров ультразвуковой обработки жидких сред и дисперсных систем различной вязкости, направленное на установление взаимосвязи свойств обрабатываемой среды, режимов обработки, кавитационно-эрозионной активности и характера акустических течений. **В работе исследованы** модельные дисперсные системы вязкостью от 1 до 1395 мПа·с, полученные на основе смеси глицерина с водой различной концентрации с добавлением алмазной пыли и графитового порошка. **Методика исследований.** Для ультразвуковой обработки применялась стержневая магнитострикционная колебательная система с излучателем из сплава ВТ-3 и диаметром 30 мм. Для определения кавитационно-эрозионной активности использовались тест-объекты из алюминиевой фольги. Для сравнения кавитационных областей под торцом излучателя и определения начальной скорости акустического потока осуществлялась высокоскоростная съемка со скоростью 1212 кадров в секунду. При исследовании динамики распространения потока по всему обрабатываемому объему применялась съемка со скоростью 25 кадров в секунду. **Результаты и обсуждение.** Повышение вязкости жидкой среды и наличие в ней дисперсных частиц приводит к изменению кавитационной зоны под торцом излучателя, что, в свою очередь, изменяет условия образования акустического потока, который при обработке дисперсных систем образуется при меньших амплитудах ультразвуковых колебаний, чем в жидкостях. Начальные скорости акустических потоков для жидкостей и дисперсных систем различной вязкости находятся в диапазоне от 0,050 до 0,565 м/с. Из-за повышения поглощающей способности среды и роста потерь на поддержание кавитации начальная скорость для дисперсных систем ниже, чем для жидкостей, а при повышении амплитуды колебаний разница между значениями увеличивается. Картины эрозионных повреждений дисперсных систем отличаются наличием значительной площади с точечными повреждениями, являющимися следствием схлопывания кавитационных пузырьков вблизи частиц дисперсной фазы, распределенной по обрабатываемому объему. Высота зоны кавитационно-эрозионной активности составляет от 20 до 50 мм, при этом наибольшая площадь повреждений достигается при наименьшей скорости потока. Таким образом, режим обработки должен обеспечивать минимальную скорость потока, создающего силу, необходимую для подъема частиц и их агломератов со дна емкости, и при этом иметь высокую кавитационно-эрозионную активность, что обуславливает ограничение объема обрабатываемой дисперсной системы. Исследования динамики распространения акустического потока позволили установить закономерности движения потока и определить зависимости снижения его скорости при удалении от торца излучателя.

Для цитирования: Сундуков С.К. Особенности ультразвуковой обработки жидких сред и дисперсных систем различной вязкости // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 1. – С. 6–28. – DOI:10.17212/1994-6309-2026-28.1-6-28.

Введение

Дисперсные системы различного типа имеют огромную значимость в технологических процессах при производстве, ремонте и эксплуатации изделий машиностроения [1, 2]. От свойств дисперсной системы во многом зависит качество изделий в целом [3, 4].

*Адрес для переписки

Сундуков Сергей Константинович, к.т.н., доцент
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Ленинградский проспект, 64,
125319, г. Москва, Россия
Тел.: +7 926 369-19-70, e-mail: sergey-lefmo@yandex.ru

В данной работе объектом исследования является один из самых распространенных типов дисперсных систем – твердые частицы в жидкости. К технологическим процессам, основанным на применении таких дисперсных систем, можно отнести сварку и пайку [5, 6] – твердые частицы в жидком металле (примеси, неметаллические включения и зародыши кристаллизации); склеивание с использованием полимерных композиционных материалов, представляющих собой взвесь наполнителя в полимерной матрице [7–10]; нанесение защитных лакокрасочных покрытий (суспензий) [11, 12]; гидроабразивную и кавитационно-абразивную обработку [13, 14]. Учитывая масштабы применения дисперсных систем, исследования, направленные на интенсификацию процессов их получения, обладают высокой актуальностью.

Основным требованием к дисперсным системам является обеспечение равномерности структуры или распределения частиц дисперсной фазы по объему жидкой среды, что позволяет получить заданные эксплуатационные свойства [15, 16]. Значительная проблема технологии при этом заключается в необходимости диспергирования больших образований (например, дендритов в металле) или агломератов частиц дисперсной фазы (комков наполнителя в полимере), образованных в процессе их хранения под действием сил адгезии, которые возникают в результате межмолекулярного взаимодействия соприкасающихся частиц [17, 18]. При сварке или пайке дендриты снижают прочность и пластичность соединения [19–21].

При получении полимерных композиционных или лакокрасочных материалов агломераты из слипшихся частиц создают анизотропию свойств дисперсной системы и в то же время имеют тенденцию к осаждению под действием силы тяжести, что снижает концентрацию дисперсной фазы в основном объеме системы и изменяет ее свойства [22]. В связи с этим технологии обработки и получения различных дисперсных систем должны предусматривать диспергирование и разделение крупных образований при их равномерном распределении по объему.

Эффективным способом, позволяющим интенсифицировать такие процессы, является применение ультразвуковых колебаний, создающих в жидкости переменное звуковое давление.

Жидкость подвергается периодическому воздействию растягивающих и сжимающих сил, что приводит к возникновению *кавитации*, заключающейся в образовании разрывов сплошности в виде пузырьков, заполненных паром и газом [23, 24], которые пульсируют, объединяются в различные по размеру кавитационные образования или кластеры и схлопываются, создавая ударные волны и кумулятивные струи [25]. В момент схлопывания кавитационного пузырька давление может достигать $P_{\max} \approx 10^7 \dots 10^{11}$ Па, а температура составляет $3000 \dots 4000$ °C [26–28].

При введении ультразвуковых колебаний в реальные жидкости часть энергии теряется из-за влияния вязкости, вследствие чего волновая энергия будет ослабевать при отдалении от источника колебаний [29].

При поглощении волны количество движения, связанное с колебаниями частиц среды, передается ей, вызывая *акустические течения* [30, 31] различной масштабности. Характер акустических течений в первую очередь зависит от режима ультразвуковой обработки, который определяется амплитудой колебаний торца излучателя ξ_m . Так, при низкоамплитудном режиме обработки ($\xi_m < 10 \dots 12$ мкм для воды) крупномасштабные акустические течения фактически отсутствуют, а в кавитацию вовлекаются случайные участки озвучиваемого объема. Переход к высокоамплитудному режиму ($\xi_m > 10 \dots 12$ мкм) характеризуется возникновением крупномасштабного, направленного от торца излучателя гидродинамического потока и объясняется сильным поглощением акустической энергии в процессе развития кавитационной области у торцевой поверхности излучателя [32]. Таким образом, ультразвуковая обработка за счет кавитации позволяет диспергировать крупные образования и агломераты частиц, а за счет действия акустических потоков – осуществлять перемешивание и распределение дисперсной фазы по объему.

Существует достаточное количество исследований по ультразвуковой обработке дисперсных систем [например, 33–38], в том числе проводимых в лаборатории электрофизических методов обработки МАДИ [например, 39–44].

Несмотря на наличие определенных достижений по отдельным системам, в настоящее время отсутствуют исследования, направленные на установление взаимосвязи свойств жидкой сре-

ды и дисперсной фазы с параметрами режима ультразвуковой обработки, которые определяют кавитационно-эрозионную активность и интенсивность акустических потоков, что позволит осуществлять выбор режима ультразвуковой обработки дисперсных систем, основанный на системном подходе.

Исходя из этого, поставлена **цель работы** – исследование влияния параметров ультразвуковой обработки жидких сред и дисперсных систем различной вязкости, направленное на установление взаимосвязи свойств обрабатываемой среды, режимов обработки, кавитационно-эрозионной активности и характера акустических течений.

Для достижения цели сформулированы следующие **задачи исследования**.

1. Сравнение кавитационных областей, образующихся в жидкостях различной вязкости при добавлении дисперсной фазы.

2. Определение геометрии кавитационно-эрозионной области в зависимости от вязкости жидкой среды, наличия дисперсной фазы и амплитуды ультразвуковых колебаний.

3. Определение механизмов диспергирования частиц и их агломератов в жидкой среде при различных режимах ультразвуковой обработки.

4. Определение зависимостей изменения скорости акустических потоков от свойств обрабатываемой жидкой среды.

Методика исследований

Материалы

Для получения сред, имеющих различную вязкость, в качестве обрабатываемой жидкости использовалась смесь глицерина и воды различной концентрации: 0, 60, 85, 95, 98,5 и 100 %. Вязкость полученных сред измерялась ротационным вискозиметром Fungilab Expert L, для воды она составила 1 мПа · с, для глицерина – 10, 102, 497, 1010 и 1395 мПа · с.

При создании модельной дисперсной системы на 200 мл жидкости добавлялось 0,5 г алмазной пыли и 0,5 г графита фракцией 0...50 мкм. Незначительное количество и мелкий размер дисперсной фазы позволяет получить достаточно устойчивую суспензию с повышением вязкости по сравнению с чистой жидкостью менее 1 %, что далее позволяет пренебречь этими изменениями.

Схема обработки

Исследования ультразвуковой обработки полученных образцов проводились по общей схеме, представленной на рис. 1.

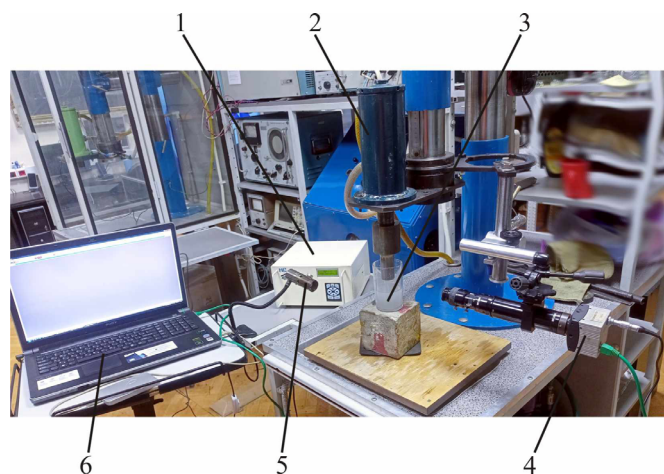


Рис. 1. Общая схема проведения эксперимента:

1 – ультразвуковой генератор; 2 – колебательная система; 3 – емкость с обрабатываемой средой; 4 – камера; 5 – освещение; 6 – компьютер

Fig. 1. General experimental setup:

1 – ultrasonic generator; 2 – oscillatory system; 3 – container with the medium being processed; 4 – chamber; 5 – lighting; 6 – computer

Излучатель из сплава ВТ-3 стержневой магнитострикционной колебательной системы 2 погружался в емкость 3 с подготовленной жидкой средой. Питание колебательной системы осуществлялось от ультразвукового генератора 1 с функцией автоматической подстройки частоты и амплитуды колебаний (УЗГ 2,0/22). Резонансная частота составляла $f = 19\,875$ Гц, а режим обработки определялся амплитудой колебаний на торце излучателя ξ_m , которая варьировалась от 5 до 25 мкм.

Этапы исследования

Сравнение эрозионной активности режимов ультразвуковой обработки в зависимости от свойств обрабатываемой среды

Для определения эрозионной активности использовались тест-объекты в виде фрагментов алюминиевой фольги 45×60 мм, размещаемые под излучателем соосно его оси и перпендикулярно его торцу.

Обработка проводилась на амплитудах ξ_m , равных 3, 5, 7, 10, 15, 20 и 25 мкм, в течение 10 с, что позволяет получить достаточное для

сравнения количество эрозионных повреждений при высоких вязкостях. Образцы фольги сканировались в высоком разрешении, затем их изображения преобразовывались в черно-белый формат для последующей компьютерной обработки.

Поскольку картина эрозионных повреждений определяется параметрами кавитационной области, возникающей в жидкой среде, то для описания полученных изменений проводилась высокоскоростная съемка таких областей жидкостей и дисперсных систем различной вязкости. Съемка осуществлялась на камеру Fastec Hисpec со следующими параметрами: скорость 1212 кадр/с, размер снимаемой области – 912×570 пикселей с размером 21,9 мкм.

Путем покадровой обработки полученных видеофрагментов также определялась начальная скорость акустического потока V_0 , за которую принималась скорость движения переднего фронта потока от торца излучателя за первые пять кадров:

$$V_0 = S_0 / tN, \text{ м/с,}$$

где S_0 – расстояние, пройденное фронтом потока от торца излучателя за пять кадров, которое определялось как количество пикселей, умноженное на их размер; t – время, соответствующее одному кадру ($1/1212 = 0,000825$ с); N – количество кадров (в данном случае 5).

Особенности диспергирования твердых частиц по обрабатываемому объему под действием ультразвуковых колебаний

Определение возможностей и механизмов разрушения агломератов частиц дисперсной фазы при ультразвуковой обработке осуществлялось путем феноменологического исследования.

В смесь вода-глицерин вязкостью $\eta = 102$ мПа · с добавлялись большие агломераты частиц графита, полученные после просеивания через сито с ячейкой 100 мкм. После осаждения агломерата на дне технологической емкости включались ультразвуковые колебания с амплитудой $\xi_m = 10$ мкм, что для данной вязкости соответствует переходному режиму обработки. Торце излучателя колебательной системы при этом располагался на расстоянии 20 мм от дна емкости, что соответствует зоне высокой эрозионной активности. Процесс обработки фиксировался высокоскоростной камерой. Далее проводилась компьютерная обработка полученных видеофрагментов.

Влияние свойств обрабатываемой среды на скорость распространения акустических потоков

Процесс формирования и дальнейшего движения потока фиксировался видеосъемкой со скоростью 25 кадр/с при размере пикселя 0,69 мм. Покадровая обработка данных видеофрагментов позволяет определить изменение скорости потока по оси x при удалении от излучателя, связанное с различным сопротивлением среды, которое зависит от ее свойств и параметров ультразвуковой обработки.

Расчеты осуществлялись по схеме на рис. 2.

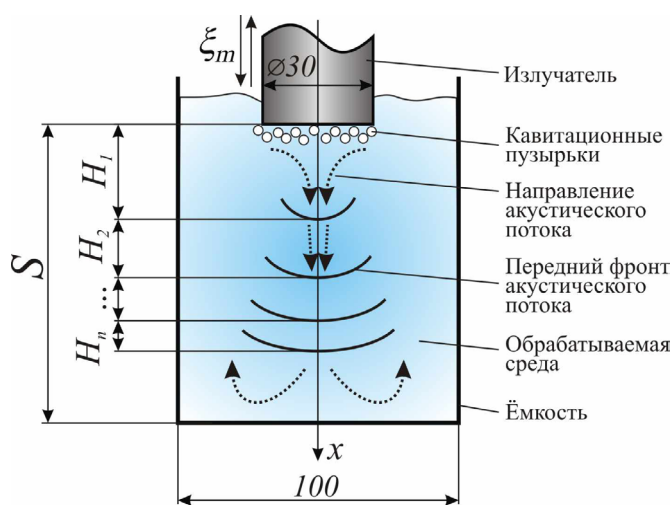


Рис. 2. Схема распространения переднего фронта акустического потока

Fig. 2. Schematic diagram of the propagation of the leading edge of the acoustic flow

Скорость потока в точках на удалении от излучателя определялась как

$$V_x = H_i / t, \text{ м/с,}$$

где H_i – расстояние, пройденное фронтом потока за один кадр; t – время, соответствующее одному кадру ($1/25 = 0,04$ с).

Расстояние S от торца излучателя до дна емкости варьировалось на основе предварительных экспериментов и составляло от 100 мм для $\eta = 1395$ мПа · с до 750 мм для воды. Для лучшей визуализации движения потока в воде сверху добавлялась подкрашенная жидкость (раствор бриллиантовой зелени).

Для построения графиков зависимостей, математической и статистической обработки экспериментальных данных использовалась программа Statistica.

Результаты и их обсуждение

Сравнение кавитационных областей и эрозионной активности

На рис. 3 приведены кадры установившегося режима течения, полученные при высокоскоростной съемке.

Развитие кавитационной области в воде при увеличении амплитуды соответствует традиционным представлениям. Начиная с $\xi_m = 10$ мкм образуется четко направленный крупномасштабный поток, усиливающийся с дальнейшим повы-

шением амплитуды. Изменения кавитационных областей при повышении вязкости и добавлении дисперсной фазы обусловлены двумя противоположно действующими факторами:

1) добавление в жидкость твердых частиц, которые являются зародышами кавитационных пузырьков, приводит к снижению ее кавитационной прочности;

2) при повышении вязкости и наличии твердых частиц возрастает способность жидкости поглощать акустическую энергию, а также увеличивает ее сопротивление сдвиговым деформациям.

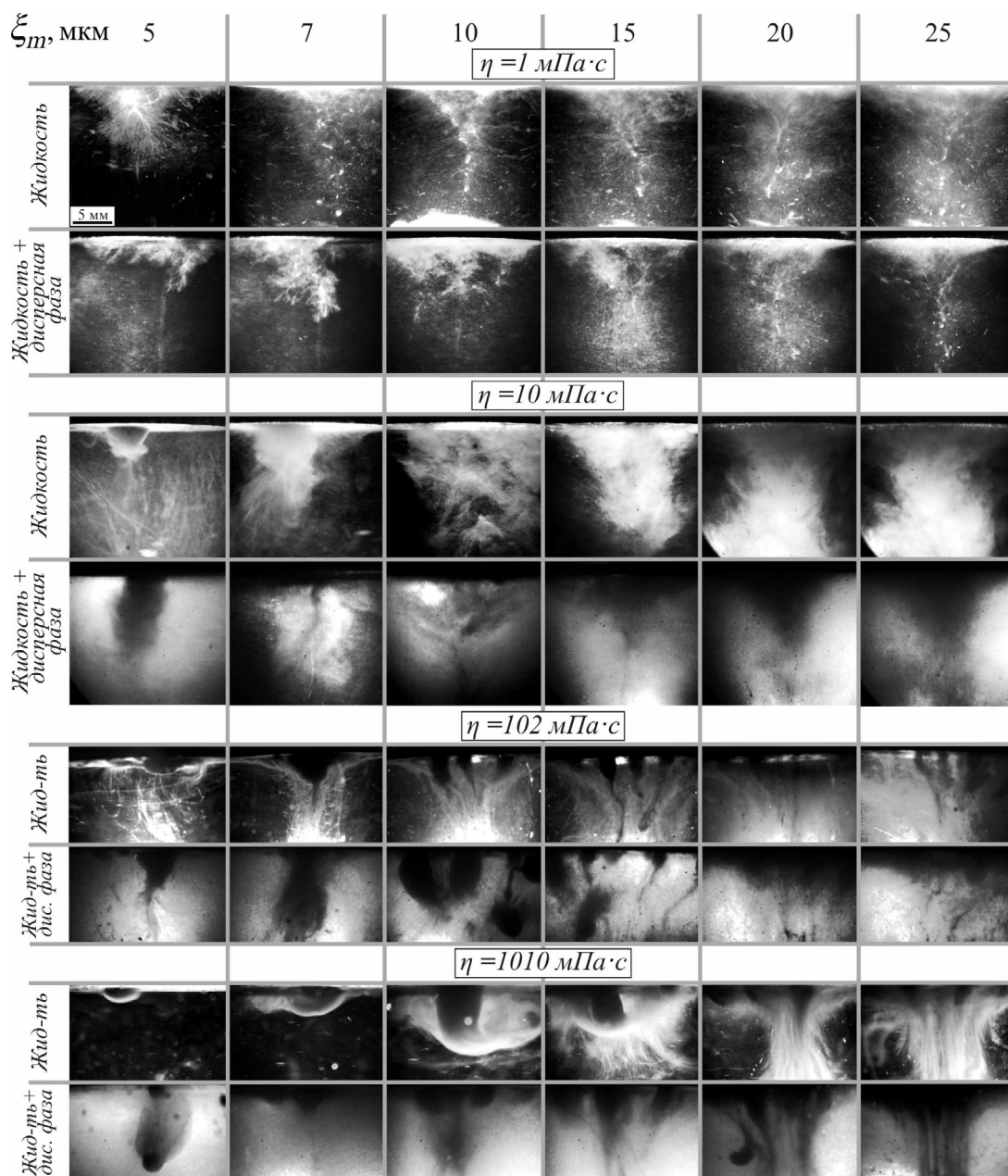


Рис. 3. Форма кавитационной области в зависимости от амплитуды колебаний и свойств жидкой среды

Fig. 3. Cavitation region shape vs. oscillation amplitude and liquid medium properties

В первую очередь это влияет на кавитационную активность в зоне непосредственно под торцом излучателя. Она покрывает большую площадь торца и значительно увеличивается по высоте, что хорошо проиллюстрировано на кадрах обработки дисперсной системы с вязкостью $\eta = 1$ мПа · с в виде белых кавитационных облаков.

Для жидких сред с $\eta = 10$ мПа · с возникающие кавитационные эффекты по характеру близки к воде, но при этом кавитационные области имеют большую концентрацию пузырьков и визуальнo четкие границы. При обработке дисперсных систем с такой вязкостью начиная с $\xi_m = 10$ мкм кавитационные области имеют меньшие размеры.

При достижении значения $\eta = 102$ мПа · с под излучателем происходит перераспределение эффектов, кавитационная зона представляет собой совокупность плотных кавитационных областей, размер которых с увеличением амплитуды уменьшается, а их количество увеличивается. Для дисперсных систем формирование таких кавитационных зон начинается при меньших амплитудах. Изменения кавитационной области приводят к изменению условий возникновения и характера распространения акустических потоков.

Вследствие активного развития кавитационной области под торцом излучателя при обработке дисперсных систем потоки могут возникать при меньших амплитудах обработки. Так, для жидкости с $\eta = 1010$ мПа · с поток возникает с $\xi_m = 15$ мкм, а разделение кавитационной области – на более маленькие 20 мкм; для дисперсной системы и образование потока, и фрагментация области начинаются с 10 мкм. Причем за счет усиления кавитационных эффектов в этой зоне потоки возникают и при образовании небольших кавитационных областей. Например, для $\eta = 102$ мПа · с при обработке жидкости на $\xi_m = 5$ мкм образуется небольшое кавитационное образование в форме полусферы, периодически перемещающейся по поверхности торца, в то время как при добавлении дисперсной фазы оно увеличивается в размерах, располагается по центру без смещений и вытягивается в направлении образованного потока.

Скорость акустических течений, которая зависит от режима обработки и свойств жидкой

среды, является одним из основных параметров, определяющих эффективность ультразвуковой обработки. Поскольку возникновение течений представляет собой следствие поглощения энергии под торцом излучателя (см. введение), то первоочередное значение будет иметь их начальная скорость V_0 (рис. 4).

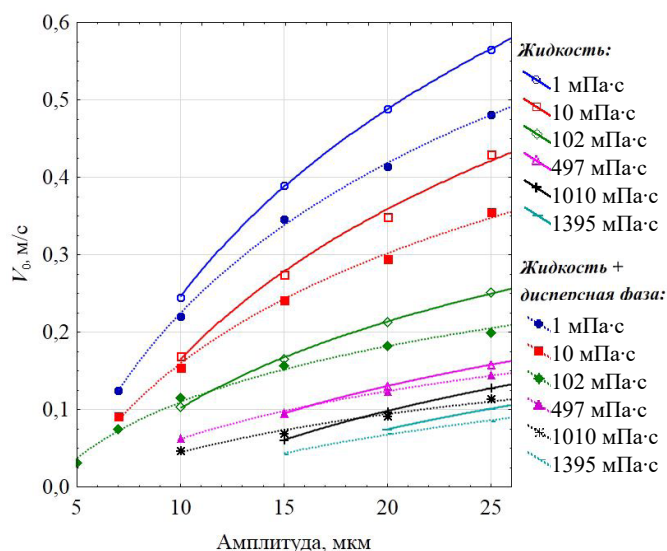


Рис. 4. Зависимость начальной скорости акустического потока V_0 от свойств жидкой среды и амплитуды колебаний

Fig. 4. Dependence of the acoustic flow initial velocity (V_0) on the liquid medium properties and oscillation amplitude

Скорости $V_0^{\text{ж}}$ для жидких сред и $V_0^{\text{дс}}$ для дисперсных систем увеличиваются при повышении амплитуды ξ_m с постепенным уменьшением приращения графика. Зависимость, полученная для воды, по характеру и значениям согласуется с данными [25, 33]. Зависимости начальных скоростей для дисперсных систем начинаются при меньших амплитудах, что связано с причинами, описанными выше. В большинстве случаев $V_0^{\text{дс}}$ ниже, чем $V_0^{\text{ж}}$, вследствие повышения поглощающей способности среды и роста потерь на поддержание кавитации. При амплитудах, на которых возникают течения для жидкости, значения $V_0^{\text{ж}}$ и $V_0^{\text{дс}}$ близки; далее с увеличением амплитуды отношение $V_0^{\text{ж}} / V_0^{\text{дс}}$ растет.

По сути, отношение $V_0^{\text{ж}} / V_0^{\text{дс}}$ количественно отражает изменение скорости потока при до-

бавлении в жидкую среду твердых частиц. Ввиду сложности визуализации течений, возникающих в дисперсных системах, далее оно будет использовано при расчетах.

Описанные процессы приводят к изменениям эрозионной активности в зависимости от режима обработки и свойств жидкой среды. Воздействие описанных изменений кавитационной области под излучателем и скоростей потока приводит к возникновению на тест-объектах из фольги различных картин эрозионных повреждений (рис. 5).

Полученные изображения для воды также коррелируют с классическими положениями: при низкоамплитудном режиме обработки с повышением амплитуды площадь повреждений растет и достигает максимальных значений при 7 мкм. Затем начиная с 10 мкм возникающие акустические потоки уносят кавитационные

пузырьки от излучателя далее в зону пониженного акустического давления, где интенсивность схлопывания пузырьков значительно ниже. С дальнейшим повышением амплитуды и увеличением скорости потока площадь повреждений уменьшается.

Этими же положениями объясняются изменения картины эрозионных повреждений для жидкостей с большей вязкостью. Основным отличием является достижение максимальной площади эрозии на режимах с потоками, что связано с концентрацией большого количества пузырьков под излучателем, которые не образуются на удалении от него вследствие повышения поглощающей способности среды. Возникающие при повышении амплитуды потоки, обладающие меньшей скоростью, чем при $\eta = 1 \text{ мПа} \cdot \text{с}$, обеспечивают перенос пузырьков и увеличение глубины этой зоны. Начиная с $\eta = 10 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ дальнейшее повы-

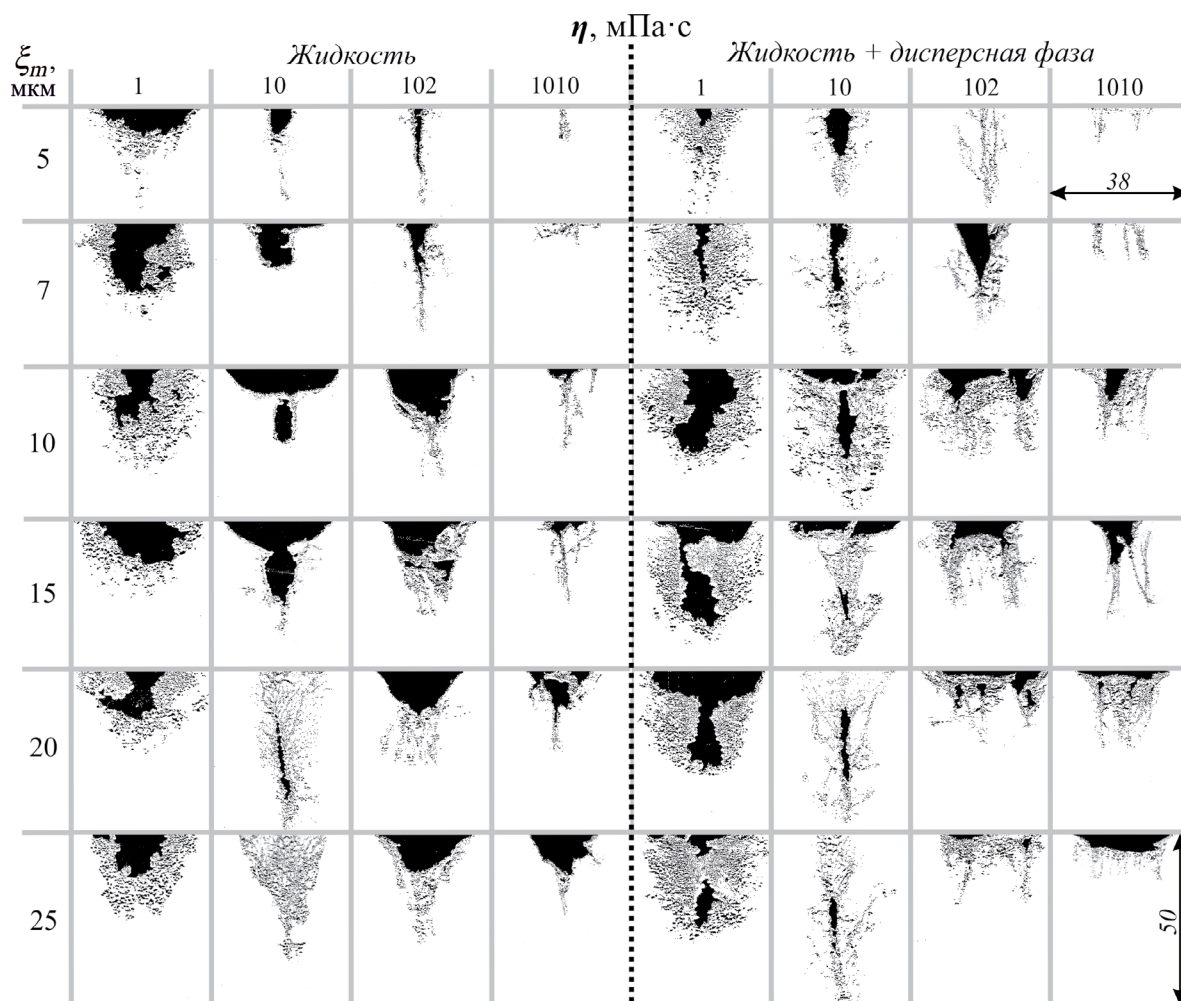


Рис. 5. Эрозионные повреждения на алюминиевой фольге, образованные за 10 с ультразвуковой обработки

Fig. 5. Erosion damage on aluminum foil after 10 s of ultrasonic treatment

шение вязкости приводит к сужению зоны эрозионных повреждений.

Картины эрозионных повреждений дисперсных систем с вязкостями 1 и 10 мПа · с отличаются наличием значительной площади с точечными повреждениями, являющимися следствием схлопывания кавитационных пузырьков вблизи частиц дисперсной фазы, распределенной по обрабатываемому объему. При этом для воды на высокоамплитудных режимах обработки увеличивается количество и площадь повреждений, а для $\eta = 10$ мПа · с уменьшается количество повреждений под излучателем с увеличением площади точечных повреждений.

Для дисперсных систем с вязкостями от 102 мПа · с картина повреждений определяется суммарным действием сферообразных кавитационных областей. Увеличивается ширина зоны повреждений под излучателем, а при удалении от торца излучателя зона повреждения представляет собой следы воздействия кавитационных струек (тяжей), возникающих при схлопывании пузырьков на границе сфер, эффект от которых увеличивается за счет наличия в среде частиц дисперсной фазы.

В результате анализа размеров картин эрозионных повреждений для дисперсных систем установлено, что на высокоамплитудных режимах обработки высота зоны кавитационно-эрозионной активности составляет от 20 до 50 мм, а ширина – от 20 до 38 мм. Важно, что наибольшая площадь повреждений достигается при наименьшей скорости потока.

При этом очевидно, что акустико-технологические параметры ультразвуковой обработки должны обеспечивать высокую кавитационно-эрозионную активность для диспергирования твердых частиц и их агломератов, а также интенсивность акустических потоков, достаточную для равномерного перемешивания компонентов дисперсной системы. Рассмотрим далее особенности выбора режима обработки.

Анализ факторов, влияющих на выбор режима ультразвуковой обработки дисперсных систем

Рассмотрим пример ультразвукового воздействия с амплитудой колебаний $\xi_m = 15$ мкм на агломерат частиц графита в смеси вязкостью 102 мПа · с.

Механизмы диспергирования агломератов твердых частиц в жидкой среде

В зависимости от размера агломерата можно наблюдать два варианта его разрушения. Первый вариант возникает в случае, когда агломерат диаметром 3 мм под действием акустического потока сразу отрывается от дна емкости и переносится в зону под излучателем, что проиллюстрировано на рис. 6.

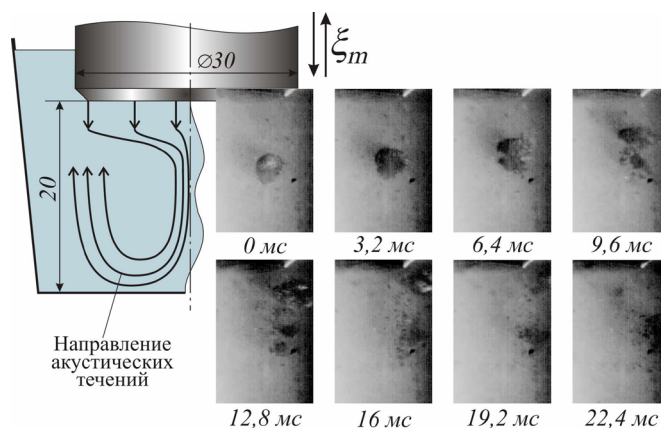


Рис. 6. Разрушение агломерата дисперсных частиц при схлопывании кавитационного кластера

Fig. 6. Destruction of a dispersed particle agglomerate during the collapse of a cavitation cluster

На кадре 0 мс показан момент, предшествующий разрушению агломерата. Через 3,2 мс на его поверхности начинают активно скапливаться пузырьки, образуя кавитационный кластер, который после нескольких периодов пульсации частично схлопывается, что видно на кадре 6,4 мс: агломерат вместе с кластером разделяется на две части, движущиеся под действием возникшей ударной волны в противоположных направлениях (9,6...12,8 мс). Далее на 12,8 мс неустойчивые агломераты под влиянием колебаний кластеров начинают разделяться на более мелкие. На 16 мс происходит схлопывание нижнего кластера, а на 19,2 мс – верхнего, что приводит к полному разрушению агломератов частиц. Затем диспергированные частицы уносятся акустическим потоком.

Второй вариант разрушения агломерата можно наблюдать при увеличении его размера и соответственно массы (рис. 7).

В этом случае процесс разрушения занимает большее количество времени и происходит в две стадии. После включения ультразвука (кадр

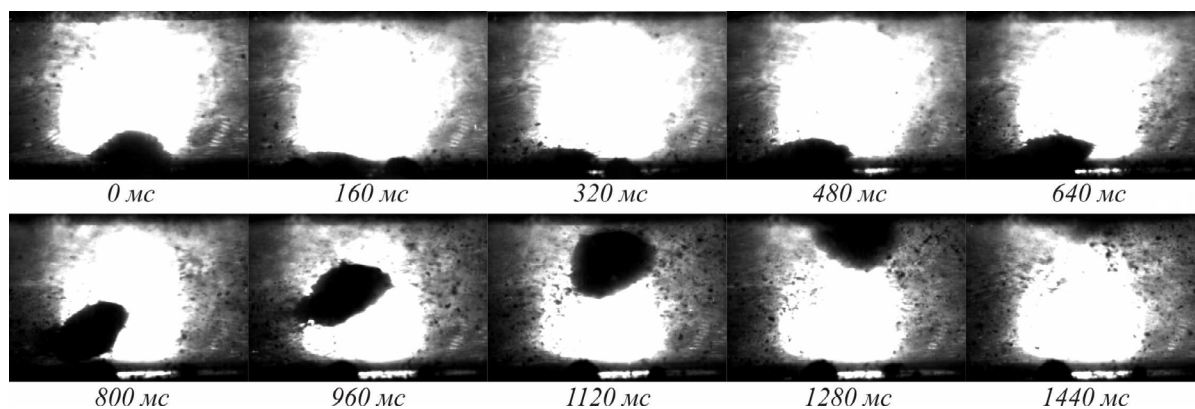


Рис. 7. Последовательное разрушение агломерата под торцом излучателя

Fig. 7. Sequential destruction of an agglomerate beneath the emitter tip

160 мс) под действием нормально направленного акустического потока агломерат сплющивается, и от него отделяется небольшой фрагмент, что, вероятно, вызвано слабой адгезией между данными частями агломерата. Начиная с 320 мс под действием пульсирующих и схлопывающихся кавитационных образований от поверхности агломератов начинают отделяться единичные частицы дисперсной фазы, которые потоками распределяются в жидкой среде. На 480 мс маленький агломерат полностью разрушился, а от большого продолжают активно отделяться частицы, уменьшая его массу. Когда сила тяжести, действующая на агломерат, становится меньше подъемной силы, создаваемой акустическим потоком, агломерат начинает подниматься со дна емкости (640...800 мс). Поднявшись близко к излучателю (960 мс), он подсасывается к торцу и полностью разрушается в зоне активного кавитационно-эрозионного воздействия (1120...1280 мс).

Для сравнения рассмотрим низкоамплитудный режим без наличия крупномасштабного акустического потока при $\xi_m = 7$ мкм (рис. 8). При таком режиме агломерат слегка сплющивается под действием акустического давления и под действием кавитации от его поверхности начинает отделяться некоторое количество частиц – несоизмеримо меньшее, чем при $\xi_m = 15$ мкм (рис. 7). Под действием микротечений агломерат смещается в сторону относительно оси излучателя (480...800 мс), где кавитационно-эрозионная активность минимальна. Разрушение агломерата останавливается.

В итоге можно выделить следующие механизмы разрушения агломератов дисперсных частиц.

1. Полное разрушение при схлопывании кавитационных кластеров, сопоставимых по размеру с агломератом. Происходит в ближней к торцу излучателя зоне, обладающей большой кавитационно-эрозионной активностью.

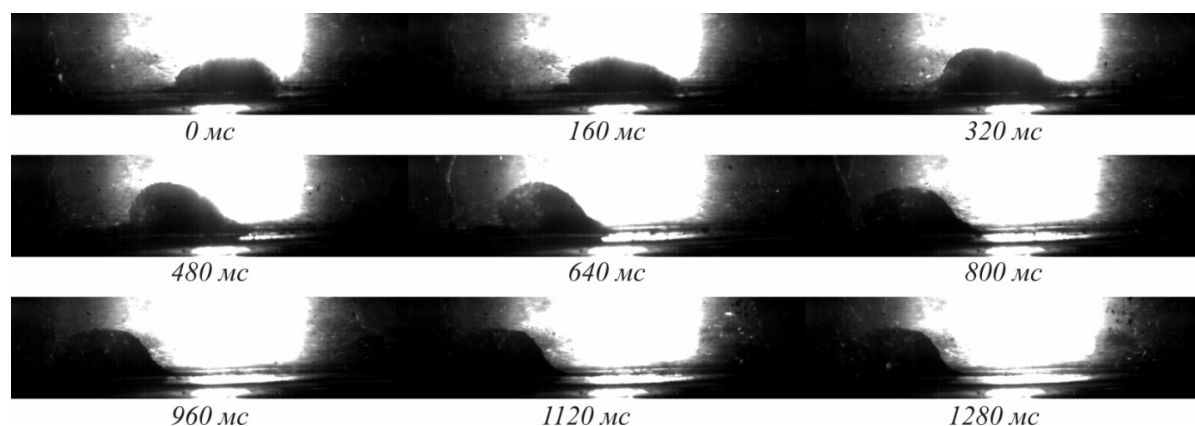


Рис. 8. Частичное разрушение агломерата на низкоамплитудном режиме

Fig. 8. Partial destruction of an agglomerate in a low-amplitude mode

2. Отделение частиц твердой фазы от поверхности агломерата под действием пульсирующих и схлопывающихся пузырьковых образований, размер которых меньше агломерата. Происходит при удалении от торца излучателя в зоне, куда пузырьки переносятся акустическим потоком.

3. Дефрагментация крупного агломерата на несколько мелких под действием пульсаций кавитационных образований.

4. Разделение агломерата под действием акустического потока в условиях слабой адгезии отдельных его частей.

В условиях обработки реальной дисперсной системы данные механизмы будут действовать одновременно, но при этом получение однородной дисперсной системы возможно только при реализации первого механизма, обеспечивающего полное разделение агломерата на единичные твердые частицы. То есть режим ультразвуковой обработки должен обеспечивать перемешивание компонентов таким образом, чтобы частицы и агломераты проходили через зону высокой кавитационно-эрозионной активности.

Итак, при выборе режима ультразвуковой обработки возникают ограничения по максимальному объему дисперсных систем и обеспечению необходимой скорости акустического потока на дне технологической емкости.

Определение требуемой скорости потока

Сила, создаваемая акустическим потоком $F_{ак.п}$ в совокупности с выталкивающей силой $F_{арх}$ должна превышать силу тяжести $F_{тяж}$:

$$F_{ак.п} + F_{арх} > F_{тяж}. \quad (1)$$

Рассмотрим случай образования агломерата сферической формы из сферических частиц. Тогда сила тяжести определяется как

$$F_{тяж} = mg = \rho_{дф} \gamma \frac{4}{3} \pi R_{агл}^3 g,$$

где $\rho_{дф}$ – плотность частиц дисперсной фазы; $R_{агл}$ – радиус агломерата; γ – коэффициент наполняемости, определяемый как отношение насыпной плотности к $\rho_{дф}$.

Сила Архимеда:

$$F_{арх} = \rho_{ж} \frac{4}{3} \pi R_{агл}^3 g,$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкой дисперсионной среды.

Сила, действующая со стороны потока жидкости на агломерат:

$$F_{ак.п} = \frac{1}{2} \rho_{ж} V_{ак.п}^2 S,$$

где $V_{ак.п}$ – скорость акустического потока; $S = 2\pi R_{агл}^2$ – площадь контакта, равная половине площади сферы.

С учетом рассмотренного условия (1) примет вид

$$\rho_{ж} V_{ак.п}^2 \pi R_{агл}^2 > \frac{4}{3} \pi R_{агл}^3 g (\rho_{дф} \gamma - \rho_{ж}). \quad (2)$$

Отсюда можно определить значение скорости потока, позволяющее проводить перенос агломератов и отдельных частиц по обрабатываемому объему:

$$V_{ак.п} > \sqrt{\frac{4}{3} \frac{\rho_{дф} \gamma - \rho_{ж}}{\rho_{ж}} g R_{агл}}. \quad (3)$$

Пользуясь данным выражением, определим требуемую скорость потока для рассматриваемого выше случая: насыпная плотность порошка графита $\rho_{дф} \gamma = 1800 \text{ кг/м}^3$, плотность смеси вода-глицерин (для вязкости $102 \text{ мПа} \cdot \text{с}$) $\rho_{ж} = 1221 \text{ кг/м}^3$, радиус агломерата $R = 1,5 \text{ мм}$.

Получим $V_{ак.п} > 0,096 \text{ м/с}$. Для того чтобы переместить агломерат в зону развитой кавитации, такая скорость потока должна достигаться на дне технологической емкости (20 мм от излучателя).

Учитывая, что акустический поток обладает максимальной скоростью под торцом излучателя ($V_{max} = V_0$) и постепенно затухает при удалении от него, причем степень затухания зависит от свойств жидкой среды и амплитуды колебаний, требуется определить закономерности изменения скорости потока по обрабатываемому объему.

Зависимость скорости акустического потока от свойств жидкой среды

Динамика распространения акустического потока

На рис. 9 и 10 показана динамика движения потока для воды и смеси с вязкостью $1010 \text{ мПа} \cdot \text{с}$, который образуется под действием колебаний с амплитудой $\xi_m = 25 \text{ мкм}$, обеспечивающей наибольшую начальную скорость из рассматриваемых.

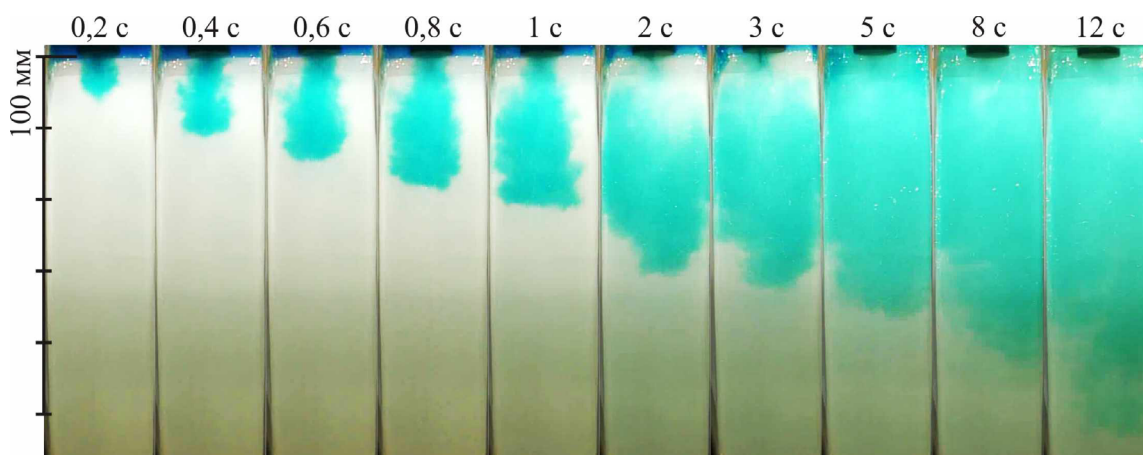


Рис. 9. Динамика распространения акустического потока в воде ($\eta = 1 \text{ мПа} \cdot \text{с}$) при $\xi_m = 25 \text{ мкм}$

Fig. 9. Dynamics of acoustic flow propagation in water ($\eta = 1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$) at $\xi_m = 25 \text{ }\mu\text{m}$

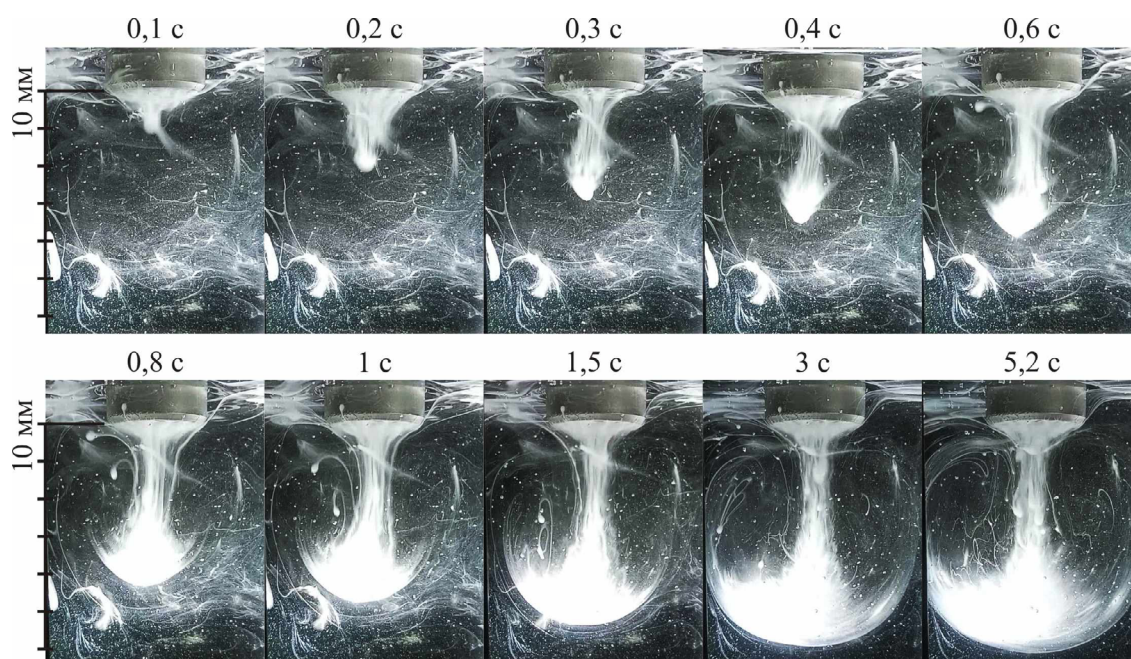


Рис. 10. Динамика распространения акустического потока в смеси вода-глицерин ($\eta = 1010 \text{ мПа} \cdot \text{с}$) при $\xi_m = 25 \text{ мкм}$

Fig. 10. Dynamics of acoustic flow propagation in a water-glycerin mixture ($\eta = 1,010 \text{ mPa} \cdot \text{s}$) at $\xi_m = 25 \text{ }\mu\text{m}$

Анализ кадров видеосъемки показывает, что в начальные моменты течение представляет собой направленный поток. Далее под действием сил сопротивления среды течение расширяется. Начинают образовываться вихревые потоки, что особенно заметно на смеси с $\eta = 1010 \text{ мПа} \cdot \text{с}$. Постепенно вихревые потоки движутся в направлении, противоположном основному течению, затем ближе к излучателю вливаются в основной столб потока. В этот момент формируется стационарная картина действия крупно-

масштабных течений в объеме (12 с для воды и 5,2 с для смеси вода-глицерин), движение нижней границы потока сильно замедляется ($V_x \rightarrow 0$).

Высота потока для воды в этот момент составила $H_{\text{max}} = 532 \text{ мм}$, при этом более половины высоты было достигнуто за 2 с. Поток в смеси $\eta = 1010 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ за 1,5 с достиг $H = 51 \text{ мм}$, а за оставшееся время до 5,2 с прошел оставшееся расстояние до максимальной высоты 62 мм, т. е. увеличение вязкости жидкой среды в 1000 раз

приводит к уменьшению высоты потока примерно в 8,5 раза.

Аналогичным образом определены высота и время формирования потоков для остальных рассматриваемых жидкостей (результаты приведены в таблице ниже).

Во всех случаях поток с большой скоростью проходит более 50 % от максимальной высоты и далее очень медленно останавливается. Распределение скорости потока по его высоте будет следующее: максимальное значение под излучателем V_0 , далее на протяжении до 80 % высоты снижение до скоростей менее 10 % от начальной, затем постоянно замедляющееся течение с низкой скоростью.

Физико-математическое описание характера движения акустического потока

Рассмотренный характер крупномасштабного акустического потока соответствует механизму формирования в жидкости «затопленной струи».

Будем считать, что скорость на границе пограничного слоя под излучателем и остальной жидкости определяется как

$$V(0 < t) = V_0 r(t),$$

где $r(t)$ – единичная функция, $r(t) = 0$ при $t < 0$ и $r(t) = 1$ при $t \geq 0$; V_0 – абсолютное значение скорости на границе.

Если предположить что в жидкости $\text{grad}P = 0$ и отсутствуют массовые силы акустической природы, тогда уравнение гидродинамики Навье – Стокса можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial V}{\partial t} - \frac{\eta}{\rho_0} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = 0, \quad (4)$$

где η – динамическая вязкость жидкости; ρ_0 – плотность жидкости; $\eta/\rho_0 = \mu$ – кинематическая вязкость жидкости. Начальные и граничные условия: $V(x, 0) = 0$, $V(0, t) = V_0 r(t)$.

Применим преобразование Лапласа по времени t :

$$\int_0^\infty e^{-pt} \frac{\partial V}{\partial t} dt - \mu \int_0^\infty e^{-pt} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} dt = 0,$$

где $F(p)$ – изображение функции.

Так как

$$\int_0^\infty e^{-pt} \frac{\partial V}{\partial t} dt = p\bar{V}(x, p) - V(x, 0),$$

то

$$\int_0^\infty e^{-pt} \frac{\partial V}{\partial t} dt = \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial x^2}.$$

Тогда из формулы (1) получим

$$p\bar{V} - V(x, 0) - \mu \frac{\partial^2 \bar{V}(x, p)}{\partial x^2} dt = 0.$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} \bar{V} &= u; \\ \mu &= a^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Выражение приобретает вид линейного дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$a^2 u'' - pu = 0. \quad (6)$$

Характеристическое уравнение:

$$a^2 k^2 - p = 0;$$

$$k^2 = \frac{p}{a^2};$$

$$k_{1,2} = \pm \frac{\sqrt{p}}{a}.$$

Для случая $k_1 \neq k_2$ общее решение уравнения (6) имеет вид

$$u = C_1 e^{\frac{\sqrt{p}}{a}x} + C_2 e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}x}.$$

Поскольку необходимо получить ограниченное решение, в первом слагаемом примем $C_1 = 0$, что приводит к следующему выражению:

$$u = C_2 e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}x}. \quad (7)$$

При граничном условии $V_0 = V(0, t)$

$$u \Big|_{x=0} = e^{-pt} V_0 dt = \frac{V_0}{p}.$$

Тогда из выражения (7) имеем

$$C_2 = \frac{V_0}{p}.$$

Подставим данное значение в уравнение (5) и с учетом, что $\bar{V} = u$, получим

$$\bar{V} = \frac{V_0}{p} e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}x}.$$

Обратное преобразование от изображения функции к оригиналу:

$$V(x, t) = V_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{\mu t}}. \quad (8)$$

Это выражение описывает изменение осевой скорости Vx потока на расстоянии x от торца излучателя, распространяемого в жидкой среде в течение времени t , соответствующего достижению фронтом потока предельного значения x , после которого $Vx \approx 0$. В итоге характер получаемых зависимостей соответствует реальному процессу, когда скорость потока бесконечно стремится к нулю.

При этом формула (8) не учитывает сопротивление течению жидкой среды, которое возрастает с увеличением вязкости и зависит от степени поглощения акустической энергии, от акустико-технологических параметров ультразвуковой обработки, изменения свойств жидкости при образовании, схлопывании и пульсации в ней кавитационных образований, а также требуется учет коэффициента объемной вязкости.

Ввиду сложности задачи и для упрощения расчетов введем в выражение (8) безразмерный эмпирический коэффициент K , учитывающий влияние рассматриваемых факторов. Тогда формула (5) с учетом K :

$$a^2 = \mu / K^2. \quad (9)$$

Таким образом, значение a^2 представляет собой приведенную вязкость, учитывающую изменения сопротивления среды.

Зависимость (8) с учетом формулы (9) приобретает вид

$$V(x, t) = V_0 \operatorname{erfc} \frac{xK}{2\sqrt{\mu t}}. \quad (10)$$

Для получения численных решений уравнения (10) воспользуемся программным комплексом MathCad. Построим графики изменения Vx/V_0 для рассматриваемого выше случая (рис. 10) обработки смеси вода-глицерин ($\eta = 1010 \text{ мПа} \cdot \text{с}$) с амплитудой $\xi_m = 25 \text{ мкм}$ и следующих известных параметрах: $V_0 = 0,128 \text{ м/с}$, $\rho_0 = 1255 \text{ кг/м}^3$, $t = 5,2 \text{ с}$ при варьировании коэффициента K (рис. 11).

В результате получено семейство кривых, характеризующих изменение осевой скорости переднего фронта потока в зависимости от расстояния до торца излучателя и при различных

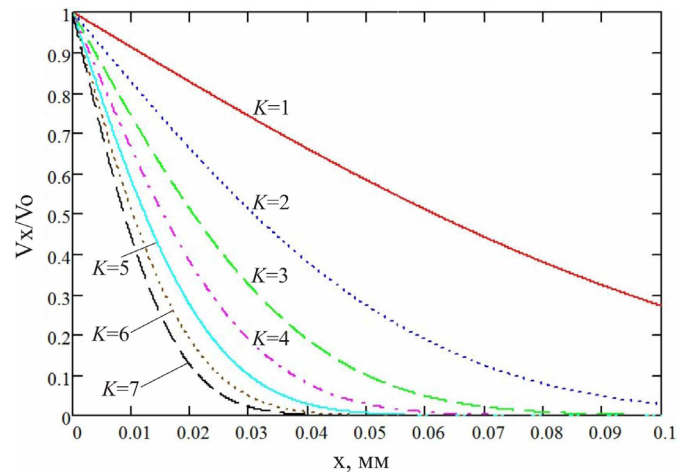


Рис. 11. Графики Vx/V_0 в смеси вода-глицерин ($\eta = 1010 \text{ мПа} \cdot \text{с}$) при различных значениях коэффициента K (от 1 до 7)

Fig. 11. Vx/V_0 graphs in a water-glycerin mixture ($\eta = 1,010 \text{ mPa} \cdot \text{s}$) for different values of the K coefficient (from 1 to 7)

значениях коэффициента K , который, по сути, является масштабным фактором относительно оси x . При увеличении сопротивления течению скорость падает более резко и высота потока уменьшается, а при уменьшении наблюдается обратная картина.

Графики с подобранным коэффициентом K для амплитуд 25 мкм наложены на рис. 12 и 13. Аналогично значения K подбирались для всех рассматриваемых случаев (см. таблицу ниже).

Экспериментальное определение осевой скорости акустического потока

На рис. 12 ($\eta = 1 \text{ мПа} \cdot \text{с}$) и 13 ($\eta = 1010 \text{ мПа} \cdot \text{с}$) показаны графики зависимостей распределения скоростей по высоте потока.

Экспериментально полученные точки на графиках представляют собой массив значений скоростей Vx , которые уменьшаются при удалении потока на расстояние x от торца излучателя. Обработка данных показала, что с высокой степенью точности зависимости описываются полиномом второй степени вида $Vx = ax^2 - bx + C$, где коэффициент C соответствует начальной скорости потока под излучателем. При этом такая зависимость справедлива до экстремума графика полинома, который во всех случаях соответствовал значению Vx менее 10 % от начальной. С точки зрения технологического применения, для которого необходимо обеспечить достаточную скорость потока и учитывать размер кави-

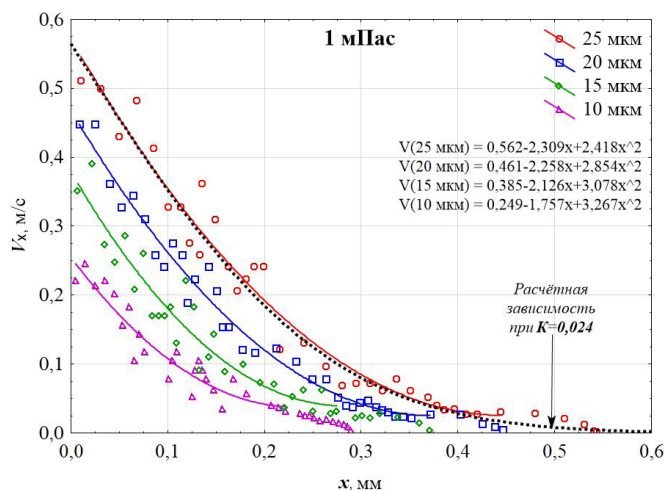


Рис. 12. Зависимость осевой скорости акустического потока V_x от амплитуды колебаний ξ_m при $\eta = 1 \text{ мПа} \cdot \text{с}$

Fig. 12. Dependence of the axial velocity of the acoustic flow (V_x) on the oscillation amplitude (ξ_m) at $\eta = 1 \text{ мПа} \cdot \text{с}$

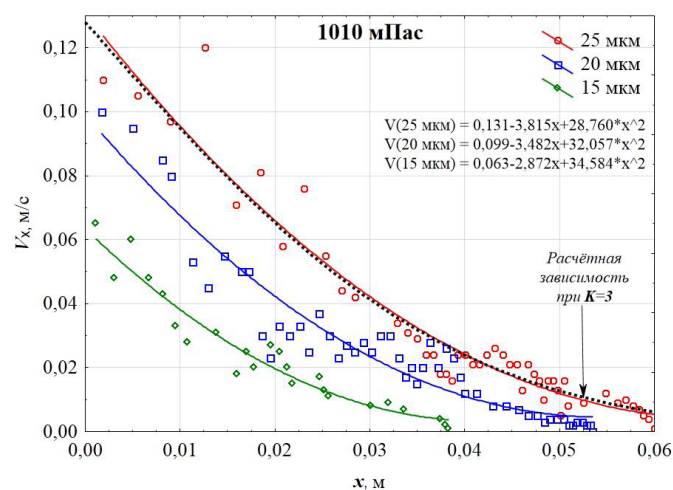


Рис. 13. Зависимость осевой скорости акустического потока V_x от амплитуды колебаний ξ_m при $\eta = 1010 \text{ мПа} \cdot \text{с}$

Fig. 13. Dependence of the axial velocity of the acoustic flow (V_x) on the oscillation amplitude (ξ_m) at $\eta = 1,010 \text{ мПа} \cdot \text{с}$

тационно-эрозионной области, составляющий до 50 мм, полученных зависимостей достаточно.

Полная картина распределения скоростей течения описывается формулой (10). Полученные расчетным способом зависимости при подобранном коэффициенте K для амплитуды 25 мкм показаны на рис. 12 и 13 черной пунктирной линией. До экстремума полинома графики зависимостей практически совпадают, после чего график по формуле (10) медленно стремится к нулю.

Таким образом, описанный выше характер изменения скорости подтверждается экспериментальными данными. В таблице приведены экспериментальные данные, полученные для всех рассматриваемых случаев.

Полученные данные показывают хорошую сходимость коэффициента C и начальной скорости потока $V_0^{\text{ж}}$, определенной с помощью высокоскоростной съемки, и высокую величину достоверности аппроксимации $R^2 > 0,9$.

Используя коэффициенты полинома, приведенные в таблице, построим графики изменения Vx при удалении потока от излучателя на 100 мм (рис. 14), что в два раза превышает высоту наибольшей кавитационно-эрозионной области.

В некоторых местах графики зависимостей пересекаются. Так, для зависимостей ($\xi_m = 10 \text{ мкм}$, $\eta = 1 \text{ мПа} \cdot \text{с}$), ($\xi_m = 15 \text{ мкм}$, $\eta = 10 \text{ мПа} \cdot \text{с}$) и ($\xi_m = 25 \text{ мкм}$, $\eta = 102 \text{ мПа} \cdot \text{с}$) начальная скорость

выше там, где больше амплитуда, а на расстоянии $x = 100 \text{ мм}$ – наоборот, скорость выше там, где ниже вязкость. То есть на замедление потока большее влияние оказывает сопротивление среды, а не амплитуда колебаний. При этом для одной вязкости повышение амплитуды колебаний фактически поднимает весь график зависимости Vx на величину возрастания V_0 .

Принимая, что при добавлении в жидкую среду дисперсных частиц время формирования потока t и коэффициент K пропорциональны изменению начальных скоростей $V_0^{\text{ж}} / V_0^{\text{дс}}$, получим зависимости распределения осевой скорости потока для дисперсных систем (рис. 15).

Зависимости для дисперсных систем аналогичны жидким средам, но вследствие более высокого сопротивления среды и увеличения расхода акустической энергии на поддержание кавитации начальные скорости для таких же вязкостей в большинстве случаев ниже при более интенсивном снижении скорости.

Для рассмотренного выше случая диспергирования графитового агломерата при $\eta = 102 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ на расстоянии 20 мм требуемая скорость потока составляла 0,096 м/с. По графикам, при $\xi_m = 15 \text{ мкм}$ скорость потока на нужном расстоянии $\approx 0,1 \text{ м/с}$. Выбранный режим обработки является рациональным – достигается минимально необходимая скорость потока при наибольшей кавитационно-эрозионной активности.

Экспериментальные данные

Experimental data

η , мПа·с / η (mPa·s)	ξ_m , мкм / ξ_m (μm)	a	b	C	$V_0^{\text{ж}}$, м/с / $V_0^{\text{лиq}}$ (m/s)	R^2	$-b/(2a)$, мм / $-b/(2a)$ (mm)	H_{max} , мм / H_{max} (mm)	t , с / t , s	K	$V_0^{\text{ж}} / V_0^{\text{дис}}$ / $V_0^{\text{лиq}} / V_0^{\text{дис}}$
1	10	3,27	1,76	0,249	0,245	0,91	265	287	6,9	0,027	1,11
	15	3,08	2,13	0,385	0,389	0,93	324	340	8	0,026	1,12
	20	2,85	2,26	0,461	0,488	0,98	396	451	10	0,025	1,17
	25	2,42	2,31	0,562	0,565	0,97	477	532	12	0,024	1,18
10	10	5,336	1,86	0,172	0,169	0,95	173	192	5,5	0,115	1,09
	15	5,109	2,30	0,263	0,275	0,91	226	248	6,4	0,11	1,13
	20	4,65	2,48	0,331	0,349	0,92	266	287	7,8	0,105	1,18
	25	4,30	2,61	0,406	0,43	0,97	304	331	9,8	0,1	1,21
102	10	13,36	2,38	0,113	0,103	0,92	89	96	4,9	0,6	0,89
	15	12,90	2,87	0,172	0,165	0,96	111	117	5,3	0,55	1,06
	20	11,49	2,99	0,212	0,213	0,98	130	141	6,2	0,5	1,17
	25	10,45	3,29	0,269	0,251	0,93	157	165	7	0,45	1,26
497	15	24,93	2,98	0,094	0,095	0,92	60	62	4,1	2	0,99
	20	21,55	3,27	0,134	0,13	0,95	76	81	5	1,8	1,06
	25	18,95	3,32	0,162	0,158	0,91	87	88	6,2	1,6	1,09
1010	15	34,58	2,87	0,063	0,061	0,92	42	39	3,5	3,5	0,88
	20	32,06	3,48	0,099	0,097	0,91	54	55	4,2	3,25	1,06
	25	28,76	3,82	0,131	0,128	0,94	66	62	5,2	3	1,12
1395	20	39,72	3,57	0,081	0,081	0,93	45	44	4	5	1,17
	25	35,40	3,69	0,100	0,101	0,92	52	54	5,1	4,5	1,19

a , b и C – коэффициенты полинома $V_x = ax^2 - bx + C$;

R^2 – коэффициент детерминации;

$-b/(2a)$ – значение экстремума полинома;

H_{max} – высота потока;

t – время формирования потока;

K – эмпирический коэффициент сопротивления течению;

$V_0^{\text{ж}} / V_0^{\text{дис}}$ – отношение начальных скоростей в жидкости и дисперсной системе.

a , b , and C are the coefficients of the polynomial $V_x = ax^2 - bx + C$;

R^2 is the coefficient of determination;

$-b/(2a)$ is the extremum value of the polynomial;

H_{max} is the flow height;

t is the flow formation time;

K is the empirical flow resistance coefficient;

$V_0^{\text{лиq}} / V_0^{\text{дис}}$ is the ratio of the initial flow velocities in the liquid and the dispersed system

Выводы

В результате проведения теоретических и экспериментальных исследований по установлению взаимосвязей между свойствами обрабатываемой среды, режимами ультразвуковой обработки, кавитационно-эрозионной активностью и скоростью акустических течений установлено следующее.

1. Повышение вязкости жидкой среды и наличие в ней дисперсных частиц приводит

к изменению кавитационной зоны под торцом излучателя, которая фрагментируется на сферообразные кавитационные области, их размер и количество зависит от амплитуды колебаний.

2. Вследствие активного развития кавитационной области под торцом излучателя при обработке дисперсных систем потоки могут возникать при меньших амплитудах обработки, чем для жидкостей.

3. Начальные скорости V_0 акустических потоков для жидкостей и дисперсных систем раз-

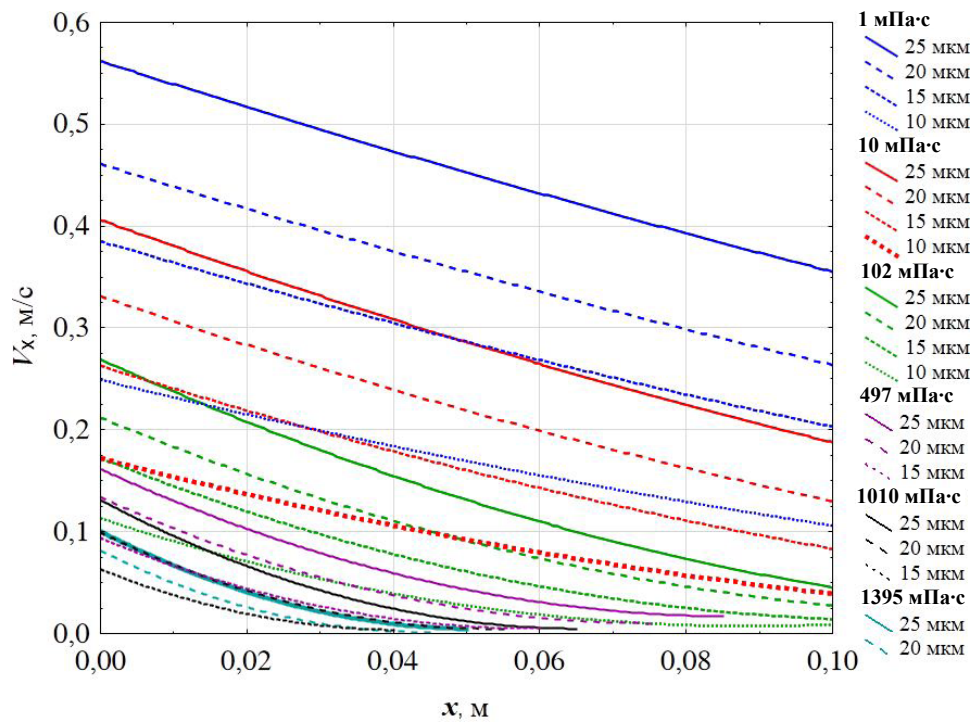


Рис. 14. Распределение осевой скорости потока V_x для жидких сред, описанное полиномом $V_x = ax^2 - bx + C$

Fig. 14. Distribution of axial flow velocity V_x for liquid media, described by a polynomial $V_x = ax^2 - bx + C$

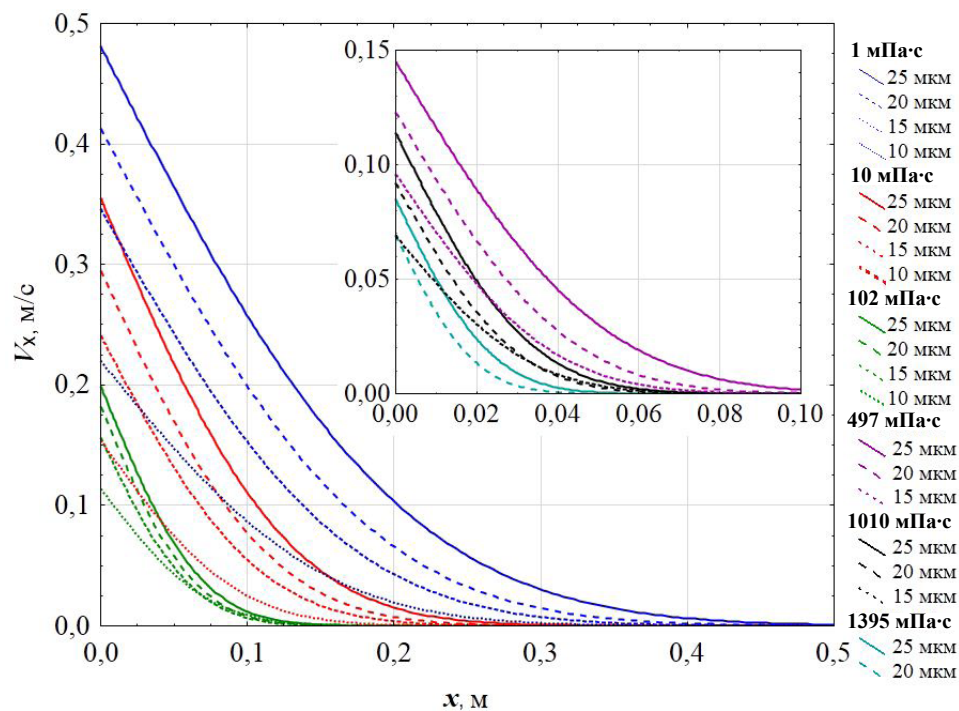


Рис. 15. Распределение осевой скорости потока V_x для дисперсных систем, рассчитанное по формуле (10)

Fig. 15. Distribution of axial flow velocity V_x for dispersed systems, calculated using Equation (10)

личной вязкости находятся в диапазоне от 0,050 до 0,565 м/с. Из-за повышения поглощающей способности среды и роста потерь на поддержание кавитации V_0 для дисперсных систем ниже, чем для жидкостей, а с повышением амплитуды колебаний разрыв между значениями увеличивается.

4. Картины эрозионных повреждений, полученные при обработке дисперсных систем, отличаются наличием значительной площади с точечными повреждениями, являющимися следствием схлопывания кавитационных пузырьков вблизи частиц дисперсной фазы, распределенной по обрабатываемому объему. На высокоамплитудных режимах обработки высота зоны кавитационно-эрозионной активности составляет от 20 до 50 мм. Наибольшая площадь повреждений достигается при наименьшей скорости потока.

5. Разрушение агломератов дисперсных частиц происходит в результате совместного действия кавитации, приводящей к полной или частичной дезагломерации, и акустических потоков, роль которых заключается в переносе частиц в зону кавитации.

6. Рационально использовать режимы обработки, обеспечивающие минимальную скорость потока, который создает необходимую силу для подъема частиц и их агломератов со дна емкости, и при этом имеющие наибольшую кавитационно-эрозионную активность. То есть обработка эффективна для ограниченного объема дисперсной системы.

7. В начальные моменты после включения ультразвуковых колебаний течение представляет собой направленный поток, который дальше под действием сил сопротивления среды расширяется с образованием вихревых потоков, движущихся в направлении, противоположном основному течению, затем ближе к излучателю они вливаются в основной столб потока, в результате чего формируется стационарная картина действия крупномасштабных течений в объеме.

8. Для описания характера течения на основе уравнения Навье – Стокса получено выражение, дополненное эмпирически установленным коэффициентом K , зависящим от изменения сопротивляемости жидкой среды течению, вызванному ультразвуковыми колебаниями. Расчетные значения изменения скорости потока

в зависимости от свойств среды и расстояния от источника колебаний подтверждаются экспериментальными данными.

9. Результаты исследований могут применяться для определения режима ультразвуковой обработки дисперсных систем и жидких сред различной вязкости. Например, в случае наложения колебаний на кристаллизующийся металл при сварке или пайке, кавитационно-абразивной обработки металлических изделий аддитивного производства, а также нанесения функциональных полимерных композиционных покрытий или защитных лакокрасочных.

Список литературы

1. Ermolov A.V., Mazurovsky S.L., Kapranova A.B. Analysis of varieties of modern dispersing equipment // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2024. – Vol. 58 (3). – P. 497–503. – DOI: 10.1134/S0040579524600888.
2. High-stretchability, ultralow-hysteresis conducting polymer hydrogel strain sensors for soft machines / Z. Shen, Z. Zhang, N. Zhang, J. Li, P. Zhou, F. Hu, Y. Rong, B. Lu, G. Gu // Advanced Materials. – 2022. – Vol. 34 (32). – P. 2203650. – DOI: 10.1002/adma.202203650.
3. Optimization of strength properties of FDM printed parts – A critical review / D. Syrlybayev, B. Zharylkassyn, A. Seisekulova, M. Akhmetov, A. Perveen, D. Talamona // Polymers. – 2021. – Vol. 13 (10). – P. 1587. – DOI: 10.3390/polym13101587.
4. Azani M.-R., Hassanpour A. Nanotechnology in the fabrication of advanced paints and coatings: dispersion and stabilization mechanisms for enhanced performance // ChemistrySelect. – 2024. – Vol. 9 (19). – P. e202400844. – DOI: 10.1002/slct.202400844.
5. Вертман А.А., Самарин А.М. Свойства расплавов железа. – М.: Наука, 1969. – 280 с.
6. Rapid Ag/Sn/Ag transient liquid phase bonding for high-temperature power devices packaging by the assistance of ultrasound / H. Shao, A. Wu, Y. Bao, Y. Zhao, L. Liu, G. Zou // Ultrasonics Sonochemistry. – 2017. – Vol. 37. – P. 561–570. – DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.02.016.
7. Bittmann-Hennes B., Hauptert F., Schlarb A.K. Preparation of TiO₂/epoxy nanocomposites by ultrasonic dispersion and their structure property relationship // Ultrasonics Sonochemistry. – 2011. – Vol. 18 (1). – P. 120–126. – DOI: 10.1016/j.ultsonch.2010.03.011.
8. Greenhall J., Homel L., Raeymaekers B. Ultrasound directed self-assembly processing of nanocomposite materials with ultra-high carbon nanotube weight fraction // Journal of Composite



Materials. – 2019. – Vol. 53 (10). – P. 1329–1336. – DOI: 10.1177/0021998318801452.

9. *Negrov D.A., Eremin E.N., Kuznetsov V.V.* The use of ultrasonic exposure for the modification of synthesized composite materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 168 (1). – P. 012018. – DOI: 10.1088/1757-899X/168/1/012018.

10. Polymeric composite materials for radiation shielding: a review / C.V. More, Z. Alsayed, M.S. Badawi, A.A. Thabet, P.P. Pawar // Environmental Chemistry Letters. – 2021. – Vol. 19. – P. 2057–2090. – DOI: 10.1007/s10311-021-01189-9.

11. Nanoscale composite protective preparation for cars paint and varnish coatings / A.V. Blinov, A.A. Nagdalian, L.P. Arefeva, V.N. Varavka, O.V. Kudryakov, A.A. Gvozdenko, A.B. Golik, A.A. Blinova, D.G. Maglakelidze, D.D. Filippov, V.A. Lapin, E.D. Nazaretova, M.A. Shariati // Coatings. – 2022. – Vol. 12 (9). – P. 1267. – DOI: 10.3390/coatings12091267.

12. Thermal characterization and rheological behavior of some varnishes and paints used for wood protection / A. Mihăilă, M. Danu, C. Ibănescu, I. Anghel, I.-E. Șofran, L.V. Balanescu, N. Tudorachi, G. Lisa // International Journal of Environmental Science and Technology. – 2022. – Vol. 19 (7). – P. 6299–6314. – DOI: 10.1007/s13762-021-03579-6.

13. *Goh K.W.S., Tan K.L., Yeo S.H.* Hybrid ultrasonic cavitation abrasive peening and electrochemical polishing on additively manufactured AlSi10Mg components // Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Surface Enhancement (INCASE) 2023. – Singapore: Springer, 2023. – P. 59–66. – DOI: 10.1007/978-981-99-8643-9_7.

14. *Sun M., Toyserkani E.* A novel hybrid ultrasound abrasive-driven electrochemical surface finishing technique for additively manufactured Ti6Al4V parts // Inventions. – 2024. – Vol. 9 (2). – P. 45. – DOI: 10.3390/inventions9020045.

15. A review on the rheological behavior and formulations of ceramic suspensions for vat photopolymerization / I. Camargo, M. Morais, C. Fortulan, M. Branciforti // Ceramics International. – 2021. – Vol. 47 (9). – P. 11906–11921. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.01.031.

16. Advances on thermally conductive epoxy-based composites as electronic packaging underfill materials – A review (Adv. Mater. 52/2022) / Y. Wen, C. Chen, Y. Ye, Z. Xue, H. Liu, X. Zhou, Y. Zhang, D. Li, X. Xie, Y. Mai // Advanced Materials. – 2022. – Vol. 34 (52). – P. 2201023. – DOI: 10.1002/adma.202270358.

17. *Yunusov B., Tazhiddinova M.* Research of the processes of drying, disaggregation and separation of powder cellulose in one apparatus // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2552 (1). – P. 050033. – DOI: 10.1063/5.0130122.

18. Structure and properties of WC–Co composites with different CrB₂ concentrations, sintered by vacuum hot pressing, for drill bits / B.T. Ratov, M.O. Bondarenko, V.A. Mechnik, V.V. Strelchuk, T.A. Prikhna, V.M. Kolodnitskyi, A.S. Nikolenko, P.M. Lytvyn, I.M. Danylenko, V.E. Moshchil, E.S. Gevorkyan, A.S. Kosminov, A.R. Borash // Journal of Superhard Materials. – 2021. – Vol. 43 (5). – P. 344–354. – DOI: 10.3103/S1063457621050051.

19. Effect of traveling-wave magnetic field on dendrite growth of high-strength steel slab: Industrial trials and numerical simulation / C. Yao, M. Wang, Y. Ni, D. Wang, H. Zhang, L. Xing, J. Gong, Y. Bao // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. – 2023. – Vol. 30 (9). – P. 1716–1728. – DOI: 10.1007/s12613-023-2629-2.

20. Microstructure and mechanical properties of high-strength, low-alloy steel thin-wall fabricated with wire and arc additive manufacturing / K. Song, Z. Lin, Y. Fa, X. Zhao, Z. Zhu, W. Ya, Z. Sun, X. Yu // Metals. – 2023. – Vol. 13 (4). – P. 764. – DOI: 10.3390/met13040764.

21. Steel for railroad rails with improved operating properties / O. Babachenko, G. Kononenko, R. Podolskyi, O. Safronova // Materials Science. – 2021. – Vol. 56 (6). – P. 814–819. – DOI: 10.1007/s11003-021-00499-1.

22. *Samal S.* Effect of shape and size of filler particle on the aggregation and sedimentation behavior of the polymer composite // Powder Technology. – 2020. – Vol. 366. – P. 43–51. – DOI: 10.1016/j.powtec.2020.02.054.

23. *Gallego-Juarez J., Graff K.* Power ultrasonics: applications of high-intensity ultrasound. – Elsevier, 2014. – 1166 p. – ISBN 978-0-12-820254-8.

24. *Розенберг Л.Д.* Физика и техника мощного ультразвука. Т. 3. Физические основы ультразвуковой технологии. – М.: Наука, 1970. – 689 с.

25. *Приходько В.М.* Ультразвуковые технологии при производстве и ремонте автотракторной техники. – М.: Техполиграфцентр, 2003. – 253 с. – ISBN 5-900095-16-9.

26. The role of surfactant headgroup, chain length, and cavitation microstreaming on the growth of bubbles by rectified diffusion / T. Leong, J. Collis, R. Manasseh, A. Ooi, A. Novell, A. Bouakaz, M. Ashokkumar, S. Kentish // The Journal of Physical Chemistry C. – 2011. – Vol. 115 (49). – P. 24310–24316. – DOI: 10.1021/jp208862p.

27. *Сундуков С.К.* Ультразвуковые технологии в процессах получения неразъемных соединений. – М.: Техполиграфцентр, 2023. – 269 с. – ISBN 978-5-94385-209-1.

28. Comparison of the effects of ultrasonic cavitation on the surfaces of 45 and 40Kh steels / D.S. Fatyukhin, R.I. Nigmatzyanov, V.M. Prikhodko, A.V. Sukhov,

- S.K. Sundukov // Metals. – 2022. – Vol. 12 (1). – P. 138. – DOI: 10.3390/met12010138.
29. Химия и ультразвук / Т. Мейсон, Дж. Линдли, Р. Дэвидсон, Дж. Лоример, Т. Гудвин; пер. с англ. Л.И. Кирковского; под ред. А.С. Козьмина. – М.: Мир, 1993. – 190 с. – ISBN 5-03-002798-X.
30. Казанцев В.Ф., Фатюхин Д.С. О механизме дегазации при высокоамплитудной ультразвуковой жидкостной обработке // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2013. – № 3 (34). – С. 37–42. – EDN QZGVVF.
31. Timothy J.M. Ultrasonic cleaning: An historical perspective // Ultrasonics Sonochemistry. – 2016. – Vol. 29. – P. 519–523. – DOI: 10.1016/j.ulsonch.2015.05.004.
32. Панов А.П. Ультразвуковая очистка прецизионных деталей. – М.: Машиностроение, 1984. – 88 с.
33. Improvement of mechanical properties of ferritic stainless steel weld metal by ultrasonic vibration / T. Watanabe, M. Shiroki, A. Yanagisawa, T. Sasaki // Journal of Materials Processing Technology. – 2010. – Vol. 210. – P. 1646–1651. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.05.015.
34. Cui Y., Xu C., Han Q. Microstructure improvement in weld metal using ultrasonic application // Advanced Engineering Materials. – 2007. – Vol. 9 (3). – P. 161–163. – DOI: 10.1002/adem.200600228.
35. Ganiev M.M. Influence of ultrasonic machining on physico-mechanical properties of adhesive joints and epoxide compounds // Russian Aeronautics (Iz VUZ). – 2008. – Vol. 51 (2). – P. 223–225. – DOI: 10.3103/S1068799808020190.
36. Ghosh P.K., Patel A., Kumar K. Adhesive joining of copper using nano-filler composite adhesive // Polymer. – 2016. – Vol. 87. – P. 159–169. – DOI: 10.1016/j.polymer.2016.02.006.
37. Wang J., Zhu J., Liew P.J. Material removal in ultrasonic abrasive polishing of additive manufactured components // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9 (24). – P. 5359. – DOI: 10.3390/app9245359.
38. Tan K.L., Yeo S.H. Surface modification of additive manufactured components by ultrasonic cavitation abrasive finishing // Wear. – 2017. – Vol. 378–379. – P. 90–95. – DOI: 10.1016/j.wear.2017.02.030.
39. Сундуков С.К. Особенности наложения ультразвуковых колебаний в процессе сварки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 50–66. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-50-66.
40. Сиротюк М.Г. Ультразвуковая кавитация. Обзор // Акустический журнал. – 1962. – Т. 8, вып. 3. – С. 255–272.
41. Research on the influence of ultrasonic vibrations on paint coating properties / A.N. Livanskiy, V.M. Prikhodko, S.K. Sundukov, D.S. Fatyukhin // Transactions of Famena. – 2016. – Vol. 40 (1). – P. 129–138. – EID: 2-s2.0-84964655329.
42. Сундуков С.К., Нечай А.А., Рахматулаев А.А. Возможности ультразвуковой обработки при получении полимерных композиционных материалов // Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы (ТА2025): сборник материалов V Международной научной конференции. – Тольятти, 2025. – С. 40–41. – EDN EMQSZL.
43. Исследование механизмов кавитационно-абразивной обработки с помощью высокоскоростной съемки. Ч. 2 / С.К. Сундуков, Р.И. Нигметзянов, Д.С. Фатюхин, В.К. Кольдюшов // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2025. – № 8. – С. 27–34. – DOI: 10.31044/1994-6260-2025-0-8-27-34.
44. Сравнение методов ультразвуковой обработки поверхностей, полученных послойным синтезом, на примере сплава Ti6Al4V / С.К. Сундуков, Р.И. Нигметзянов, В.М. Приходько, Д.С. Фатюхин, В.К. Кольдюшов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 6–28. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.2-6-28.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

© 2026 Автор. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Ultrasonic treatment features of liquid media and dispersed systems of various viscosities

Sergey Sundukov *

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 64 Leningradsky prospekt, Moscow, 125319, Russian Federation

 <https://orcid.org/0000-0003-4393-4471>,  sergey-lefmo@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 13 November 2025

Revised: 01 December 2025

Accepted: 17 December 2025

Available online: 15 March 2026

Keywords:

Ultrasound

Cavitation

Acoustic flows

Dispersed systems

Viscosity

Treatment

Funding

This research was funded by the Russian Science Foundation, grant number No. 25-29-00013, <https://rscf.ru/project/25-29-00013/>.

ABSTRACT

Introduction. Dispersed systems of the “solid particles in a liquid medium” type, are widely used in mechanical engineering. They are employed in technological processes for joining metal parts, ensuring the quality of the surface layer, and applying functional and protective coatings. Regardless of the material of the dispersed particles and the matrix, the main requirement for the systems under consideration is the homogeneity of the dispersed phase particle sizes and the uniformity of their distribution within the liquid medium. In this context, ultrasonic treatment is an effective method, which, through the collapse of cavitation bubbles, allows for the dispersion of large formations or particle agglomerates while simultaneously mixing the components via acoustic flows. Despite certain achievements with individual systems, there are currently no studies aimed at establishing the relationship between the properties of the liquid medium and the dispersed phase with the parameters of the ultrasonic treatment mode, which determine the cavitation-erosion activity and the intensity of acoustic flows. **The purpose of the work** is to study the influence of ultrasonic treatment parameters on liquid media and dispersed systems of different viscosities, aimed at establishing the relationship between the properties of the processed medium, processing modes, cavitation-erosion activity, and the nature of acoustic flows. **The paper investigates** model dispersed systems with viscosities ranging from 1 to 1,395 mPa·s, obtained from glycerol-water mixtures of varying concentrations with the addition of diamond dust and graphite powder. **Materials and methods.** For ultrasonic treatment, a rod-type magnetostrictive oscillatory system with a VT-3 alloy emitter having a diameter of 30 mm was used. Test objects made of aluminum foil were used to determine cavitation-erosion activity. To compare the cavitation regions beneath the emitter tip and determine the initial velocity of the acoustic flow, high-speed shooting was performed at a rate of 1,212 frames/s. When studying the dynamics of flow propagation throughout the entire processed volume, shooting was used at a speed of 25 frames/s. **Results and discussion.** An increase in the viscosity of a liquid medium and the presence of dispersed particles in it leads to a change in the cavitation zone beneath the emitter tip, which, in turn, alters the conditions for the formation of an acoustic flow. It was found that when treating dispersed systems, the acoustic flow is formed at lower ultrasonic vibration amplitudes than in pure liquids. The initial velocities of acoustic flows for liquids and dispersed systems of different viscosities range from 0.050 to 0.565 m/s. Due to the increase in the medium's absorption capacity and the growth of energy losses to maintain cavitation, the initial velocity for dispersed systems is lower than for liquids. With an increase in the oscillation amplitude, the difference between these values grows. Patterns of erosion damage on dispersed systems are characterized by the presence of a significant area with point damage, which is a consequence of cavitation bubble collapse near dispersed phase particles distributed throughout the processed volume. The height of the cavitation-erosion activity zone ranges from 20 to 50 mm, with the largest damage area achieved at the lowest flow velocity. Thus, the processing mode must ensure a minimum flow velocity sufficient to create the force necessary to lift particles and their agglomerates from the bottom of the container, while simultaneously maintaining high cavitation-erosion activity, which limits the volume of the processed dispersed system. Studies of the acoustic flow propagation dynamics enabled the establishment of the patterns of flow movement and determination of the dependence of its velocity reduction with distance from the emitter tip.

For citation: Sundukov S.K. Ultrasonic treatment features of liquid media and dispersed systems of various viscosities. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 1, pp. 6–28. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.1-6-28. (In Russian).

* Corresponding author

Sundukov Sergey K., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Moscow Automobile and Road Construction
State Technical University (MADI),
64 Leningradsky prospekt,
125319, Moscow, Russian Federation
Tel.: +7 926 369-19-70, e-mail: sergey-lefmo@yandex.ru

References

1. Ermolov A.V., Mazurovsky S.L., Kapranova A.B. Analysis of varieties of modern dispersing equipment. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2024, vol. 58 (3), pp. 497–503. DOI: 10.1134/S0040579524600888.
2. Shen Z., Zhang Z., Zhang N., Li J., Zhou P., Hu F., Rong Y., Lu B., Gu G. High-stretchability, ultralow-hysteresis conducting polymer hydrogel strain sensors for soft machines. *Advanced Materials*, 2022, vol. 34 (32), p. 2203650. DOI: 10.1002/adma.202203650.
3. Syrlybayev D., Zharylkassyn B., Seisekulova A., Akhmetov M., Perveen A., Talamona D. Optimization of strength properties of FDM printed parts – A critical review. *Polymers*, 2021, vol. 13 (10), p. 1587. DOI: 10.3390/polym13101587.
4. Azani M.-R., Hassanpour A. Nanotechnology in the fabrication of advanced paints and coatings: dispersion and stabilization mechanisms for enhanced performance. *ChemistrySelect*, 2024, vol. 9 (19), p. e202400844. DOI: 10.1002/slct.202400844.
5. Vertman A.A., Samarin A.M. *Svoistva rasplavov zheleza* [Properties of iron melts]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 280 p.
6. Shao H., Wu A., Bao Y., Zhao Y., Liu L., Zou G. Rapid Ag/Sn/Ag transient liquid phase bonding for high-temperature power devices packaging by the assistance of ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, vol. 37, pp. 561–570. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.02.016.
7. Bittmann-Hennes B., Hauptert F., Schlarb A.K. Preparation of TiO₂/epoxy nanocomposites by ultrasonic dispersion and their structure property relationship. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, vol. 18 (1), pp. 120–126. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2010.03.011.
8. Greenhall J., Homel L., Raeymaekers B. Ultrasound directed self-assembly processing of nanocomposite materials with ultra-high carbon nanotube weight fraction. *Journal of Composite Materials*, 2019, vol. 53 (10), pp. 1329–1336. DOI: 10.1177/0021998318801452.
9. Negrov D.A., Eremin E.N., Kuznetsov V.V. The use of ultrasonic exposure for the modification of synthesized composite materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 168 (1), p. 012018. DOI: 10.1088/1757-899X/168/1/012018.
10. More C., Alsayed Z., Badawi M.S., Thabet A.A., Pawar P.P. Polymeric composite materials for radiation shielding: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, vol. 19, pp. 2057–2090. DOI: 10.1007/s10311-021-01189-9.
11. Blinov A.V., Nagdalian A.A., Arefeva L.P., Varavka V.N., Kudryakov O.V., Gvozdenko A.A., Golik A.B., Blinova A.A., Maglakelidze D.G., Filippov D.D., Lapin V.A., Nazaretova E.D., Shariati M.A. Nanoscale composite protective preparation for cars paint and varnish coatings. *Coatings*, 2022, vol. 12 (9), p. 1267. DOI: 10.3390/coatings12091267.
12. Mihăilă A., Danu M., Constanta I., Anghel I., Șofran I., Balanescu L., Tudorachi N., Lisa G. Thermal characterization and rheological behavior of some varnishes and paints used for wood protection. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2022, vol. 19 (7), pp. 6299–6314. DOI: 10.1007/s13762-021-03579-6.
13. Goh K.W.S., Tan K.L., Yeo S.H. Hybrid ultrasonic cavitation abrasive peening and electrochemical polishing on additively manufactured AlSi10Mg components. *Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Surface Enhancement (INCASE) 2023*. Singapore, Springer, 2023, pp. 59–66. DOI: 10.1007/978-981-99-8643-9_7.
14. Sun M., Toyserkani E. A novel hybrid ultrasound abrasive-driven electrochemical surface finishing technique for additively manufactured Ti6Al4V parts. *Inventions*, 2024, vol. 9 (2), p. 45. DOI: 10.3390/inventions9020045.
15. Camargo I., Morais M., Fortulan C., Branciforti M. A review on the rheological behavior and formulations of ceramic suspensions for vat photopolymerization. *Ceramics International*, 2021, vol. 47 (9), pp. 11906–11921. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.01.031.
16. Wen Y., Chen C., Xue Z., Liu H., Zhou X., Zhang Y., Li D., Xie X., Mai Y.-W. Advances on thermally conductive epoxy-based composites as electronic packaging underfill materials – A review (Adv. Mater. 52/2022). *Advanced Materials*, 2022, vol. 34 (52), p. 2201023. DOI: 10.1002/adma.202270358.
17. Yunusov B., Tazhiddinova M. Research of the processes of drying, disaggregation and separation of powder cellulose in one apparatus. *AIP Conference Proceedings*, 2023, vol. 2552 (1), p. 050033. DOI: 10.1063/5.0130122.
18. Ratov B., Bondarenko M., Mechnik V., Strelchuk V., Prikhna T., Kolodnitskyi V., Nikolenko A., Lytvyn P., Danylenko I., Moshchil V., Gevorkyan E., Kosminov A., Borash A. Structure and properties of WC–Co composites

with different CrB₂ concentrations, sintered by vacuum hot pressing, for drill bits. *Journal of Superhard Materials*, 2021, vol. 43 (5), pp. 344–354. DOI: 10.3103/S1063457621050051.

19. Yao C., Wang M., Ni Y., Wang D., Zhang H., Xing L., Gong J., Bao Y. Effect of traveling-wave magnetic field on dendrite growth of high-strength steel slab: Industrial trials and numerical simulation. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2023, vol. 30 (9), pp. 1716–1728. DOI: 10.1007/s12613-023-2629-2.

20. Song K., Lin Z., Fa Y., Zhao X., Zhu Z., Ya W., Sun Z., Yu X. Microstructure and mechanical properties of high-strength, low-alloy steel thin-wall fabricated with wire and arc additive manufacturing. *Metals*, 2023, vol. 13 (4), p. 764. DOI: 10.3390/met13040764.

21. Babachenko O., Kononenko G., Podolskyi R., Safronova O. Steel for railroad rails with improved operating properties. *Materials Science*, 2021, vol. 56 (6), pp. 814–819. DOI: 10.1007/s11003-021-00499-1.

22. Samal S. Effect of shape and size of filler particle on the aggregation and sedimentation behavior of the polymer composite. *Powder Technology*, 2020, vol. 366, pp. 43–51. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.02.054.

23. Gallego-Juarez J., Graff K. *Power ultrasonics: applications of high-intensity ultrasound*. Elsevier, 2014. 1166 p. ISBN 978-0-12-820254-8.

24. Rozenberg L.D. *Fizika i tekhnika moshchnogo ul'trazvuka*. T. 3. *Fizicheskie osnovy ul'trazvukovoi tekhnologii* [Physics and technology of high-power ultrasound. Vol. 3. Physical foundations of ultrasonic technology]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 689 p.

25. Prihod'ko V.M. *Ul'trazvukovye tekhnologii pri proizvodstve i remonte avtotraktornoi tekhniki* [Ultrasonic technologies in the production and repair of automotive equipment]. Moscow, Tekhpolicraftsentr Publ., 2003. 252 p. ISBN 5-900095-16-9.

26. Leong T., Collis J., Manasseh R., Ooi A., Novell A., Bouakaz A., Ashokkumar M., Kentish S. The role of surfactant headgroup, chain length, and cavitation microstreaming on the growth of bubbles by rectified diffusion. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2011, vol. 115 (49), pp. 24310–24316. DOI: 10.1021/jp208862p.

27. Sundukov S.K. *Ul'trazvukovye tekhnologii v protsessakh polucheniya neraz'emnykh soedinenii* [Ultrasonic technologies in the processes of obtaining permanent connections]. Moscow, Tekhpolicraftsentr Publ., 2023. 263 p. ISBN 978-5-94385-209-1.

28. Fatyukhin D.S., Nigmatzyanov R.I., Prihodko V.M., Sukhov A.V., Sundukov S.K. A comparison of the effects of ultrasonic cavitation on the surfaces of 45 and 40Kh steels. *Metals*, 2022, vol. 12 (1), p. 138. DOI: 10.3390/met12010138.

29. Mason T., Lindley J., Davidson R., Lorymer J., Gudvin T. *Chemistry with ultrasound*. London, New York, 1990 (Russ ed.: Meison T., Lindli Dzh., Devidson R., Lorimer Dzh., Gudvin T. *Khimiya i ul'trazvuk*. Moscow, Mir Publ., 1993. 190 p.).

30. Kazancev V.F., Fatyukhin D.S. O mekhanizme degazatsii pri vysokoamplitudnoi ul'trazvukovoi zhidkostnoi obrabotke [About the mechanism of degassing at high amplitude to ultrasonic liquid processing]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI) = Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)*, 2013, vol. 3 (34), pp. 37–42.

31. Timothy J.M. Ultrasonic cleaning: An historical perspective. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, vol. 29, pp. 519–523. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2015.05.004.

32. Panov A.P. *Ul'trazvukovaya ochistka pretsizionnykh detalei* [Ultrasonic cleaning of precision parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 88 p.

33. Watanabe T., Shiroki M., Yanagisawa A., Sasaki T. Improvement of mechanical properties of ferritic stainless steel weld metal by ultrasonic vibration. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, vol. 210, pp. 1646–1651. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.05.015.

34. Cui Y., Xu C., Han Q. Microstructure improvement in weld metal using ultrasonic application. *Advanced Engineering Materials*, 2007, vol. 9 (3), pp. 161–163. DOI: 10.1002/adem.200600228.

35. Ganiev M.M. Influence of ultrasonic machining on physico-mechanical properties of adhesive joints and epoxide compounds. *Russian Aeronautics (Iz VUZ)*, 2008, vol. 51 (2), pp. 223–225. DOI: 10.3103/S1068799808020190.

36. Ghosh P.K., Patel A., Kumar K. Adhesive joining of copper using nano-filler composite adhesive. *Polymer*, 2016, vol. 87, pp. 159–169. DOI: 10.1016/j.polymer.2016.02.006.

37. Wang J., Zhu J., Liew P.J. Material removal in ultrasonic abrasive polishing of additive manufactured components. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9 (24), p. 5359. DOI: 10.3390/app9245359.

38. Tan K.L., Yeo S.H. Surface modification of additive manufactured components by ultrasonic cavitation abrasive finishing. *Wear*, 2017, vol. 378–379, pp. 90–95. DOI: 10.1016/j.wear.2017.02.030.

39. Sundukov S.K. Osobennosti nalozheniya ul'trazvukovykh kolebaniy v protsesse svarki [Features of the superposition of ultrasonic vibrations in the welding process]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 50–66. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-50-66.

40. Sirotiyuk M.G. Ul'trazvukovaya kavitatsiya. Obzor [Ultrasonic cavitation]. *Akusticheskiy zhurnal = Soviet Physics. Acoustics*, 1962, vol. 8 (3), pp. 255–272. (In Russian).

41. Livanskiy A.N., Prihodko V.M., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. Research on the influence of ultrasonic vibrations on paint coating properties. *Transactions of Famena*, 2016, vol. 40 (1), pp. 129–138. EID: 2-s2.0-84964655329.

42. Sundukov S.K., Nechai A.A., Rakhmatulaev A.A. [Possibilities of ultrasonic processing in the production of polymer composite materials]. *Tekhnicheskaya akustika: razrabotki, problemy, perspektivy (TA2025)* [Technical acoustics: developments, problems, prospects (TA2025)]. Proceedings of the V International Scientific Conference, Tolyatti, 2025, pp. 40–41. EDN EMQSZL. (In Russian).

43. Sundukov S.K., Nigmatzyanov R.I., Fatyukhin D.S., Kol'dyushov V.K. Issledovanie mekhanizmov kavitatsionno-abrazivnoi obrabotki s pomoshch'yu vysokoskorostnoi s'emki. Ch. 2 [Investigation of mechanisms of cavitation-abrasive treatment by high-speed filming. Pt. 2]. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik = All materials: encyclopedic reference book*, 2025, vol. 8, pp. 27–34. DOI: 10.31044/1994-6260-2025-0-8-27-34.

44. Sundukov S.K., Nigmatzyanov R.I., Prihodko V.M., Fatyukhin D.S., Koldyushov V.K. Comparison of ultrasonic surface treatment methods applied to additively manufactured Ti-6Al-4V alloy. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 2, pp. 6–28. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.2-6-28.

Conflicts of Interest

The author declares no conflict of interest.

© 2026 The Author. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).