

DOI: <http://doi.org/10.17816/rjpb627509>

Перспективные технологии предстерилизационной ультразвуковой очистки медицинских изделий для безопасности пациента в физиотерапии и медицинской реабилитации

Т.Н. Зайцева¹, М.Ю. Герасименко^{1,2}, И.С. Евстигнеева¹, О.М. Перфильева¹¹ Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования, Москва, Россия;² Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Интенсивное внедрение в практику инновационных технологий с целью повышения эффективности лечебно-диагностических мероприятий и снижения негативного влияния на организм человека тем не менее способствует возникновению нежелательных реакций, непосредственно связанных с оказанием медицинской помощи. В комплексе противоэпидемических мероприятий, направленных на исключение инфицирования в медицинских организациях, большая роль принадлежит правильной организации и выполнению предстерилизационной очистки медицинских изделий. Технологии обработки медицинских изделий, а также предстерилизационной очистки должны быть удобными и безопасными в применении, не оказывать повреждающего действия на обрабатываемые изделия, быть высокоэффективными и при этом нетрудозатратными. Перспективной на сегодняшний день остаётся очистка с использованием ультразвуковых установок, с помощью которых осуществляется стандартизация процесса обработки, уменьшается влияние человеческого фактора на качество очистки, а также в автоматическом режиме выполняется контроль основных критических параметров процесса.

Цель обзора — обосновать перспективность метода ультразвукового воздействия для обработки и предстерилизационной очистки медицинских изделий при соблюдении безопасности для пациента и персонала.

Результаты данного литературного обзора отражают сведения о безопасности и эффективности метода ультразвуковой предстерилизационной очистки медицинских инструментов, которые используются в физиотерапии и медицинской реабилитации. Приведены основные сведения о физической сущности процесса ультразвуковой очистки, его влиянии на биологические системы с позиций физического, биологического и химического воздействия, что обеспечивает безопасность проведения манипуляций и процедур в физиотерапии и медицинской реабилитации.

Ключевые слова: ультразвуковая очистка медицинских изделий; безопасность; физиотерапия; реабилитация.

Как цитировать:

Зайцева Т.Н., Герасименко М.Ю., Евстигнеева И.С., Перфильева О.М. Перспективные технологии предстерилизационной ультразвуковой очистки медицинских изделий для безопасности пациента в физиотерапии и медицинской реабилитации // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. 2023. Т. 22, № 5. С. 329–344. DOI: <http://doi.org/10.17816/rjpb627509>

Рукопись получена: 27.02.2024

Рукопись одобрена: 15.05.2024

Опубликована: 10.07.2024

DOI: <http://doi.org/10.17816/rjpr627509>

Promising technologies for pre-sterilization ultrasonic cleaning of medical devices for patient safety in physiotherapy and medical rehabilitation

Tatiana N. Zaytseva¹, Marina Yu. Gerasimenko^{1,2}, Inna S. Evstigneeva¹, Oksana M. Perfilova¹

¹ Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Moscow, Russia;

² The Russian National Research Medical University named after N.I. Pirogov, Moscow, Russia

ABSTRACT

Intensive introduction of innovative technologies into practice in order to improve the effectiveness of treatment and diagnostic measures and reduce the negative impact on the human body nevertheless contributes to the emergence of adverse events directly related to the provision of medical care. In the complex of anti-epidemic measures aimed at eliminating infection in medical organisations, a major role belongs to the correct organisation and performance of pre-sterilisation cleaning of medical devices. Technologies of processing of medical devices and pre-sterilisation cleaning should be convenient and safe to use, have no damaging effect on the processed items, be highly effective and at the same time not labour-intensive. Today cleaning with the use of ultrasonic units remains promising, with the help of which the standardisation of the treatment process is carried out, the influence of the human factor on the quality of cleaning is reduced, and the control of the main critical parameters of the process is carried out in automatic mode.

The purpose of the work is to justify the need to maintain the safety of the patient and staff using the promising use of ultrasonic influences.

The results of this literature review reflect information about the safety and effectiveness of the method of ultrasonic pre-sterilization cleaning of medical instruments used in physiotherapy and medical rehabilitation. Basic information is provided about the physical essence of the ultrasonic cleaning process, its effect on biological systems from the standpoint of physical, biological and chemical effects, which ensures the safety of manipulations and procedures in physiotherapy and medical rehabilitation.

Keywords: ultrasonic cleaning of medical devices; safety; physiotherapy; rehabilitation.

To cite this article:

Zaytseva TN, Gerasimenko MYu, Evstigneeva IS, Perfilova OM. Promising technologies for pre-sterilization ultrasonic cleaning of medical devices for patient safety in physiotherapy and medical rehabilitation. *Russian journal of the physical therapy, balneotherapy and rehabilitation*. 2023;22(5):329–344.

DOI: <http://doi.org/10.17816/rjpr627509>

Received: 27.02.2024

Accepted: 15.05.2024

Published online: 10.07.2024

ВВЕДЕНИЕ

Актуальным направлением является совершенствование технологий обработки медицинских изделий многократного применения, которые широко используются при физиотерапевтических процедурах, рефлексотерапии и лечебной физкультуре. Интенсивное внедрение в практику инновационных технологий с целью повышения эффективности лечебно-диагностических мероприятий и снижения негативного влияния на организм человека тем не менее способствует возникновению нежелательных явлений, связанных непосредственно с оказанием медицинской помощи. В комплексе противоэпидемических мероприятий, направленных на исключение инфицирования в медицинских организациях, большая роль принадлежит правильной организации и выполнению предстерилизационной очистки медицинских изделий. Особое внимание необходимо обращать на качество очистки не только инструментов и аппаратов, имеющих сложное строение и непосредственно контактирующих с кровью, но также эндотрахеальных трубок, катетеров, зондов, масок, электродов и др. На эффективность данного процесса оказывают влияние различные факторы, такие как правильный выбор методов, средств и аппаратуры, в том числе соблюдение медицинским персоналом требований и рекомендаций, отражённых в нормативных и методических документах.

Технологии обработки медицинских изделий, а также предстерилизационной очистки должны быть удобными и безопасными в применении, не оказывать повреждающего действия на обрабатываемые изделия, быть высокоэффективными и при этом нетрудозатратными [1–3]. Перспективной на современном этапе остаётся очистка с использованием ультразвуковых установок, с помощью которых осуществляется стандартизация процесса обработки, выполняется в автоматическом режиме контроль основных критических параметров процесса, что снижает влияние человеческого фактора на качество очистки. При данном способе полностью исключается этап ручной очистки каждого изделия в растворе при одновременном значительном сокращении времени обработки.

На сегодняшний день существует большое количество ультразвуковых установок различных производителей, отличающихся частотой ультразвуковых колебаний, числом ультразвуковых генераторов, объёмом и конфигурацией рабочих ёмкостей, возможностью подогрева растворов, однако принцип работы всех устройств ультразвуковой очистки основан на механическом воздействии ультразвуковых волн на загрязнения, находящиеся на поверхности изделий.

Цель работы — обосновать перспективность метода ультразвукового воздействия для обработки и предстерилизационной очистки медицинских изделий при соблюдении безопасности для пациента и персонала.

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К БЕЗОПАСНОСТИ ПАЦИЕНТА И ПЕРСОНАЛА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МАНИПУЛЯЦИЙ И ПРОЦЕДУР В ОТДЕЛЕНИЯХ ФИЗИОТЕРАПИИ И МЕДИЦИНСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ

Физическая сущность процесса ультразвуковой очистки

Любое колеблющееся тело (например, периодически сжимающаяся и разжимающаяся до прежнего состояния твёрдая пластина) заставляет колебаться себе в такт окружающую воздушную, жидкую или другую среду. Упругие механические колебания среды выражаются в том, что прилегающие к твёрдому телу слои воздуха или жидкости периодически поочерёдно сжимаются и разрежаются (разжимаются). Каждое колебание среды, состоящее из одного сжатия и разрежения, называется волной. Энергия, которую получают прилегающие к твёрдому телу слои воздуха или жидкости (и в результате которой они колеблются), передаётся соседним слоям, вызывая, соответственно, их колебания; другими словами, волны распространяются в среде, окружающей колеблющееся тело.

При распространении ультразвуковых волн в полупериод растяжения колеблющегося тела в водном растворе происходит возникновение пузырьков, заполненных парами жидкости и растворёнными в ней воздухом и другими газами, а в последующий полупериод сжатия колеблющегося тела — их захлопывание. Явление образования и захлопывания пузырьков в жидкости, сопровождающееся сильными гидравлическими ударами в местах захлопывания пузырьков, называется кавитацией. Ударная волна придаёт жидкости (на микроучастке захлопывания пузырька) огромное ускорение. Чем большее ускорение приобретает жидкость, тем большей силой, способной совершать работу, обладает масса этой жидкости. Механические усилия, развивающиеся при возникновении кавитации, не только удаляют с поверхности жировые загрязнения, но могут разрушать также оксидные плёнки [4–8]. Загрязнения полностью удаляются с изделия, когда захлопывание пузырьков происходит на его поверхности или вблизи него. В процессе кавитации интенсивно колеблющиеся пузырьки стремятся преимущественно скапливаться на участках поверхности изделия, где сплошная плёнка загрязнений уже частично разрушена и раздроблена при захлопывании предыдущих пузырьков. Они проникают под край остатков плёнки загрязнения, при этом загрязнения подвергаются давлению изнутри и растяжению снаружи, разность между которыми достигает очень больших значений. Это ещё больше способствует отслоению загрязнений и отрыву их от очищаемой поверхности [9].

По общепринятой терминологии, существуют два типа активности пузырьков — стабильная кавитация и коллапсирующая, или нестационарная, кавитация, хотя граница между ними не всегда чётко очерчена. Стабильные полости пульсируют под воздействием давления ультразвукового поля. Радиус пузырька колеблется около равновесного значения, полость существует в течение значительного числа периодов звукового поля. С активностью такой стабильной кавитации может быть связано возникновение акустических микропотоков и высоких сдвиговых напряжений. Коллапсирующие, или нестационарные, полости осциллируют неустойчиво около своих равновесных размеров, вырастают в несколько раз и энергично схлопываются. Схлопыванием таких пузырьков могут быть обусловлены высокие температуры и давления. Малые пузырьки могут расти вследствие процесса, называемого выпрямленной, или направленной, диффузией. Объяснение этого явления состоит в том, что за период акустического поля газ поочередно диффундирует в пузырёк во время фазы разрежения и из пузырька — во время фазы сжатия.

При прохождении ультразвуковых волн в жидкостях возникают различные эффекты [7, 10–13]. При интенсивности ультразвука более $0,3 \text{ Вт/см}^2$ в жидкой среде возникают следующие явления:

- 1) генерирование и передача тепла, возникающие вследствие потерь энергии, неизбежных при распространении ультразвуковых колебательных процессов;
- 2) кавитация, обуславливающая эрозию материалов, диспергирование, гомогенизацию, эмульгирование, ускорение диффузионных процессов;
- 3) акустические течения: стационарные вихревые микро- и макропотоки жидкости, возникающие в ультразвуковом поле при колебаниях воздушного пузырька вблизи поверхности твёрдого тела;
- 4) химические эффекты: ускорение различных химических реакций, деполимеризации, электрохимических процессов;
- 5) диффузионные эффекты: интенсификация процессов проникновения молекул и атомов через стенки клеток, пористые мембраны и фильтры; уменьшение толщины пограничного слоя на поверхности раздела жидкость–твёрдое тело;
- 6) механические эффекты, заключающиеся прежде всего в эрозии поверхности материалов, помещённых в озвучиваемую жидкость: эрозия возникает вследствие действия давлений, создаваемых при захлопывании кавитационных микропузырьков. Эти эффекты используются для удаления различных загрязнений, диспергирования и гомогенизации;
- 7) эффект вакуума: в фазе разрежения колеблющейся среды снижается температура кипения жидкости, что ускоряет сушку порошкообразных и пористых материалов при пониженной температуре;

8) капиллярные эффекты: под воздействием ультразвука значительно повышаются скорость и уровень подъёма жидкости в капиллярах, облегчается её проникновение в пористые и другие неоднородные материалы.

Кавитация возникает в жидкости там, где происходит местное понижение давления, следствием чего являются локальные разрывы на расстоянии нескольких микрометров. При акустической кавитации причиной местных разрывов жидкости служит гармонически меняющееся давление, возникающее при распространении ультразвуковых волн.

При низких интенсивностях ультразвукового поля (менее $0,3 \text{ Вт/см}^2$) образуются мелкие пузырьки диаметром до $0,1 \text{ мм}$, скапливающиеся в узлах стоячей волны и сохраняющиеся здесь некоторое время. Первопричиной их являются выделившиеся газы, которые коагулировали в пузырьки. Под действием периодически меняющегося давления пузырьки пульсируют и изменяют свой объём в соответствии с частотой изменения звукового давления. При повышении интенсивности ультразвука часть растворившихся газов начинает выделяться, сливаясь в крупные пузырьки, поднимающиеся к поверхности. Происходит дегазация. Описанный процесс называется газовой кавитацией, или псевдокавитацией. В дегазированной жидкости происходит истинная кавитация [7, 11]. При захлопывании кавитационного пузырька возникает местное повышение давления. Поскольку таких пузырьков образуется до нескольких миллионов в секунду, образуется кавитационная область, где действие указанных факторов весьма значительно. Захлопывание кавитационных пузырьков вызывает образование ударных волн, которые создают в ближайшей зоне давление, в 100 раз превышающее первичное давление акустического поля.

Увеличение частоты колебаний сопровождается уменьшением размеров полостей из-за сокращения времени цикла расширения и захлопывания. Число полостей поддерживается в равновесии в зависимости от акустического давления. С увеличением частоты колебаний также увеличивается порог кавитации.

При распространении ультразвуковых колебаний в различных жидких средах происходят необратимые потери энергии, обусловленные внутренним трением [6]. Следует учитывать, что при распространении ультразвуковых колебаний от излучающей поверхности в обрабатываемой среде возникает распределённое в пространстве поле звуковых давлений. При этом в структуре поля, создаваемого гармоническим излучателем, различают три области: дальнее ультразвуковое поле; область расстояний, сравнимых с размерами излучающей поверхности и длиной волны; область ближнего поля.

В настоящее время распространены несколько схем ультразвуковой очистки [14, 15], которые можно разделить по следующим признакам:

- по расположению излучателей в ванне (донное, боковое, комбинированное);
- связи излучателей с корпусом ванны (встроенные и погружные);
- конструкции активной накладки-волновода (с общим волноводом и индивидуальными волноводами);
- распределению интенсивности ультразвука в объёме ванны (с равномерным ультразвуковым полем и полем убывающей с расстоянием от излучателя интенсивности);
- частоте ультразвука (низкочастотные, высокочастотные, многочастотные, с модулированной частотой, пульсацией частоты);
- мощности (малой, средней, большой);
- качеству очистки (грубой высокопроизводительной очистки, тонкой и прецизионной очистки);
- степени автоматизации (неавтоматизированные, с управлением по таймеру, автоматизированные, с цифровым управлением);
- типу ультразвукового преобразователя (магнетострикционные и пьезокерамические);
- универсальные, специальные, линии комплексной очистки.

Как правило, в процессе очистки изделие помещают в ванну в подвешенном состоянии (например, в корзине) в области максимальной кавитации при воздействии ультразвука фиксированной частоты. Установлено, что на эффективность ультразвуковой очистки влияют частота ультразвука, его интенсивность, температура моющей жидкости и время озвучивания [13, 16]. Эффективность очистки выше при использовании меньших частот преобразователя и расположении деталей в пучностях волн. Так, при использовании частот порядка 20 кГц через 60 секунд в пучности колебаний остаётся только 0,1% загрязнений, а в узле — 10%. При использовании частот порядка 400 кГц через 180 секунд в пучности колебаний остаётся 75% загрязнений, в узле — 98%. Только в отдельных случаях, когда требования к качеству поверхности высоки, применяются большие частоты колебаний, т.к. интенсивная кавитация на малых частотах может повредить поверхность деталей. Время очистки и обезжиривания обратно пропорционально интенсивности ультразвука, но с увеличением интенсивности более 1 Вт/см² время обработки снижается незначительно. Поэтому в технологии очистки рекомендуют для водных растворов выбирать интенсивность колебаний 1,5–2 Вт/см², а для органических растворителей, имеющих более низкий порог кавитации, — 1–1,5 Вт/см². Применение высоких интенсивностей ультразвука помимо неоправданных энергозатрат плохо тем, что вблизи поверхности преобразователя образуется кавитационная подушка, снижающая эффективность очистки при увеличении расстояния от него. Оптимальная температура моющего раствора составляет, по литературным данным, 55–70°C [7, 16, 17].

Эффективность и безопасность ультразвуковой очистки медицинских изделий

С целью освобождения отработанного медицинского изделия от загрязнений проводится предстерилизационная очистка медицинских изделий. Исследования, проведённые на базе центральных стерилизационных отделений клиник Управления делами Президента Российской Федерации и НИИ нейрохирургии имени Н.Н. Бурденко, доказали бесперспективность стерилизации медицинских изделий, не отмытых или недостаточно отмытых после медицинских манипуляций. Была отработана не только качественная, но и количественная оценка влияния степени загрязнённости изделий на эффективность стерилизации, и выведено так называемое предстерилизационное число — массивность обсеменения изделий перед стерилизацией [18].

Предстерилизационную очистку некоторых видов медицинских инструментов и оборудования, чувствительных к воздействию высокой температуры и химических стерилизующих составов, рекомендуется осуществлять с помощью установок (моек) для ультразвуковой очистки. Ультразвуковые очистители предназначены для применения в медицинских организациях, химических, биологических и фармакологических лабораториях для предстерилизационной подготовки медицинских инструментов или лабораторного оборудования для дальнейшей стерилизации. С их помощью осуществляется обработка медицинских и лабораторных инструментов сложной формы и чувствительных к высоким температурам комплектующих, расходных материалов.

Ультразвуковая очистка инструмента осуществляется за счёт микроколебаний, распространяемых в моющем растворе специальным излучателем. При этом в жидкой среде возникают интенсивные потоки, а на поверхности очищаемых предметов проявляется эффект кавитации — образование пузырьков пара малого размера с их последующим схлопыванием. Из-за кратковременности и интенсивности этого процесса в водном растворе создаются гидроудары, разрушающие загрязнения [4–7]. Весь процесс осуществляется в специально оборудованной мойке, оснащённой аппаратурой, позволяющей контролировать и регулировать параметры очистки.

Метод ультразвуковой очистки обладает рядом преимуществ перед химической и термической обработкой инструментов [19–22]:

- малые размеры кавитационных пузырьков позволяют им проникать даже в труднодоступные места инструментов, а значит, обеспечивать более качественную очистку поверхности;
- отсутствует необходимость термической обработки, благодаря чему ультразвуковой очистке могут подвергаться предметы и материалы из термочувствительных полимеров;

- возникающее гидродинамическое воздействие эффективно разрушает большинство механических загрязнений, а также способствует очистке поверхности от колоний микроорганизмов, что облегчает дальнейшую стерилизацию;
- ультразвуковое воздействие практически не изменяет свойств раствора, а значит, не влияет на его дезинфицирующие свойства;
- ультразвуковая очистка инструментов осуществляется бесконтактным способом, поэтому их поверхность не портится, а заточенные кромки не тупятся;
- мойки для ультразвуковой очистки изготовлены таким образом, что участие человека в этом процессе сводится к минимуму, повышается качество обработки и сокращается время процедуры.

В отличие от ручной чистки, ультразвуковые очистители автоматизированы и стандартизированы и предназначены для очистки поверхностей инструмента, включая труднодоступные участки, от крупных и мелких загрязнений. Одно из проведённых исследований показало, что для удаления более 99,9% крови с загрязнённых инструментов достаточно всего лишь трёх минут ультразвукового воздействия [22]. Авторы определили ряд факторов, воздействие которых может повысить или понизить эффективность ультразвуковой очистки медицинских изделий [22].

1. Ни один из факторов не имеет такого большого значения, как физические свойства очищающего раствора, через который распространяются ультразвуковые волны.

Свойства очищающего раствора, которые включают его температуру, вязкость, плотность, давление пара и поверхностное натяжение, приводят к тому, что это пороговое значение изменяется таким образом, что изменения любого из этих свойств могут влиять на эффективность очистки. Помимо помощи в удалении загрязнений с инструментов, моющие средства повышают эффективность очистки, уменьшая поверхностное натяжение воды. Этот эффект повышает эффективность очистки за счёт (а) облегчения прохождения ультразвуковых волн через раствор моющего средства, (б) снижения минимального количества ультразвуковой энергии, необходимой для возникновения кавитации, (в) снижения сопротивления потоку моющего раствора через узкие просветы и отверстия инструмента. Для повышения эффективности очистки рекомендуется использовать совместимые с очищаемыми инструментами моющие средства. Российские авторы [23] также обращают внимание на то, что эффективность процесса предстерилизационной очистки механизированным способом (ультразвуковая очистка) зависит в том числе от правильного подбора моющего средства. В дополнение к этому выводу зарубежные авторы [24] при оценке антимикробной активности ультразвуковых очистителей пришли к заключению, что химическое воздействие моющим средством совместно с ультразвуковой очисткой приводило к большему снижению количества бактерий

(на 46,4–99,7%). Воздействие только тестируемого раствора (моющим средством) приводило к снижению числа бактерий с исходного на 19,9–52,6%. Однако при многократном использовании моющего раствора воздействие стало менее эффективным. Снижение было самым высоким при использовании свежих растворов для ультразвуковой очистки. Наряду с удалением прилипшего материала ультразвуковая очистка также может заметно уменьшить количество присутствующих жизнеспособных организмов [24].

2. Температура рабочего раствора также является важным фактором для физики кавитации и эффективности очистки.

Повышение температуры вызывает соответствующее увеличение давления паров моющего раствора и уменьшение минимальной энергии, необходимой для кавитации, поэтому рекомендуется смешивать моющее средство с тёплой водой, чтобы повысить эффективность моющих средств. Во избежание повреждения хирургического инструмента температура воды не должна превышать температурные параметры инструмента. Результаты исследований M.D. Bettner и соавт. [25] о влиянии ультразвуковой очистки на микроорганизмы показали, что при использовании ультразвуковой очистки с моющим средством при 21°C или 37°C погибло небольшое количество микроорганизмов (5–15%), а полная их гибель была достигнута при 60°C.

3. Специально разработанные корзины или лотки для инструментов, как правило, изготавливаются из нержавеющей стали (или другого звукоотражающего материала) и часто имеют форму, похожую на сито.

Такая форма обеспечивает эффективное прохождение ультразвуковых волн, что (а) максимизирует их воздействие на инструменты, (б) сводит к минимуму движение загрязнённых инструментов относительно друг друга во время ультразвуковой очистки, что может привести к повреждению дорогостоящего инструмента, и (в) предотвращает соприкосновение инструментов с дном технологического отсека, в котором могут быть установлены преобразователи; инструменты не мешают работе преобразователей и передаче ультразвуковых волн. Результаты исследований M.D. Bettner и соавт. [25] о влиянии ультразвуковой очистки на микроорганизмы также показали, что в процессе очистки очень мало бактерий выходило из ультразвуковых чистящих растворов в воздух, а размещение крышки блока эффективно снижало их выбросы до нуля.

4. Расположение загрязнённых инструментов в рабочей камере может оказывать такое же влияние на эффективность очистки, как и выбор моющего средства.

Ультразвуковая энергия является однонаправленной и распространяется от своего источника (преобразователя) в одном направлении через раствор моющего средства. Это потенциальное ограничение может быть преодолено путём правильного размещения загрязнённых

инструментов в корзине (или лотке) для обработки, чтобы максимизировать их воздействие и контакт с ультразвуковыми волнами. Размещение наиболее загрязнённой поверхности загрязнённого инструмента по направлению ко дну рабочей ванны ультразвукового очистителя оптимизирует эффективность очистки.

5. Время очистки.

В дополнение к типу и температуре моющего средства, время, необходимое для очистки инструмента, зависит, среди прочего, от (а) количества и расположения загрязнённого инструмента в технологической ванне, (б) степени загрязнения инструмента (например, слегка загрязнённая, сильно загрязнённая) и (в) частоты и мощности ультразвукового очистителя. Вместе с тем результаты исследований S.A. Aasim и соавт. [26] не выявили линейной зависимости между чистотой и временем ультразвуковой очистки. В качестве оптимального времени для ультразвуковой очистки авторами рекомендован интервал 5–10 минут. Дальнейшее воздействие ультразвука до 60 минут с шагом 5 минут не улучшало чистоту изделий.

6. Пузырьки воздуха.

В отличие от слышимых звуковых волн, излучаемых стереодинамиками, для их эффективной передачи ультразвуковые волны требуют жидкой среды. Следовательно, поверхности инструментов, на которые попал воздушный пузырь, не могут быть эффективно очищены ультразвуковой энергией. Также инструменты не могут быть эффективно очищены ультразвуковой энергией, если между ними остаются воздушные карманы. Точно так же растворы моющих средств, которые содержат пузырьки воздуха и другие газы, будут мешать эффективной передаче ультразвуковых волн, снижая эффективность очистки. Однако после того как цикл ультразвуковой очистки активирован, можно ожидать дегазации моющего раствора или другой жидкой среды.

Несмотря на все свои преимущества, ультразвуковая очистка, как и любой процесс дезактивации, имеет свои ограничения, и понимание каждого из них обеспечивает безопасное использование и эффективное применение данного метода. Например, некоторые инструменты могут быть изготовлены из деликатных материалов (кварц, кремний и углеродистая сталь), повреждающихся при длительном ультразвуковом воздействии. Повреждения инструментов могут быть сведены к минимуму или исключены за счёт уменьшения мощности и времени ультразвуковой очистки [22].

С целью обоснования выбора оптимальных методов стерилизации эндодонтического инструментария в 2015 году на базе ГБОУ ВПО «Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова» Минздрава России было проведено исследование по изучению режущей активности новых и подвергшихся многократной стерилизации эндодонтических инструментов на основании лабораторных исследований. При оценке влияния различных методов предстерилизационной

очистки и стерилизации на свойства эндодонтического инструментария установлено, что ультразвуковая очистка и сухожаровая обработка в большей степени изменяют свойства инструментов. Было показано, что на этапе предстерилизационной очистки эндодонтического инструментария ручная мойка практически не оказывает негативного влияния на его режущую активность, в то время как ультразвуковая обработка значительно её снижает [27].

Моделирование количественных характеристик и режимов ультразвуковой кавитации в исследовании С.П. Скворцова и Д.П. Сляднева [28] подтверждает предположение о существовании оптимальных параметров воздействия и показывает возможность снижения риска нежелательных побочных эффектов путём их подбора и уменьшения амплитуды колебаний излучателя при одной и той же амплитуде давления в ударной волне.

Медико-биологические испытания различных образцов отечественных ультразвуковых установок, а также изучение эффективности ряда моющих и моюще-дезинфицирующих средств в сочетании с ультразвуком показали, что данный метод пригоден для предстерилизационной очистки разнообразных металлических инструментов, используемых в медицинской практике, имея преимущества перед ручным способом очистки [19].

И.М. Абрамова [23] описывает предстерилизационную очистку инструментов механизированным способом как перспективное направление. Анализ имеющихся данных показывает, что ультразвуковые установки разных марок и разных производителей отличаются частотой ультразвуковых колебаний, числом ультразвуковых генераторов, объёмом и конфигурацией рабочих ванн, возможностью подогрева растворов.

Оценка комплекса мероприятий по неспецифической профилактике инфекций, связанных с оказанием медицинской помощи, к которым относится предстерилизационная очистка (на примере 600-коечной больницы), показала, что аппаратная предстерилизационная очистка медицинских изделий более целесообразна как экономически, так и по качественным показателям в сравнении с ручным методом обработки. Моечный аппарат, окупая себя за два года за счёт экономии трудозатрат и расходных материалов, позволяет добиться 100% гарантии качества очистки медицинских изделий и обеспечить этим предпосылки для эффективной стерилизации. В тех клиниках, где имеются хорошо оснащённые центральные стерилизационные отделения, используются различные методы предстерилизационной очистки: моечно-дезинфекционные машины струйного типа, ультразвуковые ванны, роторные (по типу стиральных машин) автоматы. Для того чтобы обеспечить качественную предстерилизационную очистку всех видов и типов медицинского инструментария, необходим комплекс всех трёх указанных методов. Однако ограниченные финансовые возможности и проблема с помещениями часто не позволяют разместить в центральном стерилизационном отделении все

указанные типы моечного оборудования, что диктует необходимость внедрения новых передовых унифицированных технологий предстерилизационной очистки в виде комплексного сочетания в одном цикле нескольких методов [18].

Исследования, проведённые на базе НИИ дезинфектологии, НИИ эпидемиологии, Института травматологии и ортопедии имени Вредена, показали, что применение, к примеру, отечественных моек УЗО «МЕДЭЛ» позволяет не только совместить процессы дезинфекции и предстерилизационной очистки, но и сократить время, равное дезинфекционной экспозиции, более чем на треть. Преимущества ультразвуковой очистки инструментов рассматриваются как наиболее эффективный путь к решению проблемы с инфекциями, связанными с оказанием медицинской помощи, в том числе сведению её к минимуму и для медицинского персонала. В публикации отмечается и тот факт, что многие дезинфицирующие средства обладают фиксирующим действием, и после их использования очистить медицинские инструменты от загрязнений становится труднее. Эти проблемы были решены внедрением в процесс предстерилизационной очистки ультразвуковых установок УЗО «МЕДЭЛ», за счёт чего не только уменьшилось количество необходимых ёмкостей, сократился расход дезинфицирующих средств, снизилось время обработки, но и удалось сэкономить площадь отделения [21, 29].

Воздействие ультразвука на биологические системы

Ультразвук — область акустических колебаний в диапазоне от 18 кГц до 100 МГц и выше.

По спектральным характеристикам ультразвуковых колебаний выделяют низкочастотный (16–63 кГц: указаны среднегеометрические частоты октавных полос, распространяющиеся воздушным и контактным путём), среднечастотный (125–250 кГц) и высокочастотный (1,0–31,5 МГц, распространяющиеся только контактным путём) ультразвук.

Источником ультразвука является оборудование, в котором генерируются ультразвуковые колебания для выполнения технологических процессов, технического контроля и измерений промышленного, медицинского, бытового назначения, а также оборудование, при эксплуатации которого ультразвук возникает как сопутствующий фактор.

По способу распространения ультразвуковых колебаний выделяют контактный (ультразвук распространяется при соприкосновении рук или других частей тела человека с источником ультразвука) и воздушный (ультразвук распространяется по воздуху) способы.

Как было показано в предыдущих разделах, при распространении интенсивных (более 1–2 Вт/см²) ультразвуковых колебаний в жидкости наблюдается обусловленный ультразвуковым давлением эффект, называемый ультразвуковой кавитацией. Кавитационные пузырьки

совершают пульсирующие колебания, приводящие к активной локальной турбулизации среды. После кратковременного существования часть пузырьков захлопывается, при этом наблюдаются локальные мгновенные давления, достигающие сотен и тысяч атмосфер. При захлопывании кавитационных пузырьков наблюдаются также локальные повышения температуры и электрические разряды. Интенсивность, соответствующая порогу кавитации, зависит от рода жидкости, частоты звука, температуры и других факторов. В воде на частоте 20 кГц она составляет около 0,3–1 Вт/см². Выявлено, что в диапазоне частот (5–10)×10³ Гц отмечаются такие физико-химические явления, как разделение молекул и ионов с различной массой, искажение формы волны, появление переменного электрического поля, капиллярно-акустического и теплового эффекта, активация диффузии.

При действии ультразвука на биологические объекты в облучаемых органах и тканях на расстояниях, равных половине длины волны, могут возникать разности давлений от единиц до десятков атмосфер. Столь интенсивные воздействия приводят к разнообразным биологическим эффектам, физическая природа которых определяется совместным действием механических, тепловых и физико-химических явлений, сопутствующих распространению ультразвука в среде. Большинство первичных физико-химических реакций в живом организме при действии ультразвука локальны. Однако эти воздействия могут вызывать реакцию организма в целом [30, 31].

Изменения, вызываемые в жизнедеятельности и структурах биологических объектов при воздействии на них ультразвука, определяются главным образом его интенсивностью и длительностью облучения и могут оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на жизнедеятельность организмов. Так, возникающие при сравнительно небольших интенсивностях ультразвука (до 1,5 Вт/см²) механические колебания частиц производят своеобразный микромассаж тканей, способствующий лучшему обмену веществ и лучшему снабжению тканей кровью и лимфой. Локальный нагрев тканей на доли и единицы градусов способствует, как правило, жизнедеятельности биологических объектов, повышая интенсивность процессов обмена веществ. Ультразвук большой интенсивности (3–10 Вт/см²) оказывает вредное воздействие на отдельные органы и человеческий организм в целом. Высокая интенсивность ультразвука может привести к возникновению в биологических средах акустической кавитации, сопровождающейся механическим разрушением клеток и тканей. Длительные интенсивные воздействия ультразвуком могут привести к перегреву биологических структур и их разрушению (денатурация белков и др.). Воздействие интенсивного ультразвука может иметь и отдалённые последствия. Например, при длительных воздействиях ультразвука частотой 20–30 кГц, возникающих в некоторых производственных условиях, у человека появляются расстройства нервной

системы, повышается утомляемость, существенно поднимается температура, возникают нарушения органа слуха.

Защита от ультразвука включает в себя использование изолирующих корпусов (например, в мойках для ультразвуковой очистки) и экранов, изоляцию излучающих установок, оборудование дистанционного управления, средства индивидуальной защиты.

Механическое действие ультразвука на биологические объекты

Механический эффект обусловлен самой природой ультразвука, представляющего собой колебательное движение частиц газообразных, жидких и твёрдых сред, и связан с переменным акустическим давлением во время сжатия и растяжения среды и силами, развивающимися вследствие больших ускорений частиц.

Механическое действие, обусловленное переменным акустическим давлением, заключается в вибрационном массаже тканей на клеточном и субклеточном уровнях. Это происходит за счёт изменения проводимости ионных каналов мембран клеток и усиления микропотоков метаболитов в цитозоле и органоидах, повышения проницаемости клеточных и внутриклеточных мембран вследствие деполимеризующего действия на гиалуроновую кислоту. Наблюдаются разрыв лизосом, выход ферментов, активация мембранных ферментов и, как результат, активация обменных процессов, тисотропные (разрыхление соединительной ткани) и тиксотропный (переход геля в золь) эффекты. Высокочастотные механические колебания усиливают проницаемость гистогематических барьеров.

При воздействии ультразвука на биологические объекты частицы среды совершают интенсивные колебательные движения, при этом, например, в жидкостях (мягких тканях) при интенсивности ультразвука 1 Вт/см^2 на частоте 1 МГц амплитуда смещений составляет 0,2 мкм, амплитуда колебательной скорости — 12 см/с. При малой интенсивности эти колебания обуславливают массаж структурных элементов ткани, что способствует улучшению обмена веществ. Возникающие при этом смещения стенок клеток приближаются к пороговым смещениям, обуславливающим биоэлектрическую активность механорецепторов. На частоте 10 МГц пороговые смещения элементов клеток будут происходить уже при интенсивности $0,1 \text{ Вт/см}^2$. Таким образом, живая клетка может испытывать значительные воздействия уже при довольно низких интенсивностях высокочастотного ультразвука.

Механическим резонансом определяется физико-химическое действие ультразвука, под влиянием которого ускоряется движение молекул, усиливается их распад на ионы, изменяется изоэлектрическое состояние, появляются свободные радикалы и различные продукты сонолиза биологических растворителей. Активируется перекисное окисление липидов, наблюдаются местная стимуляция биохимических процессов в тканях

и активизация обмена веществ, увеличивается количество простагландинов группы А₂, меняется рН тканей, из тучных клеток высвобождаются гистамин, серотонин, гепарин [30, 31].

Тепловое действие ультразвука на биологические объекты

Тепловой эффект действия ультразвука зависит от его интенсивности и длительности. Прохождение ультразвука в средах сопровождается их нагреванием вследствие превращения механической энергии в тепловую в результате поглощения ультразвука. Кроме того, образование тепла обусловлено физическим явлением, называемым «эффектом пограничных поверхностей». Сущность его заключается в усилении действия ультразвука на границе раздела двух сред. Усиление теплового эффекта связано с отражением колебаний от пограничных поверхностей: чем больше отражение, тем больше выражено действие. Тепло накапливается на границах различных сред (граница раздела тканей с различным акустическим импедансом), в тканях, больше всего поглощающих ультразвуковую энергию (нервная, костная ткани; богатые коллагеном фасции), что повышает их эластичность, а также в местах с недостаточным кровоснабжением, так как кровь отводит тепло.

Интенсивность ультразвука ослабевает с расстоянием по экспоненциальному закону. Величина поглощения в жидкой среде значительно меньше, чем в мягких, и тем более плотной ткани. При частоте 1 МГц на расстоянии 1 см уровень интенсивности ультразвуковой энергии уменьшается в мягких тканях, мышцах и костях на 1, 2,3 и 13 дБ соответственно. С ростом частоты поглощение резко возрастает. Так, на частоте 3 МГц в мышцах и костях уменьшение уровня интенсивности составляет соответственно 5 и 55 дБ.

Повышение температуры среды будет определяться интенсивностью, продолжительностью воздействия, частотой ультразвука, режимом воздействия (непрерывный, импульсный), свойствами среды. Нагрев тканей на доли и единицы градусов приводит, как правило, к перегреву тканей и их гибели [30, 31].

Химическое действие ультразвука на биологические объекты

При распространении ультразвука могут образовываться ионы и радикалы. Один из механизмов этого процесса следующий. При образовании кавитационных полостей на пограничных поверхностях возможно возникновение электрических зарядов. При захлопывании каверн молекулы среды движутся с большой скоростью и испытывают взаимное трение. В результате всего этого молекулы среды могут возбуждаться и ионизироваться, так как возможен разрыв молекулярных связей. Это приводит также к образованию ионов и радикалов. В частности, ионизация молекул воды приводит к образованию

свободных гидроксильных радикалов и атомарного водорода ($H_2O \rightarrow HO+H$).

В химическом отношении продукты распада ионизированных молекул воды крайне активны. Именно их большой активностью обусловлен ряд общебиологических эффектов, проявляющихся под влиянием ультразвука: окисляющее действие ультразвука, распад белков, деполимеризация белковых соединений, инактивация ферментов, ускорение химических реакций, изменение pH среды, расщепление высокомолекулярных соединений. Все возникшие реакционноспособные вещества могут вступать во взаимодействие с различными молекулами, т.е. оказывать химическое действие на молекулярном уровне [30, 31].

Биологическое действие ультразвука на клеточном уровне

При действии ультразвука на биологические объекты в облучаемых объектах на расстояниях, равных половине длины волны, могут возникать разности давлений от единиц до десятков атмосфер. Столь интенсивные воздействия приводят к разнообразным биологическим эффектам, физическая природа которых определяется совместным действием механических, тепловых и физико-химических явлений, сопутствующих распространению ультразвука в среде. Биологическое действие, т.е. изменения, вызываемые в жизнедеятельности и структурах биологических объектов при воздействии на них ультразвука, определяется главным образом интенсивностью ультразвука и длительностью облучения и может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на жизнедеятельность организмов. Так, возникающие при сравнительно небольших интенсивностях ультразвука ($1-2 \text{ Вт/см}^2$) механические колебания частиц производят своеобразный микромассаж тканей, способствующий лучшему обмену веществ и лучшему снабжению тканей кровью и лимфой. Повышение интенсивности может привести к возникновению акустической кавитации, сопровождающейся механическим разрушением клеток и тканей. Облучение ультразвуком с интенсивностью, превышающей порог кавитации, используют для разрушения имеющихся в жидкости бактерий и вирусов.

При действии ультразвука могут возникать вторичные физико-химические эффекты. Так, при образовании акустических потоков может происходить перемешивание внутриклеточных структур. Кавитация приводит к разрыву молекулярных связей в биополимерах и других жизненно важных соединениях и развитию окислительно-восстановительных реакций. Микропотоки могут отрывать от клеточных мембран биологические макромолекулы (ферменты, гормоны, антигены), изменять поверхностный заряд мембран и их проницаемость, оказывая этим влияние на жизнедеятельность клетки.

На клеточном уровне ультразвуковое воздействие приводит к изменению проницаемости клеточных мембран.

Изменение потока различных веществ через цитоплазматическую мембрану приводит к нарушению состава внутриклеточной среды и микроокружения клетки, что влияет на скорость биохимических реакций с участием ферментов, чувствительных к содержанию в среде тех или иных ионов. В некоторых случаях изменение состава среды внутри клетки может привести к ускорению ферментативных реакций, что наблюдается при воздействии на клетки ультразвуком низких интенсивностей.

При повышении интенсивности ультразвука наиболее вероятным становится эффект подавления ферментативных реакций в клетке, так как в результате деполяризации клеточных мембран концентрация ионов калия во внутриклеточной среде уменьшается, а концентрация ионов натрия — возрастает. Многие внутриклеточные ферменты активируются ионами калия.

Механизм действия ультразвука на клетки можно представить в виде следующих явлений:

- 1) нарушение микроокружения клеточных мембран в виде изменения градиентов концентрации различных веществ около мембран, изменение вязкости среды внутри и вне клетки;
- 2) изменение проницаемости клеточных мембран в виде ускорения обычной и облегчённой диффузии, изменения эффективности активного транспорта, нарушения структуры мембран: изменение проницаемости клеточных мембран является универсальной реакцией на ультразвуковое воздействие независимо от того, какой из факторов ультразвука, действующего на клетку, превалирует в том или ином случае;
- 3) нарушение состава внутриклеточной среды в виде изменения концентрации различных веществ в клетке;
- 4) изменение скоростей ферментативных реакций в клетке вследствие изменения оптимальных концентраций веществ, необходимых для функционирования ферментов;
- 5) отделение клетки от ферментов;
- 6) разрушение таких внутриклеточных структур, как митохондрии и хлоропласты, с целью изучения взаимосвязи между их структурой и функциями;
- 7) образование мутаций: ультразвук даже малой интенсивности может повредить молекулу ДНК, при этом ультразвук имеет преимущество перед другими мутагенами (рентгеновские лучи, ультрафиолетовые лучи), так как с ним чрезвычайно легко работать;
- 8) способность ультразвука разрывать оболочку клетки (мембрану).

В определённом интервале интенсивностей наблюдаемые биологические эффекты ультразвука обратимы. Верхняя граница этого интервала $0,1 \text{ Вт/см}^2$ при частоте $0,8-2 \text{ МГц}$ и длительности $1-10^{-3}$ секунд может быть принята в качестве порога. Превышение этой границы

приводит к выраженным деструктивным изменениям в клетках. Возникновение кавитации приводит к лизису клеток. При действии ультразвука на форменные элементы крови возможно повреждение тромбоцитов с риском образования тромбов, при этом эритроциты оказываются более устойчивыми [30, 31].

Затухание (ослабление) ультразвуковых волн

По законам ультраакустики, интенсивность ультразвука уменьшается с увеличением расстояния от источника волны. Эти потери объясняются механизмами рассеяния и поглощения, действующими в среде. Явления рассеяния и поглощения часто обозначаются общим термином «затухание», или «ослабление» [32].

Основные параметры ультразвуковой волны. Основными параметрами ультразвуковой волны являются длина волны и период (рис. 1). Число циклов, совершённых за одну секунду, называется частотой и измеряется в Герцах (Гц). Время, требуемое для совершения полного цикла, называется периодом и измеряется в секундах.

Большинство методов в медицине использует продольные или поперечные волны. Продольными ультразвуковыми волнами называются волны, направление распространения которых совпадает с направлением смещений и скоростей частиц среды;

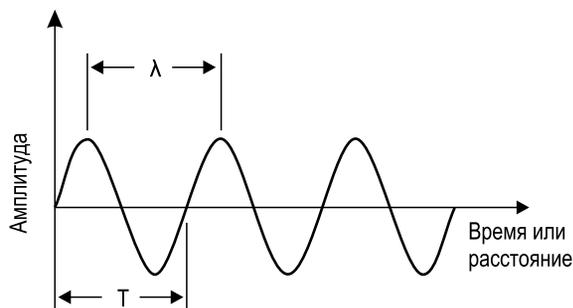


Рис. 1. Основные параметры ультразвуковой волны.

Fig. 1. Basic parameters of ultrasonic wave.

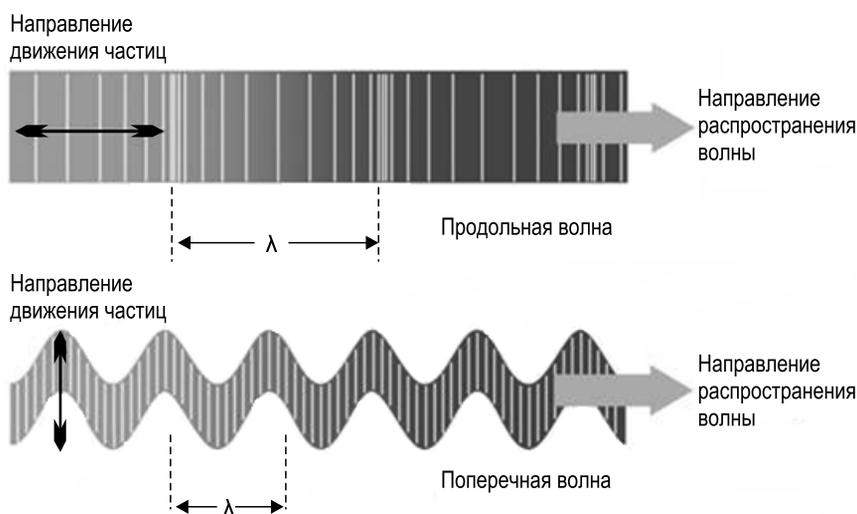


Рис. 2. Движение частиц в продольных и поперечных ультразвуковых волнах.

Fig. 2. Particle movement in longitudinal and transverse ultrasonic waves.

поперечными ультразвуковыми — волны, распространяющиеся в направлении, перпендикулярном к плоскости, в которой лежат направления смещений и скоростей частиц тела, то же, что и сдвиговые волны (рис. 2). Существуют также и другие формы распространения ультразвука, включая поверхностные волны и волны Лэмба¹ [17]. В табл. 1 приведены свойства некоторых наиболее распространённых материалов [33].

Основные эффекты затухания (ослабления) ультразвуковой волны. Затухание (ослабление) ультразвуковых волн в среде объясняется механизмами рассеяния и поглощения [17, 32]. Рассеяние обусловливается тем, что материал не является строго однородным. В нём имеются граничные поверхности, на которых звуковое сопротивление внезапно изменяется, поскольку так соприкасаются, по сути, два вещества с различной плотностью или скоростью звука. Такими неоднородностями могут быть посторонние включения или собственно дефекты материала, возможны и неоднородные по самой своей природе материалы: например, в сталях кристаллиты различной структуры и разного химического состава как бы пронизывают друг друга.

Когда среда идеально однородная, рассеяние ультразвуковых волн отсутствует. В неоднородной среде оно всегда есть. Но даже если материал состоит только из кристаллов одного вида, он может быть неоднородным для ультразвуковых волн, если зёрна расположены беспорядочно, поскольку отдельные кристаллы всегда имеют различные упругие свойства в различных направлениях, следовательно, и разные скорости звука. В веществах с очень большим размером зёрен по сравнению с длиной волны процесс рассеяния можно представить геометрически: на наклонной границе раздела волна

¹ General Electric Sensing. Ultrasonic transducers technical notes. Panametrics-NDT. Режим доступа: <https://blog.mbedded.ninja/docs/olympus-ultrasonic-transducers-technical-notes.pdf>.

Таблица 1. Свойства некоторых распространённых материалов**Table 1.** Properties of some common materials

Материал	Плотность, кг/м ³	Скорость продольной волны, м/с	Скорость поперечной волны, м/с	Акустический импеданс, 10 ³ кг/(м ² /с)
Акрил	1180	2670	-	3,15
Воздух	0,1	330	-	0,00033
Алюминий	2700	6320	3130	17,064
Латунь	8100	4430	2120	35,883
Медь	8900	4700	2260	41,830
Стекло	3600	4260	2560	15,336
Никель	8800	5630	2960	49,544
Полиамид (нейлон)	1100	2620	1080	2,882
Сталь (низколегированный сплав)	7850	5940	3250	46,629
Титан	4540	6230	3180	26,284
Вольфрам	19100	5460	2620	104,286
Вода (293К)	1000	1480	-	1,48

разделяется на различные отражённые и прошедшие виды волн. Для каждой из этих волн такой же процесс повторяется и на следующей границе зерна. При падении волны на поверхность раздела двух сред в общем случае часть энергии проходит во вторую среду, а часть отражается в первую. Отражатели иногда являются лишь частично проницаемыми для ультразвука. В стали это наблюдается в редких случаях, так как оксидные включения в стали имеют коэффициент отражения, близкий к 100%. Рассеяние ультразвуковых волн в неоднородной среде происходит из-за изменения её волнового сопротивления, обусловленного включением посторонних тел (зёрен или пор) с их границами, размерами зёрен и т.д.

Вторая составляющая ослабления (затухания) — поглощение — представляет собой непосредственное преобразование звуковой энергии в тепло, что может быть обусловлено многочисленными различными процессами. Когда продольная ультразвуковая волна движется в среде, происходит поочерёдное сжатие и разрежение. Сжатие имеет следствием эффект нагревания, а разрежение приводит к охлаждению. В любом материале при конечном значении температуры частицы беспорядочно движутся благодаря внутренней энергии. В данных условиях при распространении ультразвуковой волны имеет место нагревание вещества. Это приводит к повышению активности частиц, как следствие, активизированные частицы возбуждают соседние, более спокойные, заставляя их совершать колебания большой амплитуды. Поэтому во время движения ультразвуковой волны какая-то часть энергии идёт на нагревание вещества, что приводит к уменьшению интенсивности волны. Более того, затухание, вызванное дислокациями, и потери от магнитного

гистерезиса тоже вносят свою лепту в поглощение ультразвуковых волн.

Происходящие процессы можно представить как торможение колебаний частиц, вследствие чего при быстрых колебаниях должно теряться больше энергии, чем при медленных. Поглощение, как правило, усиливается пропорционально частоте, т.е. много медленнее, чем рассеяние.

Уменьшение амплитуды колебания частиц и интенсивности

Коэффициент поглощения — обратная величина того расстояния, на котором амплитуда звуковой волны спадает в «е» раз. Поглощение связано с изменением физических свойств и микроскопической структуры среды, в то время как дифракция и рассеяние типичны при изменении формы и макроскопической структуры среды [17, 32, 34].

Затухание — показатель уменьшения энергии ультразвуковой волны при её распространении в среде. Для определения уровня затухания измеряют изменения интенсивности или усиления (в неперах, Нп, или децибелах, дБ; 1 дБ = 8,686 Нп). Коэффициенты затухания в некоторых металлах, стеклянных, пластиковых материалах, жидкостях приведены в табл. 2 и 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ представленных научно-литературных данных позволяет сделать вывод о достаточном уровне доказательности эффективности метода предстерилизационной ультразвуковой очистки, что обеспечивает

Таблица 2. Коэффициент затухания продольных ультразвуковых волн в некоторых наиболее распространённых средах при температуре 293 К (равно 19,85°C)

Table 2. Attenuation coefficient of longitudinal ultrasonic waves in some of the most common media at a temperature of 293 K (equal to 19.85°C)

Среда	Коэффициент затухания α , Нп/мм
Сталь	от 5×10^{-4} до 5×10^{-3}
Алюминий	от 5×10^{-5} до $2,1 \times 10^{-3}$
Магний	от $3,1 \times 10^{-5}$ до $3,1 \times 10^{-4}$
Медь	от 1×10^{-3} до $5,1 \times 10^{-3}$
Полистирол	$1,7 \times 10^{-2}$
Полиэтилен	$5,2 \times 10^{-2}$
Вода	$2,5 \times 10^{-5}$
Глицерин	$6,1 \times 10^{-3}$
Этанол	$5,4 \times 10^{-6}$
Воздух	$1,6 \times 10^{-2}$

Таблица 3. Затухание продольной волны частотой 2 МГц в различных материалах при комнатной температуре

Table 3. Attenuation of a longitudinal wave with a frequency of 2 MHz in various materials at room temperature

Коэффициент затухания, дБ/м		
малый (<10)	средний (10–100)	большой (>100)
Преобладает поглощение		
Литой: алюминий, чистый магний и слаболегированный	Пластмассы: полистирол, плексиглас, резина, поливинилхлорид, синтетические смолы	
Деформированные: сталь, алюминий, магний, никель, серебро, титан, вольфрам (чистые и легированные)	–	Пластмассы с наполнителями (армированные), резина, эбонит и дерево
Преобладает рассеяние		
–	Алюминиевое и магниевое литьё легированное	
–	Стальное литьё низколегированное, высококачественный чугун. Деформированный: медь, цинк, латунь, бронза, свинец, твёрдые сплавы, изделия порошковой металлургии	Стальное литьё высоколегированное, литейный чугун низкопрочный, медное, цинковое, латунное и бронзовое литьё. Неметаллы: пористая керамика, каменные породы

безопасность пациента и медперсонала при проведении физиотерапевтических процедур и медицинской реабилитации.

Метод предстерилизационной ультразвуковой очистки имеет ряд преимуществ перед механической, химической и термической обработкой, а именно: малые размеры кавитационных пузырьков позволяют им проникать даже в труднодоступные места инструментов, а значит, обеспечивать более качественную очистку поверхности; отсутствует необходимость термической обработки, благодаря чему ультразвуковой очистке могут подвергаться предметы и материалы из термочувствительных полимеров; возникающее гидродинамическое воздействие эффективно разрушает большинство загрязнений, а также способствует снижению числа микроорганизмов, что облегчает дальнейшую стерилизацию; ультразвуковое воздействие практически не изменяет свойств раствора, а значит, не влияет на его дезинфицирующую активность; ультразвуковая очистка инструментов осуществляется бесконтактным способом, поэтому их поверхность не портится, а заточенные кромки не тупятся; мойки для ультразвуковой очистки изготовлены таким образом, что участие человека в этом процессе сводится к минимуму, повышается качество обработки и сокращается время процедуры; аппаратная предстерилизационная ультразвуковая очистка более целесообразна по экономическим и качественным показателям в сравнении с ручным методом обработки. Метод позволяет добиться 100% гарантии качества очистки медицинских изделий и обеспечить этим условия для эффективной стерилизации. Безопасность работающего персонала (оператора установки) обеспечивается за счёт использования в конструкции мойки изолирующего от низкочастотного ультразвукового воздействия стального корпуса. Дополнительным защитным фактором можно считать стенки ванны мойки, также изготовленной из нержавеющей стали — материала с высоким коэффициентом отражения ультразвуковых волн. Авторами публикаций не упоминаются нежелательные побочные эффекты данного метода на организм человека при использовании метода.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: Т.Н. Зайцева — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, подготовка и написание текста статьи; М.Ю. Герасименко — обзор литературы, сбор

и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи; И.С. Евстигнеева — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников; О.М. Перфильева — сбор и анализ литературных источников.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. The authors declare no external funding for the study.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- World Health Organization [Интернет]. WHO Report on the burden of endemic health care-associated infection Worldwide. A Systematic review of the literature. WHO, 2011. Режим доступа: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/80135>. Дата обращения: 15.01.2024.
- Masud F., Vykoukal D. Preventing healthcare-associated infections in cardiac surgical patients as a hallmark of excellence // *Methodist DeBakey Cardiovasc J.* 2011. Vol. 7, N 2. P. 48–50. doi: 10.14797/mdcj-7-2-48
- Савенко С.М. Утерянные возможности здравоохранения // *Медицинский алфавит.* 2018. Т. 2, № 35. С. 20–25. EDN: POYQA
- Акуличев В.А. Кавитация в криогенных и кипящих жидкостях. Москва: Наука, 1978. 220 с.
- Акуличев В.А. Пульсации кавитационных полостей // Акуличев В.А. Мощные ультразвуковые поля / под ред. Л.Д. Розенберга. Москва: Наука, 1968. Ч. 4. С. 129–166.
- Арзуманов З.С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. Москва: Энергия, 1978. 303 с.
- Розенберг Л.Д. Кавитационная область // Акуличев В.А. Мощные ультразвуковые поля / под ред. Л.Д. Розенберга. Москва: Наука, 1968. Ч. 6. С. 221–266.
- Скворцов С.П. Методы контроля параметров ультразвуковой кавитации // *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана.* 2015. № 2. С. 83–100. EDN: TSFDHN
doi: 10.7463/0215.0759806
- Буйвол В.Н. Тонкие каверны в течениях с возмущениями. Киев: Наукова думка, 1980. 296 с.
- Агранат Б.А. Дубровин М., Хавский Н., Эскин Г. Основы физики и техники ультразвука. Москва: Высшая школа, 1987. 352 с.
- Розенберг Л.Д. Физические основы ультразвуковой технологии. Минск: Наука, 1970. 689 с.
- Флин Г. Физика акустической кавитации в жидкостях // *Физическая акустика* / под ред. У. Мезона. Москва: Мир, 1967. Т. 1. С. 7–138.
- Шутилов В.А. Основы физики ультразвука: учебное пособие. Ленинград: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. 280 с.
- Хмелев В.Н., Хмелев С.С., Голых Р.Н., Барсуков Р.В. Повышение эффективности ультразвуковой кавитационной обработки вязких и дисперсных жидких сред // *Ползуновский вестник.* 2010. № 3. С. 321–325. EDN: MUVEED
- Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Шалунов А.В. Управление работой электронного генератора при ультразвуковом воздействии на кавитирующие технологические среды // *Известия Тульского государственного университета. Серия «Технологическая системотехника».* 2004. Вып. 2. С. 32–40.
- Бржозовский Б.М., Бекренев Н.В., Захаров О.В., Трофимов Д.В. Физические основы, технологические процессы и оборудование ультразвуковой обработки материалов: учебное пособие. Саратов: Саратовский государственный технический университет, 2006. 208 с.
- Балдаев Р., Раджендран В., Паланичами П. Применения ультразвука. Москва: Техносфера, 2006. 576 с.
- Логвинов Н.Л., Савенко С.М. Современные средства и методы неспецифической профилактики внутрибольничных инфекций // *Медицинский алфавит.* 2014. Т. 1, № 4. С. 20–25. EDN: SBZLYF
- Хабенский Б., Белоусов С. Рынок стерилизационного оборудования России, часть 2 // *Ремедиум.* 2005. № 10. С. 67–71. EDN: IJWMXP
- Архипов А., Корнев Н., Панин Н., Соломаха В. Ультразвуковые мойки УЗО-«МЕДЭЛ» // *Ремедиум.* 2003. № 12. С. 62–64. EDN: PNPHT
- Ильина Н.В. Охрана здоровья медицинского персонала в свете профилактики внутрибольничных инфекций и профессионального заражения // *Казанский медицинский журнал.* 2012. Т. 93, № 2. С. 362–364. EDN: OWJEYL
- Lawrence F., Muscarella P.D. The benefits of ultrasonic cleaning [May, 2001]. Режим доступа: <https://www.infectioncontroltoday.com/view/benefits-ultrasonic-cleaning>. Дата обращения: 15.12.2023.
- Абрамова И.М. Перспективные направления совершенствования медицинских стерилизационных технологий // *Поликлиника.* 2008. № 6. С. 8–10. EDN: VIFTDN
- Muqbil I., Burke F.J., Miller C.H., Palenik C.J. Antimicrobial activity of ultrasonic cleaners // *J Hosp Infect.* 2005. Vol. 60, N 3. P. 249–255. doi: 10.1016/j.jhin.2004.11.017
- Bettner M.D., Beiswanger M.A., Miller C.H., Palenik C.J. Effect of ultrasonic cleaning on microorganisms // *Comparative Study Am J Dent.* 1998. Vol. 11, N 4. P. 185–188.
- Aasim S.A., Mellor A.C., Qualtrough A.J. The effect of pre-soaking and time in the ultrasonic cleaner on the cleanliness of sterilized endodontic files // *Int Endod J.* 2006. Vol. 39, N 2. P. 143–149. doi: 10.1111/j.1365-2591.2006.01058.x
- Севбитов А.В., Кузнецова М.Ю., Васильев Ю.Л., и др. Влияние методов предстерилизационной очистки и стерилизации на функциональные свойства эндодонтического инструментария // *Эндодонтия Today.* 2016. № 1. С. 14–16. EDN: VWHWFH

28. Скворцов С.П., Сляднев Д.П. Исследование режимов ультразвуковой кавитации // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии: труды XIII Международной научной конференции с научной молодежной школой имени И.Н. Спиридонова. В 2-х книгах. Том 2. Москва, 2018. С. 208–211. EDN: YKZJNB
29. Газетдинова Н.И. На пути прогресса // Медицинский алфавит. 2009. Т. 1, № 8. С. 35–37. EDN: OBGVCF
30. Резников И.И., Федорова В.Н., Фаустов Е.В., и др. Физические основы использования ультразвука в медицине. Учебное пособие. Москва: Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова, 2015. С. 21–29.
31. Хмелев В.Н., Сливин А.Н., Барсуков Р.В., и др. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. 203 с.
32. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. Справочник / Пер. с нем. Е.К. Бухмана, Л.С. Зенковой; под ред. В.Н. Волченко. Москва: Металлургия, 1991. 750 с.
33. Агранат Б.А., Башкиров В.И., Китайгородский Ю.И., Хавский Н.Н. Ультразвуковая технология. Москва: Металлургия, 1974. 504 с.
34. Седалищев В.Н. Физические основы использования колебательных и волновых процессов в измерительных устройствах. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2015. 284 с.

REFERENCES

1. World Health Organization [Internet]. *WHO Report on the burden of endemic health care-associated infection Worldwide. A Systematic review of the literature*. WHO; 2011. Available from: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/80135>. Accessed: 15.01.2024.
2. Masud F, Vykoukal D. Preventing healthcare-associated infections in cardiac surgical patients as a hallmark of excellence. *Methodist Debaquey Cardiovasc J*. 2011;7(2):48–50. doi: 10.14797/mdcj-7-2-48
3. Savenko SM. Lost healthcare opportunities. *Medical alphabet*. 2018;2(35):20–25. EDN: POYQAF
4. Akulichev VA. *Cavitation in cryogenic and boiling liquids*. Moscow: Nauka; 1978. 220 p. (In Russ).
5. Akulichev VA. *Pulsations of cavitation cavities*. In: Akulichev VA. Powerful ultrasonic fields. Ed. by L.D. Rosenberg. Moscow: Nauka; 1968. Part 4. P. 129–166. (In Russ).
6. Arzumanov ZS. *Cavitation in local hydraulic resistances*. Moscow: Energia; 1978. 303 p. (In Russ).
7. Rosenberg LD. *Cavitation field*. In: Akulichev VA. Powerful ultrasonic fields. Ed. by L.D. Rosenberg. Moscow: Nauka; 1968. Part 6. P. 221–266. (In Russ).
8. Skvorcov SP. Methods of control of ultrasonic cavitation parameters. *Nauka i obrazovanie: Nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana*. 2015;(2):83–100. EDN: TSFDHH doi: 10.7463/0215.0759806
9. Buyvol VN. *Thin caverns in currents with disturbances*. Kiev: Naukova dumka; 1980. 296 p. (In Russ).
10. Agranat BA. *Fundamentals of physics and technology of ultrasound*. Moscow: Vysshaya shkola; 1987. 352 p. (In Russ).
11. Rozenberg LD. *Physical foundations of ultrasonic technology*. Minsk: Nauka; 1970. 689 p. (In Russ).
12. Flinn G. *Physics of acoustic cavitation in liquids*. In: Physical acoustics. Ed. by W.W. Meson. Moscow: Mir; 1967. Vol. 1. P. 7–138. (In Russ).
13. Shutilov VA. *Fundamentals of physics of ultrasound: A tutorial*. Leningrad: Izd-vo Leningradskogo universiteta; 1980. 280 p. (In Russ).
14. Khmelev VN, Khmelev SS, Golykh RN, Barsukov RV. Increasing the efficiency of ultrasonic cavitation treatment of viscous and dispersed liquid media. *Polzunovskii vestnik*. 2010;(3):321–325. EDN: MUVEED
15. Khmelev VN, Barsukov RV, Shalunov AV. Electronic generator operation control at ultrasonic influence on cavitating technological media. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Tekhnologicheskaya sistemotekhnika"*. 2004;(2):32–40. (In Russ).
16. Brzhozovsky B, Bekrenev NV, Zakharov OV, Trofimov DV. *Physical bases, technological processes and equipment of ultrasonic processing of materials*: Textbook. Saratov: Saratov State Technical University; 2006. 208 p. (In Russ).
17. Baldaev R, Rajendran V, Palanichamy P. *Applications of ultrasound*. Moscow: Tekhnosfera; 2006. 576 p. (In Russ).
18. Logvinov NL, Savenko SM. Modern means and methods of nonspecific prophylaxis of nosocomial infections. *Medical alphabet*. 2014;1(4):20–25. EDN: SBZLYF
19. Khabensky B, Belousov S. Market of sterilisation equipment in Russia, part 2. *Remedium*. 2005;(10):67–71. EDN: IJWXP
20. Arkhipov A, Kornev N, Panin N, Solomakha V. Ultrasonic washers UZO-"MEDEL". *Remedium*. 2003;(12):62–64. EDN: PNPHT
21. Ilyina NV. Protecting the health of medical personnel in the light of prevention of nosocomial infections and occupational exposure. *Kazan Med J*. 2012;93(2):362–364. EDN: OWJEYL
22. Lawrence F., Muscarella, PD. *The benefits of ultrasonic cleaning* [May, 2001]. Available from: <https://www.infectioncontroltoday.com/view/benefits-ultrasonic-cleaning>. Accessed: 15.12.2023.
23. Abramova IM. Perspective directions of improvement of medical sterilisation technologies. *Poliklinika*. 2008;(6):8–10. EDN: VIFTDN
24. Muqbil I, Burke FJ, Miller CH, Palenik CJ. Antimicrobial activity of ultrasonic cleaners. *J Hosp Infect*. 2005;60(3):249–255. doi: 10.1016/j.jhin.2004.11.017
25. Bettner MD, Beiswanger MA, Miller CH, Palenik CJ. Effect of ultrasonic cleaning on microorganisms. *Comparative Study Am J Dent*. 1998;11(4):185–188.
26. Aasim SA, Mellor AC, Qualtrough AJ. The effect of pre-soaking and time in the ultrasonic cleaner on the cleanliness of sterilized endodontic files. *Int Endod J*. 2006;39(2):143–149. doi: 10.1111/j.1365-2591.2006.01058.x
27. Sevbitov AV, Kuznetsova MY, Vasiliev YL, et al. Impact methods presterilizing cleaning and sterilization on the functional properties of endodontic instruments. *Endodontics Today*. 2016;(1):14–16. EDN: VVHWFH

28. Skvortsov SP, Slyadnev DP. *Ultrasound cavitation optimum regimens investigation*: Proceedings of the XIII International Scientific Conference with Scientific Youth School named after I.N. Spiridonov. In 2 books. Vol. 2. Moscow; 2018. P. 208–211. (In Russ). EDN: YKZJNB
29. Gazetdinova NI. On the path of progress. *Medical alphabet*. 2009;(8):35–37. EDN: OBGVCF
30. Reznikov II, Fedorova VN, Faustov YV, et al. *Physical bases of the use of ultrasound in medicine*. Tutorial. Moscow: N.I. Pirogov Russian National Research Medical University; 2015. P. 21–29. (In Russ).
31. Khmelev VN, Slivin AN, Barsukov RV, et al. *Application of high intensity ultrasound in industry*. Biisk Izdatel'stvo Altayskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I.I. Polzunova; 2010. 203 p. (In Russ).
32. Krautkremer J, Krautkremer G. *Ultrasonic inspection of materials*. Reference book. Transl. from German E.K. Bukhman, L.S. Zenkova; ed. by V.N. Volchenko. Moscow: Metallurgiya; 1991. 750 p. (In Russ).
33. Agranat BA, Bashkirov VI, Kitaygorodskiy YI, Khavskiy NN. *Ultrasonic technology*. Moscow: Metallurgiya; 1974. 504 p. (In Russ).
34. Sedalishchev VN. *Physical foundations of the use of oscillatory and wave processes in measuring devices*. Barnaul: Izdatel'stvo Altayskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta; 2017. 284 p. (In Russ).

ОБ АВТОРАХ

* **Зайцева Татьяна Николаевна**, канд. мед. наук;
адрес: Россия, 125993, Москва, ул. Баррикадная, д. 2, стр. 1;
ORCID: 0000-0001-7123-1568;
eLibrary SPIN: 9416-4428;
e-mail: zaytn@mail.ru

Герасименко Марина Юрьевна, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0002-1741-7246;
eLibrary SPIN: 7625-6452;
e-mail: mgerasimenko@list.ru

Евстигнеева Инна Сергеевна, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0001-9128-0965;
eLibrary SPIN: 5163-7726;
e-mail: evstigneevais@mail.ru

Перфильева Оксана Михайловна, канд. мед. наук;
eLibrary SPIN: 5453-5031;
e-mail: operfileva@mail.ru

AUTHORS' INFO

* **Tatiana N. Zaytseva**, MD, Cand. Sci. (Med.);
address: 2/1 Barrikadnaya street, 125993 Moscow, Russia;
ORCID: 0000-0001-7123-1568;
eLibrary SPIN: 9416-4428;
e-mail: zaytn@mail.ru

Marina Yu. Gerasimenko, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor;
ORCID: 0000-0002-1741-7246;
eLibrary SPIN: 7625-6452;
e-mail: mgerasimenko@list.ru

Inna S. Evstigneeva, MD, Cand. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0001-9128-0965;
eLibrary SPIN: 5163-7726;
e-mail: evstigneevais@mail.ru

Oksana M. Perfilava, MD, Cand. Sci. (Med.);
eLibrary SPIN: 5453-5031;
e-mail: operfileva@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author