

УДК 621.301

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В БИОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

Кунденко Н.П., к.т.н.

Харьковский национальный технический университет сельського хозяйства им. П.Василенка

Тел. (057)712-28-33

Аннотация – предложено использовать ультразвуковые колебания как средства интенсификации процесса растворения, для воздействия на биологические объекты.

Ключевые слова - ультразвук, колебания, диффузия, кавитация.

Постановка проблемы. При воздействии УЗ на биологические объекты частицы среды совершают интенсивные колебательные движения с большими ускорениями; при этом на расстояниях, равных половине длины звуковой волны, в облучаемой среде могут возникать разности давлений от нескольких единиц до десятков атмосфер. Столь интенсивные воздействия на структуру биологических объектов приводят к различным биологическим эффектам, физическая природа которых связана с действием сопутствующих распространению УЗ в среде факторов: механического, теплового, а также физико-химического.

Анализ последних исследований. Давно известно, что ультразвуковое излучение можно сделать узконаправленным. Результаты наблюдений, а также сведения о том, что ультразвуковые волны могут проникать сквозь мягкие ткани человеческого организма, привели к тому, что с начала 1930-х г. возник большой интерес к проблеме применения ультразвука для терапии различных заболеваний. Тем не менее, лишь сравнительно недавно стал намечаться истинно научный подход к анализу явлений. Физика взаимодействия ультразвукового излучения с биологической средой должна включать следующие процессы: распространение ультразвука в «биологической среде», такой как тело человека, взаимодействие ультразвука с компонентами этой среды и измерения и регистрация акустического излучения, как падающего на объект, так и возникающего в результате взаимодействия с ними [1,2]. Практическое применение УЗ развивается в двух направ-

лениях: применение волн малой интенсивности (низкоэнергетические колебания, не приводящие к необратимым изменениям в материалах и телах, через которые они распространяются) [1]; применение высокоэнергетических колебаний - волн высокой интенсивности для активного воздействия на вещества и изменения их структуры и свойств [2].

Формулирование цели статьи. Исследовать физические процессы воздействия ультразвуковых колебаний на биологические объекты.

Основная часть. При распространении ультразвука (УЗ) в жидкой среде возникает переменное давление. Отрицательное давление может привести к образованию полостей в месте разрежения. В полости возникают пары жидкости и воздуха.

Механическое действие УЗ обусловлено высокочастотными колебаниями, которые передаются ткани, соприкасающейся с излучателем. В последней происходит изменение давления, колебание клеток ткани и смещение в стороны при частоте УЗ волны 800-3000 кГц. УЗ оказывает механическое действие на грубоволокнистую соединительную ткань. Целесообразно применять пульсовую дозу УЗ, интенсивность ультразвуковой волны повышается, а тепловой эффект будет при этом УЗ ускоряет диффузию веществ. Тепловой эффект зависит от поглощения УЗ тканями и не очень велик, так как тепло отводится циркулирующей кровью. Тепло образуется на границе подкожной клетчатки и мышц, хорошо выражено в мышечной ткани. Эмульгирование, раздробление не смешивающихся между собой жидкостей и порошков приводит к образованию стойких мелкодисперсных эмульсий, аэрозолей. Известно, что в кавитационных пузырьках образуются электрические заряды, которые вызывают ионизацию среды. Молекулы воды расщепляются на H^+ и OH^- , появляется перекись водорода, а в присутствия азота - азотные и азотистые кислоты. Возможна фиксация при помощи УЗ молекулярного азота органическими кислотами с образованием аминокислот, которые идут на построение белка. Этим и объясняется роль УЗ в регуляции синтеза белка. Изменяется соотношение между клеткой и межклеточной жидкостью в сторону повышения последней. Воспаленная ткань реагирует на ультразвук сильнее, чем здоровая, уменьшается ацидоз, кислотность среды смещается в щелочную сторону, а значит, в определенной степени отмечается противовоспалительный эффект. УЗ волны инактивируют ферменты, гормоны, повышают активность инсулина, вызывают расщепление гликогена, осуществляют деполимеризацию гнапуриновой и хондроитинсерной кислот.

При распространении интенсивных УЗ колебаний (интенсив-

ностью более 12 Вт/см) в жидкости наблюдается, обусловленный УЗ давлением эффект, называемый УЗ кавитацией. Под акустической кавитацией понимают образование и активацию газовых или паровых полостей (пузырьков) в среде, подвергаемой УЗ воздействию [4]. По общепринятой терминологии существуют два типа активности пузырьков: стабильная кавитация и коллапсирующая, или не стационарная, кавитация, хотя граница между ними не всегда четко очерчена. Стабильные полости пульсируют под воздействием давления УЗ 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, а также преобразование энергии УЗ в излучение света или химические реакции. На пылинках и частицах примесей, содержащихся в жидкостях, могут существовать микротрещины. Избыточное давление внутри частичек, задаваемое радиусом частичек и коэффициент поверхностного натяжения, мало, но под действием звука достаточно высокой интенсивности газ может накачиваться в них, и полости могут расти. 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 пузырек во время фазы разряжения и из пузырька во время фазы сжатия. Так как поверхность пузырька в фазе разряжения максимальна, суммарный поток газа направлен внутрь пузырька, поэтому пузырек растет. Чтобы пузырек рос за счет выпрямленной диффузии, амплитуда акустического давления должна превысить пороговое значение. Порог выпрямленной диффузии и определяет порог кавитации.

Явление кавитации связано с тем, что жидкости "легко" переносят огромные всесторонние сжатия, но чрезвычайно чувствительны к растягивающим усилиям. При прохождении фазы УЗ волны, создающей разряжение, жидкость разрывается и в ней образуется большое количество разрывов, в которые устремляются растворенные в жидкости газы и пар. Эти мельчайшие пузырьки (размером менее 0,1 мм), называемые кавитационными, образуются обычно в местах, где прочность жидкости ослаблена. Такими местами являются маленькие пузырьки нерастворенного газа, частички посторонних примесей, границ раздела жидкость - жидкость, жидкость - твердое тело и др. Кави-

тационные пузырьки совершают пульсирующие колебания, вокруг них образуются сильные микропотоки, 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. Многие исследования показали, что воздействие УЗ колебаний на различные среды обусловлено эффектами кавитации, ультразвукового ветра и ультразвукового давления, причем максимальное воздействие обусловлено УЗ кавитацией. Практически все физикохимические и технологические процессы протекают на границе раздела (межфазной поверхности), где молекулы различных веществ соприкасаются друг с другом. При этом любой процесс можно представить в виде трех последовательных стадий: приближение молекул двух или нескольких взаимодействующих веществ друг к другу и их столкновение; сам процесс взаимодействия молекул; удаление продуктов реакции из зоны взаимодействия.

Воздействие УЗ с частотой 20-100 кГц характеризуется разделением молекул и ионов с различной массой, искажением формы волны, появлением переменного электрического поля, капиллярно-акустическим и тепловым эффектами, активацией диффузии. Здесь проявляются сопутствующие эффекты, влияющие на процессы экстракции из лекарственного, растительного и животного сырья, наблюдается усиление процессов гиперфильтрации, проницаемости клеточных мембран, становятся возможными стерилизация термолабильных веществ, фонофорез, получение концентрированных ингаляционных аэрозолей.

Как уже отмечалось, УЗ, проходя через любую среду, создает в ней при обычных условиях знакопеременное давление. В результате молекулы и различные частицы, находящиеся в жидкости, должны с частотой волны повторить движение. Большинство биологических сред — это конфигурационно сложные микрообъекты, состоящие из волнообразных цепочек, колец, радикалов. Во время прохождения УЗ через такую молекулу ее легкая часть будет колебаться в резонансе с частотой волны, а тяжелая часть станет отставать. В результате возникнут зоны напряженности, значительные силы трения, превосходящие силы химической связи, произойдет разрыв цельной молекулы вещества. При воздействии на процесс растворения УЗ с большой интенсивностью в жидкой среде возникают знакопеременное звуковое давление, способствующее проникновению жидкости в трещины и капилляры растворяемого веществ-

ва, а также быстрые течения: звуковой ветер, кавитация. Интенсификация процесса растворения, а равно и коэффициент диффузии зависят от значений амплитуды и частоты вынужденных колебаний жидкости.

При воздействии на среду УЗ, уменьшается динамическая вязкость полярных жидкостей; микротрещины и поры, имеющиеся в твердой фазе, разветвляются, увеличиваются их размеры и глубина. У кромки открытой микротрещины при интенсивном движении жидкости происходят турбулизация микропотоков, а затем и срыв вихрей. Здесь процесс растворения твердой фазы лимитируется коэффициентом турбулентной диффузии. Поступающие из первой во вторую зону турбулентные пульсации осуществляют перенос основной массы растворяемого вещества. В третьей зоне массообмен обусловлен хаотическим молекулярным движением. Продольные и поперечные размеры микротрещин являются важным фактором в процессе растворения. При возникновении УЗ переменного давления ($\pm 5 \times 10^5$ Па) в жидкости, находящейся в трещине, создаются колебательные тангенциальные смещения микрообъемов растворителя вдоль стенок, которые переходят в однонаправленное движение раствора. Молекулярная диффузия практически сменяется достаточно быстрым конвективным массопереносом.

Таким образом, при использовании УЗ как средства интенсификации процесса растворения, существенное значение имеют микропульсации растворителя, в особенности если длина волны равна или меньше размера твердой частицы или же линейных размеров микротрещин, пор, капилляров. Данные свидетельствуют о том, что УЗ на два порядка ускоряет стадию растворения растворимых веществ, в 10—30 раз – трудно и медленно растворимых препаратов, в 3—5 раз — малорастворимых. С помощью УЗ при обычной температуре от 0 до 25 °С увеличивается предел растворимости в диапазоне трудно и практически нерастворимых веществ, причем концентрация насыщения может превышать известные константы в 5—30 раз.

Выводы. УЗ позволяет получить более стойкие эмульсии по сравнению с механическим диспергированием. Частотные колебания позволяют получать эмульсии с широким диапазоном дисперсности эмульгируемых частиц из жидкостей и веществ, которые не поддаются эмульгированию. УЗ, действуя на ткани, вызывает в них биологические изменения. По этому необходимо провести исследования применения УЗ с возможностью изменения в тканях для достижения терапевтического эффекта.

Литература

1. *Лебедев, В.А.* Физиотерапевтический рецепт / *В.А. Лебедев.* - Ставрополь – Ессентуки : «Издательский дом», 2005. - 759 с.
2. *Пономаренко, Г.Н.* Биофизические основы физиотерапии / *Г.Н. Пономаренко.* - СПб. : «ВмедА», 2003. - 152 с.
3. *Акопян Б.В.* Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами: Ультразвук в медицине, ветеринарии и экспериментальной биологии / *Б.В. Акопян., Ю.А. Еришов.* - М. : Изд. МГТУ им Н.Э.Баумана, 2005. - 224 с.

**ОСОБЛИВОСТІ ПОШИРЕННЯ УЛЬТРАЗВУКУ В
БІОЛОГІЧНОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

Кунденко М.П.

Анотація – запропоновано використати ультразвукові коливання як засоби інтенсифікації процесу розчинення, з метою впливу на біологічні об'єкти.

FEATURES OF ULTRASOUND IN BIOLOGICAL SREDE

N. Kundenko

Summary

Proposed to use ultrasonic vibrations as a means of intensifying the process of dissolution, for vozdeyt on biological objekt.