

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА – ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ НАПРАВЛЕННОГО СИНТЕЗА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СИСТЕМ (ОБЗОР)

Н.Н. Мофа^{1*}, А.О. Жапекова^{1,2}, А. Баккара^{1,2}

¹Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

²КазНУ им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

АННОТАЦИЯ

В статье представлен обзор работ по ультразвуковой обработке (УЗО) и физико-химическим процессам, имеющим место при УЗО в жидких средах, на неорганические и органические материалы. Показана роль кавитационных явлений, акустических потоков, генерирования тепла и химических реакций, а также механических эффектов, связанных с возникновением знакопеременных напряжений в твердых телах и диффузионные явления, способствующие формированию структуры, как на микро- так и на наноуровне обрабатываемых систем. На примере кварца и волластанита наглядно показано как в результате УЗО происходит диспергация и структурированность поверхности частиц обрабатываемых порошков. Показано также, как ультразвуковой обработкой можно направленно регулировать состояние и качественное изменение свойств гелевых систем в результате воздействия УЗО на процесс структурообразования. Наиболее эффективно использование ультразвуковой обработки при обработке смесей коллоидной основы и неорганического наполнителя (диоксида кремния). Разработка таких систем имеет особо важное значение при получении препаратов лечебно-косметического назначения

Ключевые слова: УЗО (ультразвуковая обработка), диспергирование, наноконпозиции, кварц, волластонит, коллоидные системы.

1. Введение

Ультразвуковая обработка (УЗО) является разновидностью механохимического воздействия как на неорганические, так и органические материалы в жидких средах (сонохимия). На сегодняшний день УЗО – это один из инновационных способов получения новых видов материалов с заданными свойствами различного функционального назначения [1,2]. Под действием ультразвука (акустические колебания с частотой выше 20 кГц) в веществе возникают различные физико-химические эффекты, которые используются в разнообразных технологических процессах [3].

Ультразвуковое воздействие часто используется для очистки сточных вод путем разложения загрязняющих веществ, а также в химии полимеров. Под действием ультразвука про-

исходит как расщепление полимерной цепи, так и инициируется радикальная полимеризация или эмульсионная полимеризация путем эмульгирования масляной и водной фаз [4-6]. Ультразвуковую обработку используют для наноструктурирования материала, что представляет интерес во многих областях, таких как катализ, биомедицина, хранение водорода и т.д. [7-10]. На рис. 1. показаны некоторые области применения ультразвука [10].

2.1. Физико-химические процессы при ультразвуковой обработке

При распространении ультразвука в любой среде неизбежны потери энергии, связанные с преобразованием энергии в тепло, которое оказывает влияние на физико-химические процессы, происходящие в веществе при УЗО.

*Ответственный автор
E-mail: nina.mofa@kaznu.kz (Н.Н. Мофа)



Рис. 1. Основные области использования ультразвука в химико-технологических процессах [10].

Ультразвуковая энергия существенно влияет на химические реакции, ускоряет многие массообменные процессы (растворение, экстрагирование, пропитка пористых тел и т.п.), ход которых ограничивается скоростью диффузии.

На границе раздела двух как однородных, так и разнородных тел часть энергии ультразвуковых колебаний переходит в смежную среду, а часть отражается [11-14]. Наложение падающей и отраженной волн приводит к возникновению стоячих волн. Кроме того, при распространении продольной звуковой волны в среде возникают чередующиеся между собой области сжатия (пучности) и разрежения (узлы). В первых – амплитуда колебания частиц среды имеет максимальное значение, а во вторых – нулевое. Таким образом, каждая частица среды, выведенная из исходного положения звуковой волной, занимает поочередно одно из крайних положений. Прохождение такой ультразвуковой волны приводит к ряду явлений и эффектов, которые и определяют физико-химическую сущность использования ультразвуковой обработки в различных технологических процессах. Это, прежде всего, кавитационные явления, затем акустические потоки и капиллярные эффекты, генерирование тепла и химические реакции, механические эффекты, связанные с возникновением знакопеременных напряжений в твердых те-

лах и диффузионные явления, способствующие перемешиванию жидкостей.

Эффект механического воздействия при воздействии ультразвука обусловлен кавитацией, которая возникает в жидкости в результате местного понижения давления при прохождении акустической волны большой интенсивности [15]. Общая картина образования кавитационного пузырька представляется в рис. 2. В фазе разрежения акустической волны в жидкости образуется разрыв в виде полости, которая заполняется насыщенным паром данной жидкости. В фазе сжатия под действием повышенного давления и сил поверхностного натяжения полость захлопывается, а пар конденсируется на границе раздела фаз. Через стенки полости в нее диффундирует растворенный в жидкости газ, который затем подвергается сильному адиабатическому сжатию. Образовавшиеся кавитационные пузырьки, перемещаясь в область с более высоким давлением, захлопываются, излучая при этом вторичные ударные волны. Под воздействием микроударных волн, возникающих при захлопывании кавитационных пузырьков, происходит диспергирование твердых тел. В результате получают высокодисперсные материалы с размером частиц, составляющих как доли, так и нанометрового диапазона.

Таким образом, в жидкой среде образуются массы пульсирующих пузырьков. В момент

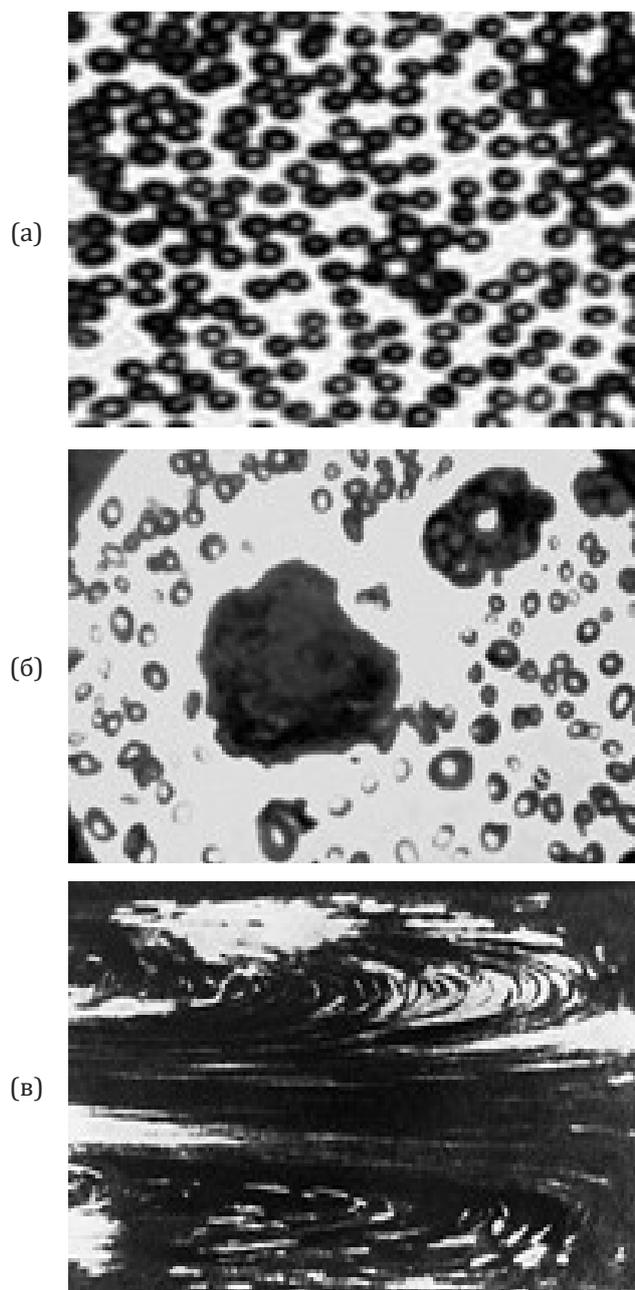


Рис. 2. Кавитационные пузырьки (а), схлопывание (б) и потоки (в), возникающие в рабочей жидкости при схлопывании кавитационных полостей в процессе ультразвуковой обработки жидкости [15].

схлопывания пузырька, давление и температура газа достигают величин – по некоторым данным до 100 МПа и 5000-25000 К. Кроме того, происходят электрические разряды и ионизация среды. Под влиянием ультразвука наблюдается сонолюминесценция, при этом происходит концентрация энергии, на 12 порядков превышающая действующую. После схлопывания полости в окружающей жидкости распространяется сферическая, быстро затухающая ударная волна. Так как взрыв происходит меньше, чем за наносекунду, при этом

также достигаются очень высокие скорости охлаждения, превышающие 1011 К/с [16].

Взрывы пузырьков, также приводят к появлению в жидкости потоков, скорость которых достигает 150 м/с.

Давления, создаваемые при захлопывании кавитационных пузырьков в жидкостях, вызывают интенсивную механическую эрозию поверхности материалов. Эти эффекты широко используются для удаления с поверхности материалов различных нежелательных пленок и загрязнений, для ускорения химических реакций, гомогенизации и других целей [17]. Высокий уровень напряжений, создаваемых при ультразвуковых колебаниях в твердых телах, может приводить к развитию эрозии поверхности (рис. 3), усталостных явлений и разрушению, а также к другим физико-химическим явлениям, имеющим место при кавитации.

Обобщенно весь набор эффектов, сопровождающих кавитационный процесс, представлен на рис. 4 [18]. Наибольший вклад вносят захлопывающиеся кавитационные пузырьки.

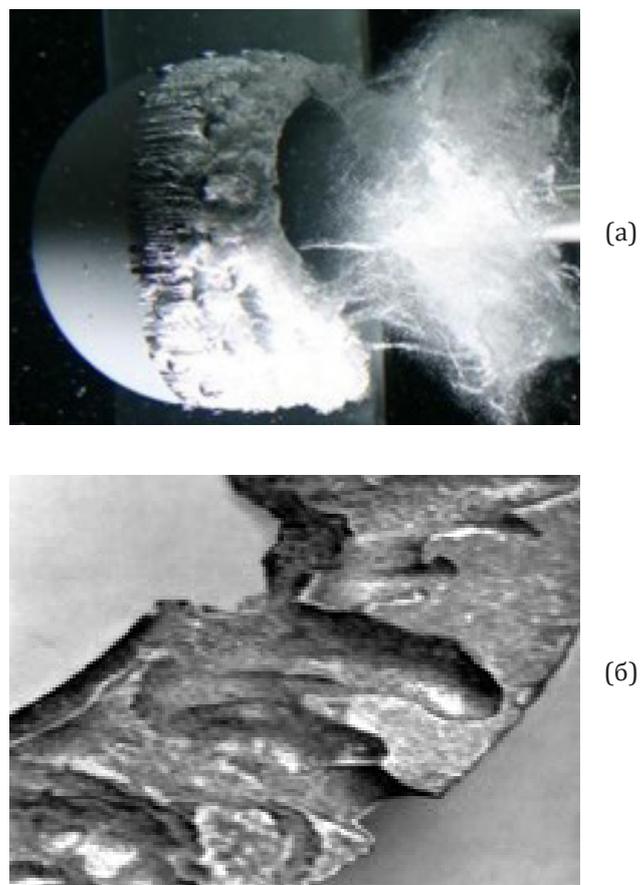


Рис. 3. Эффект схлопывания кавитационных пузырьков (а) и механическая эрозия поверхности материалов (б), при ультразвуковой обработке системы [17].



Рис. 4. Эффекты кавитации [18].

Под действием акустических потоков измельчаемый в ультразвуковой ванне материал периодически попадает в зоны развитой кавитации, что способствует его диспергации [19].

2.2. Диспергация твердых тел при ультразвуковой обработке в водной среде

Разрушение материала при УЗО обусловлено двумя факторами: образованием ударной волны и ударным действием микроструй. При захлопывании кавитационного пузырька жидкость проникает в образовавшиеся углубления в виде микроструй и пронизывает пузырек со скоростью от сотен до тысяч метров в секунду [20]. Ударное действие микроструй также приводит к разрушению поверхности твердых тел. Микропотоки, возникающие в жидкости вблизи пульсирующих кавитационных пузырьков, имеют вихревой характер движения турбулентного типа, скорость

движения достигает нескольких метров в секунду. При диспергировании микропотоки и мелкомасштабные течения проникают в микротрещины, различные дефекты, ускоряя кавитационное разрушение. Эрозия поверхности и разрушение частиц под воздействием ультразвука приводит к повышению химической активности их поверхности и ускорению процессов взаимодействия частиц материала со средой обработки.

Высокий уровень напряжений, создаваемых при ультразвуковых колебаниях в твердых телах, может приводить к развитию усталостных явлений и разрушению. Ультразвуковое диспергирование позволяет получать высокодисперсные (средний размер частиц - микроны и доли микрон), однородные и химически чистые смеси (суспензии) твердых частиц в жидкостях [21, 22]. Эффект диспергирования значительно усиливается при одновременном действии низких и высоких частот, когда воз-

растают скорость и энергия в процессе захлопывания и как следствие усиливается разрушение как следствие взаимного действия ультразвуковой кавитации и интенсивных акустических потоков. Под действием акустических потоков пульсирующие пузырьки малых размеров, возникающие в поле высоких частот, перемещаются в зоны развитой кавитации низких частот. Размеры пузырьков возрастают и они приобретают свойства кавитирующих с выделением значительной энергии.

При ультразвуковом диспергировании суспензий дисперсность продукта увеличивается на несколько порядков по сравнению с традиционным механическим измельчением. Достаточно легко диспергируются многие природные минералы – каолин, гипс, слюда, сера, графит, кварц, волластонит и т.д., труд-

нее – чистые металлы. Диспергирование существенно интенсифицируется, если наряду со знакопеременным звуковым давлением определенной амплитуды на жидкость наложить постоянное (статическое) давление [14].

2.3. Ультразвуковая обработка кварца и волластонита в водной среде

Проведенные нами электронно-микроскопические исследования показали, что при ультразвуковой обработке кварца в водной среде, прежде всего, происходит эрозия поверхности частиц, откалывание и разрушение частиц до более мелких размеров (рис. 5в). Для частиц волластонита наблюдается расщепление по длине под воздействием ультразвука (рис. 5г).

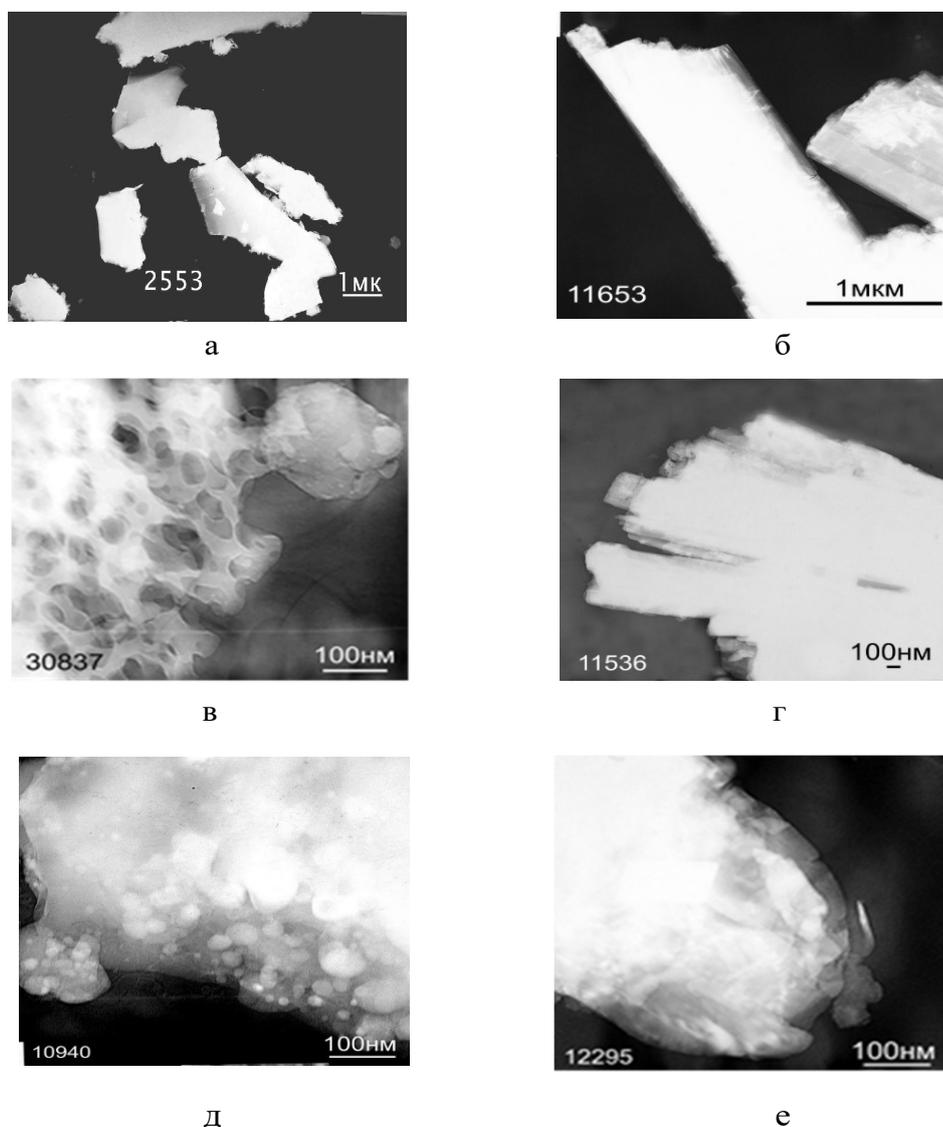


Рис. 5. Электронно-микроскопические снимки частиц кварца и волластонита в исходном состоянии (а, б), после УЗО в воде (в, г) и в 10% растворе мочевины $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ в воде (д, е) [23].

При введении в водную среду органических добавок эффективность диспергирования при УЗО повышается и кроме того на поверхности частиц образуются полимерные пленки, в которых присутствуют ионы вводимых добавок, модифицирующих поверхность обрабатываемых частиц неорганических соединений. Так при УЗО кварца в присутствии мочевины происходит измельчение и капсуляция агрегатов диспергированных частиц (рис. 5д). Для волластонита также в результате УЗО в присутствии мочевины наблюдается структурированность поверхностного слоя частиц (рис. 5е) и повышается дефектность частиц [23]. В результате модифицирования поверхности происходит капсуляция энергетического состояния вещества, которое может быть реализовано в последующих химических реакциях.

Были разработаны различные методы получения наночастиц при ультразвуковом воздействии [24]. На поверхности формируется равномерный однородный покрывающий слой. Наночастицы прикрепляются к поверхности посредством формирования химических взаимодействий с подложкой. Результаты исследований показали, что в зависимости от параметров ультразвуковых колебаний и конструкции излучателя можно разрушать или активировать вещества, способствовать синтезу, полимеризации и диссоциации, управлять кинетикой химического или физико-химического процесса, в том числе процессами или отдельными стадиями массопереноса [15]. Разработаны физико-химические основы регулирования свойств таких наносистем ультразвуковым воздействием с позиций физико-химической механики дисперсных структур [16]. Высокая скорость охлаждения затрудняет организацию и кристаллизацию продуктов. Быстрая кинетика не позволяет центрам кристаллизации расти, в каждом взрывающемся пузырьке формируется несколько центров, чей рост ограничен внезапным взрывом. Если молекулярный предшественник – нелетучее соединение, реакция будет происходить в 200 нм кольце, окружающем взрывающийся пузырек. В этом случае сонохимическая реакция происходит в жидкой фазе. Продукты реакции – иногда наноморфные частицы, а иногда – нанокристаллические. Это зависит от температуры в зоне кольца, где происходит реакция. Почти во всех сонохимических реакциях, дающих неорганические продукты, были получены наноматериалы.

Они отличались по размеру, форме, структуре и по своей твердой фазе, но всегда были наноразмерными [25]. Результаты ультразвукового воздействия зависят как от параметров ультразвуковой обработки таких как амплитуда, частота и время воздействия, так и от исходного состояния материала.

2.4. Ультразвуковая обработка гелевых композиций

Ультразвуковой обработкой можно направленно регулировать состояние и качественное изменение свойств гелевых систем в результате воздействия УЗО на процесс структурообразования [26].

Особое место занимает использование УЗО при получении коллоидных систем, состоящих из гелевой основы и высокодисперсного наполнителя. Ультразвуковая обработка таких композиций обеспечивает ускорение процесса гелеобразования и стабилизацию состояния полученной коллоидной системы [27]. Этим задачам большое внимание уделяется в биотехнологии, в химико-фармацевтической и косметической отрасли. Фармацевтические и косметические продукты как правило содержат коллоидную часть и сверхмелкодисперсную с размером частиц в диапазоне от 1 до 100 нм [28, 29], которые выполняют функцию носителей биохимических активных ингредиентов. Размеры, растворимость и заряд поверхности наноструктур определяют активность и кинетику проникновения их в биологические системы.

Важным этапом в разработке косметических и лекарственных кремов (и мазей) является подготовка коллоидной основы. В большинстве случаев она состоит из очищенной воды и какого-либо гелеобразующего вещества, в качестве которого используются желатин, гуммиарабик, агар-агар и различные виды эфира целлюлозы. Эффективным наноносителем в косметическом препарате является диоксид кремния. Он самый безвредный из всех используемых нанодисперсных носителей [29].

Для повышения гомогенности и активности систем их подвергают различным способам механического и физико-химического воздействия. Это, прежде всего, высокоскоростное перемешивание и акустическая обработка с кавитационным эффектом в различных частотных диапазонах и мощности воздействия, обеспечивающей повышение дисперсности и гомогенизацию смеси [30, 31].

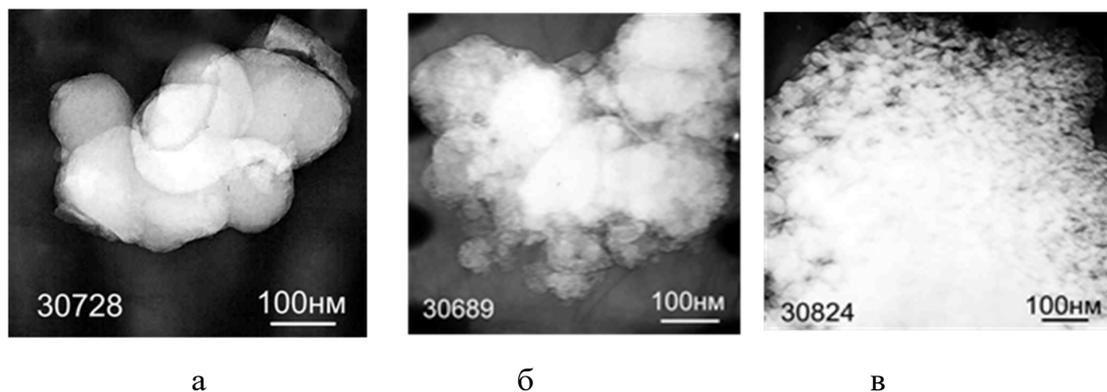


Рис. 6. Электронно-микроскопические снимки частиц диоксида кремния после МХО в шаровой мельнице в водном растворе этилового спирта (а) и глицерина (б) и после УЗО (в) в водном растворе этилового спирта [33].

В работе [32] диоксид кремния предварительно обрабатывался в мельнице, т.е. подвергался механохимической обработке (МХО) в присутствии этилового спирта и глицерина, а затем подвергали ультразвуковому воздействию в водном растворе этилового спирта. Эффект диспергирования и агломерирования усиливается при введении в обрабатываемую смесь глицерина. Порошок состоит из агломератов отдельных частиц наноразмерного масштаба сферической формы, закапсулированных в плотные пленочные образования, (рис. 6б).

При последующей ультразвуковой обработке диоксида кремния в водной среде, прежде всего, происходит эрозия поверхности частиц, откалывание и разрушение частиц до более мелких размеров (рис. 6в). В результате УЗО частицы имеют рыхлую поверхность, что должно повышать адсорбционную способность частиц диоксида кремния, а это имеет важное значение при использовании его в качестве напол-

нителя в гелиевых системах фармацевтического и косметического назначения.

Важным этапом в разработке косметических и лекарственных кремов (и мазей) является подготовка основы. В большинстве случаев это коллоидные системы, которые состоят из очищенной воды или смеси воды с глицерином и какого-либо гелеобразующего вещества. В таких системах коллоидная частица, настолько мала, что не выпадает в осадок, а находится во взвешенном состоянии. Размер коллоидных частиц колеблется обычно от 1 до 100 нм, самое большее до 500 нм. В настоящей работе в качестве гелеобразователя использовалась эфира целлюлоза. Рассматривались системы вода – глицерин при соотношении 50/50 с содержанием эфира целлюлозы от 0,5 до 5%. Вариацией составляющих компонент можно получить систему средней вязкости и с высокой электропроводностью, т.е. с необходимыми реологическими свойствами и вы-

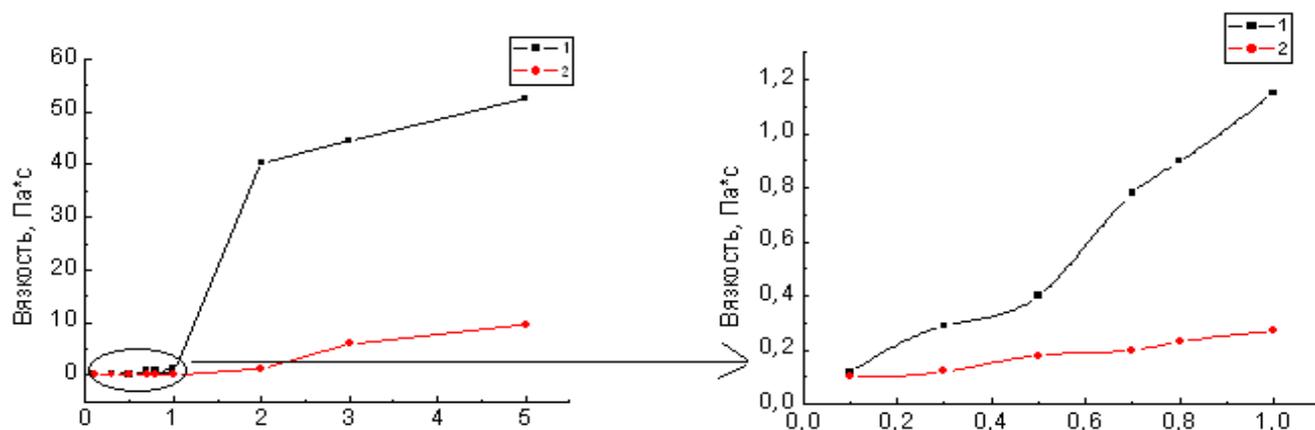


Рис. 7. Изменение вязкости гелевой системы от содержания эфира целлюлозы в водно-глицериновых растворах до (1) и после УЗ обработки (2) [33].

сокой активностью. Гелевые системы с эфира целлюлозой подвергались ультразвуковой обработке, чтобы направленно регулировать состояние и качественное изменение получаемого материала. Наиболее эффективно это проявляется в изменении вязкости гелевой системы, что наглядно представлено в графической зависимости вязкости от содержания эфира целлюлозы и последующего воздействия УЗО (рис. 7).

В полученную гелевую систему вводился диоксид кремния, который подвергался УЗО сначала в водно-спиртовом растворе, а затем повторно при введении активных модифицирующих добавок: аскорбиновая, ацетилсалициловая и янтарная кислоты. Присутствие кислот в обрабатываемой смеси при УЗО способствует дополнительному измельчению частиц и разрыхлению поверхности. Поверхностный слой насыщается используемыми активными добавками. Таким образом, твердые частицы в гелевой матрице являются носителями лекарственных субстанций, они имеют очень мелкие размеры и образуют пространственный структурный каркас, стабилизируя вязкость системы. Структурные изменения в системе в результате УЗО приводят к изменению и других ее свойств [18].

Как показали результаты проведенных исследований [33], при введении янтарной и ацетилсалициловой кислот процесс гелеобразования и стабилизация показателей свойств фиксируется уже через сутки. С аскорбиновой кислотой он продолжается более длительного времени от 7 до 14 суток, и при этом вязкость и электропроводность системы заметно повышаются. Янтарная кислота наиболее эффективна для повышения вязкости и снижения электропроводности гелевой композиции. Показатели электропроводности полученных систем свидетельствуют об их высокой биохимической активности.

Следовательно, вариацией состава коллоидной смеси на основе микрокристаллической целлюлозы и кремнезема, модифицированного при УЗО кислотными добавками, можно целенаправленно изменять структуру, что в конечном итоге найдет отражение в конкретном функциональном назначении препарата. Коллоидные композиционные системы микрокристаллической целлюлозы и диоксида кремния изменяют свою вязкость в зависимости от концентрации носителя. Обработка ультразвуком обеспечивает диспергацию и перевод кремнеземной фракции в гелевое со-

стояние, в результате происходит формирование наноструктурированной коллоидной гомогенной системы, что проявляется в повышении вязкости и стабилизации значений электропроводности.

3. Заключение

Таким образом, представленный анализ физико-химических особенностей проявления ультразвукового воздействия в жидких средах на обрабатываемую систему, наглядно демонстрирует эффективность использования УЗО для направленного синтеза различных наноструктурированных композиций. Приведенные примеры ультразвуковой обработки кварца и волластанита наглядно показывают особенности трансформации структуры частиц и формирование наноструктурированной поверхности в зависимости от состава среды, в которой происходит УЗО. В зависимости от параметров ультразвукового воздействия можно управлять диспергацией и физико-химическими процессами формирования необходимой структуры частиц обрабатываемого вещества, обеспечивая синтез материала конкретного функционального назначения.

Эффективность использования ультразвуковой обработки наглядно продемонстрирована для смеси коллоидной основы и наполнителя из диоксида кремния при вариации составляющих ингредиентов. Таким образом можно целенаправленно регулировать свойства получаемых композиций, что особенно важно при разработке косметических и лекарственных препаратов. УЗО позволяет направленно регулировать структуру, состояние и качественное изменение получаемого материала, обеспечивая его гомогенность и активность.

Литература

- [1]. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. М.: Химия, 1983. – 191 с.
- [2]. Маргулис М.А. Основы звукохимии. М.: Химия, 1984. – 260 с.
- [3]. Кардашев Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии. М.: Химия, 1990. – 208 с. ISBN 5-7245-0674-2
- [4]. Canselier J.P., Delmas H., Wilhelm A.M., Abismail B. Ultrasound emulsification-an overview // J. Dispersion Sci. Technol. – 2002. – Vol.23. – P. 333–349.

- [5]. Morya N.K., Iyer P.K., Moholkar V.S. A physical insight into sonochemical emulsion polymerization with cavitation bubble dynamics // *Polymer*. – 2008. – Vol.49. – P.1910–1925.
- [6]. Du X., Li Z., Xia J., Zhang F., Wang Z. Facile sonochemistry-assisted assembly of the water-loving drug-loaded micro-organogel with thermo- and redox-sensitive behavior // *Colloids Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2019. – Vol.561. – P. 47–56.
- [7]. Li Z., Du X., Cui X., Wang Z. Ultrasonic-assisted fabrication and release kinetics of two model redox-responsive magnetic microcapsules for hydrophobic drug delivery // *Ultrason. Sonochem.* – 2019. – Vol. 57. – P. 223–232.
- [8]. Rodriguez-San-Miguel D., Montoro C., Zamora F. Covalent organic framework nanosheets: preparation, properties and applications // *Chemical Society Reviews*. – 2020. – Vol.49. – P. 2291–2302.
- [9]. Huo M., Wang L., Chen Y., Shi J. Nanomaterials/microorganism-integrated microbiotic nanomedicine // *Nano Today*. – 2020. – Vol.32. – P.100854.
- [10]. Li Zh., Dong J., Zhang H., Zhang Y., Wang H., Cui X., Wang Z. Sonochemical catalysis as a unique strategy for the fabrication of nano-/micro-structured inorganics // *Nanoscale Advances*. – 2020. – Vol.3. – P.41-72.
- [11]. Акуличев В.А. Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Розенберга Л.Д. – М.: Наука, 1968. – 129-166 с.
- [12]. Агранат Б.А., Башкиров В.И., Китайгородский Ю.И., Хевский Н.Н. Ультразвуковая технология. – М.: Металлургия, 1974. – 504 с.
- [13]. Гудвин Г. Ультразвуковое оборудование. Химия и ультразвук / Пер. с англ.–М.: Наука, 1993. – 161 с.
- [14]. Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Хмелев С.С., Цыганок С.Н. Ультразвук. Аппараты и технологии: монография. – Бийск: Изд-во Алтайского гос. технич. ун-та, 2015. – 688 с.
- [15]. Flynn H.G. Physics of acoustic cavitation in liquids // *Physical Acoustics*. – 1964. – Vol.1B. – P.57-172.
- [16]. Pol V.G., Reisfeld R., Gedanken A. Sonochemical synthesis and optical properties of europium oxide nanolayer coated on titania // *Chem. of mater.* – 2002. – Vol.14., №97 – P.3920-3924.
- [17]. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. – М.: Химия, 1983. – 191с.
- [18]. Хасанов О.Л. Эффекты мощного ультразвукового воздействия на структуру и свойства наноматериалов: учебное пособие / О.Л. Хасанов, Э.С. Двилис, В.В. Полисадова, А.П. Зыкова – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008.–149с.
- [19]. Gedanken A. Using sonochemistry for the fabrication of nanomaterials // *Ultrason Sonochem.* – 2004. – Vol.11, №2. – P.47-55.
- [20]. Landau M.V., Vradman L., Herskowitz M., Koltypin Y., Gedanken A. Ultrasonically Controlled Deposition-Precipitation: Co-MoHDS Catalysts Deposited on Wide-Pore MCM Material // *J. Catal.* – 2001. – Vol. 201, №1. – P.22-36.
- [21]. Avivi S., Gedanken A. S-S bonds are not required for the sonochemical formation of proteinaceous microspheres: the case of streptavidin // *Biochem. J.* – 2002. – Vol.366, Is.3. – P.705-707.
- [22]. Avivi S., Nitzan Y., Dror R., Gedanken A. An easy sonochemical route for the encapsulation of tetracycline in bovine serum albumin microspheres // *J. Am. Chem.* – 2003. – Vol.125, Is.51. – P.15712-15713.
- [23]. Мансуров З.А., Мофа Н.Н., Шабанова Т.А. Механохимический синтез композиционных материалов: учебное пособие. Издательство: Қазақ университеті, 2016. – 376 с.
- [24]. Маргулис М.А. Звукохимические реакции и сонолюминесценция. – М.: Химия, 1986. – 288с.
- [25]. Баранчиков А.Е., Иванов В.К., Третьяков Ю.Д. Сонохимический синтез неорганических материалов // *Успехи химии*. – 2007. – Т.76, №2. – С.147-168.
- [26]. Жапекова А., Баккара А., Иминова Р., Головченко О., Мофа Н.Н. Разработка гелевых композиций с агар-агар для лечебно-косметических препаратов // *Промышленность Казахстана*. – 2020. – Т.2. – С.71-74.
- [27]. Дубинская А.М. Превращение органических веществ под действием механических напряжений. // *Успехи химии*. – 1999. – Т.68, №8. – С.708–724.
- [28]. Муравьев И.А. Технология лекарственных форм. – М.: Медицина, 1980. – 704 с.
- [29]. Вилламо Х. Косметическая химия / Пер. с фин. – М.: Мир, 1990. – 288 с.
- [30]. Beck R., Guterres S., Polmann A. Nanocosmetics and Nanomedicines. New Approaches for Skin Care. – Berlin:Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. – P.380.
- [31]. Neppiras E. A. Acoustic cavitation series: part one Acoustic cavitation: an introduction // *Ultrasonics*. – 1984. – Vol.22. – P.25-28.
- [32]. Мофа Н.Н., Жапекова А.О., Садыков Б.С., Баккара А.Е., Сахан М.Г., Бекентаева А.Д. Мансуров З.А. Комплексное использование механохимической и ультразвуковой обработки для получения высокодисперсного диоксида кремния специального назначения // *Горение и плазмохимия*. – 2019. – №2. – С.123-132.
- [33]. Жапекова А.О., Мофа Н.Н., Elouadi B.,

Иминова Р.С. Баккара А.Е., Мансуров З.А. Механохимическая и ультразвуковая обработка – управляемый способ формирования структуры и свойств нанокomпозиционных гелевых систем// Известия НАН РК, Серия химии и технологий. – 2021. – №2. – С.36-44.

References

- [1]. Novitsky BG (1983) Application of acoustic vibrations in chemical technological processes [Primeneniye akusticheskikh kolebaniy v khimiko-tekhnologicheskikh protsessakh]. Chemistry, Moscow, Russia. (in Russian)
- [2]. Margulis MA (1984) Fundamentals of sound chemistry [Osnovy zvukokhimii] Chemistry, Moscow, Russia. (in Russian)
- [3]. Kardashev GA (1990) Physical methods of intensification of chemical technology processes [Fizicheskiye metody intensivatsii protsessov khimicheskoy tekhnologii]. Chemistry, Moscow, Russia. ISBN 5-7245-0674-2 (in Russian)
- [4]. Canselier JP, Delmas H, Wilhelm AM, Abismail B, (2002) Journal of Dispersion Science and Technology, 23:333-349. <https://doi.org/10.1080/01932690208984209>
- [5]. Morya NK, Iyer PK, Moholkar VS (2008) Polymer 49:1910-1925. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.02.032>
- [6]. Du X, Li Z, Xia J, Zhang F, Wang Z (2019) Colloids Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 561:47-56. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.10.047>
- [7]. Li Z, Du X, Cui X, Wang Z (2019) Ultrasonics Sonochemistry 57:223-232. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.04.037>
- [8]. Rodriguez-San-Miguel D, Montoro C, Zamora F (2020) Chemical Society Reviews 49:2291-2302. <https://doi.org/10.1039/C9CS00890J>
- [9]. Huo M, Wang L, Chen Y, Shi J (2020) Nano Today 32:100854. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2020.100854>
- [10]. Li Zh, Dong J, Zhang H, Zhang Y, Wang H, Cui X, Wang Z (2020) Nanoscale Advances 3:41-72. <https://doi.org/10.1039/D0NA00753F>
- [11]. Akulichev BA (1968) Powerful ultrasonic fields [Moshchnyye ul'trazvukovyye polya]. Ed. Rosenberg L.D. Nauka, Moscow, Russia. (in Russian)
- [12]. Agranat BA, Bashkirov VI, Kitaygorodsky YuI, Khevsky NN (1974) Ultrasonic technology [Ul'trazvukovaya tekhnologiya] Metallurgy, Moscow, Russia. (in Russian)
- [13]. Goodwin G (1993) Ultrasonic equipment. Chemistry and Ultrasound [Ul'trazvukovoye oborudovaniye. Khimiya i ul'trazvuk] Nauka, Moscow, Russia. (in Russian)
- [14]. Khmelev VN, Shalunov AV, Khmelev SS, Tsyganok SN (2015) Ultrasound. Apparatuses and technologies [Ul'trazvuk. Apparaty i tekhnologii] monograph. Publishing house of Altai State Technical University, Biysk, Russia. (in Russian). ISBN 978-5-9257-0297-0
- [15]. Flynn HG (1964) Physical Acoustics 1B:57-172.
- [16]. Pol VG, Reisfeld R, Gedanken A (2002) Chem. of mater. 14:3920-3924. <https://doi.org/10.1021/cm0203464>
- [17]. Novitsky BG (1983) Application of acoustic vibrations in chemical technological processes [Primeneniye akusticheskikh kolebaniy v khimiko-tekhnologicheskikh protsessakh]. Chemistry, Moscow, Russia. (in Russian)
- [18]. Khasanov OL (2008) Effects of powerful ultrasonic impact on the structure and properties of nanomaterials [Effekty moshchnogo ul'trazvukovogo vozdeystviya na strukturu i svoystva nanomaterialov]: textbook / Khasanov O.L., Dvilis E.S., Polisadova V.V., Zykova A.P. Tomsk Polytechnic University Publishing House, Tomsk, Russia. (in Russian)
- [19]. Gedanken A (2004) Ultrason Sonochem. 11:47-55. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2004.01.037>
- [20]. Landau MV, Vradman L, Herskowitz M, Koltypin Y, Gedanken A (2001) J. Catal. 201:22-36. <https://doi.org/10.1006/jcat.2001.3227>
- [21]. Avivi S, Gedanken A (2002) Biochem. J., 366(3):705-707. <https://doi.org/10.1042/BJ20020676>
- [22]. Avivi S, Nitzan Y, Dror R, Gedanken A (2003) J. Am. Chem. 125(51):15712-15713 <https://doi.org/10.1021/ja036834>
- [23]. Mansurov ZA, Mofa NN, Shabanova TA (2016) Mechanochemical synthesis of composite materials [Mekhanokhimicheskiy sintez kompozitsionnykh materialov]. Kazakh University, Almaty, Kazakhstan. ISBN: 978-601-04-1688-8 (in Russian)
- [24]. Margulis MA (1986) Sound chemical reactions and sonoluminescence [Zvukokhimicheskiye reaktzii i sonolyuminestsentsiya] Chemistry, Moscow, Russia. 288 p. (in Russian)
- [25]. Baranchikov AYe, Ivanov VK, Tretyakov YuD (2007) Russian Chem. Reviews [Uspekhi himii]. 76(2):133-151. <https://doi.org/10.1070/RC2007v076n02ABEH003644>
- [26]. Zhapekova A, Bakkara A, Iminova R, Golovchenko O, Mofa NN (2020) Industry of Kazakhstan [Promyshlennost' Kazakhstana] 2:71-74. (in Russian)
- [27]. Dubinskaya AM (1999) Russian Chemical Reviews [Uspekhi himii] 68(8):708-724. <http://dx.doi.org/10.1070/RC1999v068n08ABEH000435>
- [28]. Muravyov IA (1980) Technology of dosage forms [Tekhnologiya lekarstvennykh form]

- Medicine, Moscow, Russia. (in Russian)
- [29]. Villamo H (1990) Cosmetic chemistry. Per. with fin. Mir, Moscow, Russia. ISBN 5-03-001352-0. (in Russian)
- [30]. Beck R, Guterres S, Polmann A (2011) Nanocosmetics and Nanomedicines. New Approaches for Skin Care. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Germany. ISBN 978-3-642-19792-5
- [31]. Neppiras EA (1987) Ultrasonics. 22:25-28. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(84\)90057-X](https://doi.org/10.1016/0041-624X(84)90057-X)
- [32]. Mofa NN, Zhapekova AO, Sadykov BS, Bakkara AE, Sakhan MG, Bekentaeva AD, Mansurov ZA (2019) Combustion and Plasma Chemistry. <https://doi.org/10.18321/cpc309> (in Russian).
- [33]. Zhapekova AO, Mofa NN, Elouadi B, Iminova RS, Bakkara AE, Mansurov ZA (2021) News of the national academy of sciences of the republic of kazakhstan series chemistry and technology. 2:36-44. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-1491.24>

Ultrasonic processing is an effective method of directed synthesis of nanostructured systems (review)

N.N. Mofa¹, A.O. Zhapekova^{1,2}, A.E. Bakkara^{1,2}

¹Institute of combustion problems, Bogenbay Batyr str. 172, Almaty, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi ave., Almaty, Kazakhstan

Abstract

The article provides an overview of works on ultrasonic treatment (UST) and physicochemical processes that take place during ultrasonic treatment in liquid media on inorganic and organic materials. The role of cavitation phenomena, acoustic flows, heat generation and chemical reactions, as well as mechanical effects associated with the appearance of alternating stresses in solids and diffusion phenomena that contribute to the formation of a structure, both at the micro- and nano-level of the processed systems, is shown. By the example of quartz and wollastonite, it is clearly shown how, as a result of ultrasonic treatment, the dispersion and structuredness of the surface of the particles of the processed powders occurs. It is also shown how ultrasonic treatment can be used to control the state and qualitative changes in the properties of gel systems as a result of ultrasonic treatment on the structure formation process. The

use of ultrasonic treatment is most effective when processing mixtures of a colloidal base and an inorganic filler (silicon dioxide). The development of such systems is of particular importance in the preparation of medicinal and cosmetic products. *Key words:* UST (ultrasonic treatment), dispersion, nanocompositions, quartz, wollastonite, colloidal systems.

Ультрадыбыстық өңдеу-наноқұрылымды жүйелерді мақсатты синтездеудің тиімді әдісі (шолу)

Н.Н. Мофа¹, А.О. Жапекова^{1,2}, А.Е. Баккара^{1,2}

¹Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр көшесі, 172, Алматы, Қазақстан

²әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби даңғылы, 71, Алматы, Қазақстан

Аңдатпа

Мақалада ультрадыбыстық өңдеу (УДӨ) және сұйық ортада УДӨ кезінде орын алатын физика-химиялық процестер бойынша бейорганикалық және органикалық материалдарға шолу жасалған. Кавитация құбылыстарының, акустикалық ағындардың, жылу мен химиялық реакциялардың пайда болуының, сондай - ақ қатты денелердегі ауыспалы кернеулердің пайда болуымен байланысты механикалық әсерлердің және өңделетін жүйелердің микро- және нано- деңгейде құрылымның қалыптасуына ықпал ететін диффузиялық құбылыстардың рөлі көрсетілген. Кварц пен волластаниттің мысалында ультрадыбыстық өңдеу нәтижесінде өңделген ұнтақтардың бөлшектерінің диспергациясы мен бетінің құрылымы қалай анық көрсетілген. Сондай-ақ, ультрадыбыстық өңдеу арқылы құрылымды қалыптастыру процесіне ультрадыбыстық өңдеудің әсерінен гель жүйелерінің қасиеттерінің күйі мен сапалық өзгерісін қалай реттеуге болатындығы көрсетілген. Коллоидтық негіздің және бейорганикалық толтырғыштың (кремний диоксиді) қоспаларын өңдеуде ультрадыбыстық өңдеуді тиімді пайдалану. Мұндай жүйелерді дамыту медициналық және косметикалық препараттарды алу кезінде өте маңызды.

Түйінді сөздер: УДӨ (ультрадыбыстық өңдеу), дисперсия, нанокөміршіліктер, кварц, волластонит, коллоидты жүйелер.