

ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ОБЛАСТИ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКЕ СУСПЕНЗИЙ ЧАСТИЦ МАГНИЯ

Н. Ю. БРЕЖНЕВА¹⁾, В. С. МИНЧУК²⁾, С. А. УЛАСЕВИЧ³⁾, Н. В. ДЕЖКУНОВ²⁾, Е. В. СКОРБ³⁾

¹⁾Научно-исследовательский институт физико-химических проблем БГУ,
ул. Ленинградская, 14, 220006, г. Минск, Беларусь

²⁾Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск, Беларусь

³⁾Университет ИТМО, ул. Ломоносова, 9, 191002, г. Санкт-Петербург, Россия

Исследована кавитационная активность в процессе ультразвуковой обработки частиц магния. Активность кавитации, регистрируемая в непрерывном режиме ультразвукового воздействия, изменяется в широком диапазоне при постоянных выходных параметрах генератора. Скорость и характер изменения активности кавитации зависят от массовой доли частиц в суспензии. В процессе ультразвуковой обработки можно выделить следующие этапы: рост кавитационной активности, достижение максимума с последующим снижением и выход на плато либо повторяющиеся циклы увеличения и уменьшения кавитационной активности. Сложный характер динамики кавитационной активности связан с участием водорода, выделяющегося в результате химического взаимодействия частиц магния с водой, в образовании кавитационной области. Модифицированные частицы были охарактеризованы с использованием сканирующей электронной микроскопии, рентгенофазового и термического анализа. Установлено, что в результате ультразвуковой обработки частиц магния происходит формирование фаз гидроксида магния, а также гидрида магния.

Ключевые слова: ультразвук; кавитационная активность; микрочастицы магния; $Mg(OH)_2$; MgH_2 .

Образец цитирования:

Брежнева НЮ, Минчук ВС, Уласевич СА, Дежкун НВ, Скорб ЕВ. Динамика развития кавитационной области при ультразвуковой обработке суспензий частиц магния. *Журнал Белорусского государственного университета. Химия*. 2021;1:75–84.
<https://doi.org/10.33581/2520-257X-2021-1-75-84>

For citation:

Brezhneva NYu, Minchuk VS, Ulasevich SA, Dezhkunov NV, Skorb EV. Dynamics of cavitation zone development during sonication of suspensions of magnesium particles. *Journal of the Belarusian State University. Chemistry*. 2021;1:75–84. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2520-257X-2021-1-75-84>

Авторы:

Надежда Юрьевна Брежнева – младший научный сотрудник лаборатории химии тонких пленок.

Вячеслав Сергеевич Минчук – инженер-электроник научно-исследовательской лаборатории ультразвуковых технологий и оборудования.

Светлана Александровна Уласевич – кандидат химических наук; научный сотрудник химико-биологического кластера, доцент-исследователь Научно-образовательного центра инфохимии.

Николай Васильевич Дежкун – кандидат технических наук, доцент; заведующий научно-исследовательской лабораторией ультразвуковых технологий и оборудования.

Екатерина Владимировна Скорб – кандидат химических наук; профессор химико-биологического кластера, директор Научно-образовательного центра инфохимии.

Authors:

Nadzeya Yu. Brezhneva, junior researcher at the laboratory of chemistry of thin films.

brezhny@bsu.by

Vyacheslav S. Minchuk, engineer-electronics specialist at the research laboratory of ultrasound technologies and devices.

slava.minchuk@bk.ru

Sviatlana A. Ulasevich, PhD (chemistry); researcher of the chemical-biological cluster, associate professor at the Infochemistry Scientific Center.

saulasevich@itmo.ru

Nikolai V. Dezhkunov, PhD (engineering), docent; head of the research laboratory of ultrasound technologies and devices.

dny@bsuir.by

Ekaterina V. Skorb, PhD (chemistry); professor at the chemical-biological cluster, director of the Infochemistry Scientific Center.

skorb@itmo.ru

DYNAMICS OF CAVITATION ZONE DEVELOPMENT DURING SONICATION OF SUSPENSIONS OF MAGNESIUM PARTICLES

N. Yu. BREZHNEVA^a, V. S. MINCHUK^b, S. A. ULASEVICH^c, N. V. DEZHKUNOV^b, E. V. SKORB^c

^aResearch Institute for Physical Chemical Problems, Belarusian State University,
14 Leningradskaya Street, Minsk 220006, Belarus

^bBelarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
6 P. Broŭki Street, Minsk 220013, Belarus

^cITMO University, 9 Lomonosov Street, Saint Petersburg 191002, Russia

Corresponding author: N. Yu. Brezhneva (brezhny@bsu.by)

The cavitation activity during ultrasonic treatment of magnesium particles has been investigated. The cavitation activity recorded in a continuous mode of ultrasonic treatment altered in a wide range at constant output parameters of the generator. The rate and nature of cavitation activity variation depended on the mass fraction of particles in the suspension. It has been demonstrated that during the ultrasonic treatment of magnesium aqueous suspensions it is possible to determine the following stages: growth of cavitation activity, reaching a maximum followed by a decrease and reaching a plateau (or repeated cycles of increasing or decreasing cavitation activity). The complex nature of the cavitation activity dynamics is associated with the participation of hydrogen released as a result of the chemical interaction of magnesium particles with water in the formation of the cavitation zone. The magnesium particles modified with ultrasound were characterised with the use of scanning electron microscopy, X-ray phase analysis and thermal analysis. It has been found that ultrasonic treatment of magnesium particles resulted in the formation of magnesium hydroxide and magnesium hydride phases.

Keywords: ultrasound; cavitation activity; magnesium microparticles; $\text{Mg}(\text{OH})_2$; MgH_2 .

Введение

В настоящее время использование ультразвука позволяет синтезировать новые наноматериалы, структурировать поверхности твердых тел для создания материалов с заданными свойствами [1–4]. Ультразвуковую кавитацию можно рассматривать как эффективный механизм локального концентрирования относительно низкой энергии акустического поля в малых объемах кавитационных пузырьков [5; 6]. Сонохимические эффекты обычно обусловлены наличием короткоживущих пузырьков, которые, разрушаясь, создают неравновесные условия в области с высокими температурами и давлениями [6; 7]. Такие пузырьки генерируют ударные волны, микроструи и химически активные вещества, такие как гидроксильные радикалы, являющиеся продуктом сонохимического разложения (сонолиза) воды. Нестационарная (инерционная) кавитация выступает действующим фактором в процессах очистки с использованием ультразвукового [8; 9] диспергирования твердых тел, наноструктурирования поверхностей материалов [10–15]. Схлопывающиеся пузыри можно рассматривать как микроконтейнеры, которые могут применяться для модифицирования поверхности твердых тел [10]. Нестационарная кавитация связана с динамикой схлопывания пузырей, а в случае сонохимической обработки металлов и сплавов может сопровождаться различными процессами, включая образование поверхностных оксидных и гидроксидных слоев в окислительной среде и восстановление компонентов сплава при ультразвуковой обработке в восстановительной среде (например, в этиленгликоле), а также перекристаллизацию либо аморфизацию и т. д. [16]. Ультразвуковое воздействие служит удобным инструментом для улучшения свойств различных материалов: повышения эффективности электрокаталитического разложения воды [13], улучшения биосовместимости материалов [15], а также создания пористых матриц для инкапсуляции биоактивных молекул, ингибиторов коррозии [11; 14].

В работе [17] также была продемонстрирована возможность формирования гибридных капсул состава полипиррол – магний, образующихся при полимеризации мономера (пиррола), присутствующего в растворе. Одним из перспективных направлений является использование магния в качестве материала для хранения водорода [18; 19]. Сонохимическая обработка суспензий частиц магния в воде обеспечивает образование гидридов магния в металлгидроксидной матрице ($\text{Mg} - \text{Mg}(\text{OH})_2$) [10]. Водород, выделяющийся в результате химической реакции магния с водой, способен воздействовать на кавитацию и ее роль в модификации металлических частиц. До настоящего времени анализ влияния газообразных продуктов, образующихся при сонохимической модификации металлов, на характеристики кавитационной области не проводился. Целью данного исследования является изучение эволюции кавитационной активности при ультразвуковой обработке частиц магния в водных суспензиях с последующим рассмотрением частиц, модифицированных ультразвуковым воздействием.

Методика эксперимента

Водные суспензии микрочастиц магния (*Alfa Aesar* (США), 99,8 %, ~40 мкм) с различными концентрациями (0,003; 0,007 и 0,010 г/мл) были приготовлены путем добавления соответствующего количества порошка к 100 мл дистиллированной воды. После перемешивания суспензии в течение 10 с включали источник ультразвука – пьезопреобразователь с волноводом-концентратором (номинальная рабочая частота излучателя – 22 кГц). Диаметр излучающей поверхности этого устройства составлял 12 мм. Источником переменного напряжения ультразвуковой частоты служил генератор УЗГ 55-22 (БГУИР, Беларусь). Для измерения активности кавитации A_k использовался кавитометр ICA 5D (БГУИР, Беларусь).

В основе работы прибора лежит спектральный анализ кавитационного шума, т. е. акустического сигнала, создаваемого зоной кавитации¹ [7]. Датчик устройства представляет собой цилиндрический волновод диаметром 3 мм, на конце которого расположен пьезоэлемент. По волноводу акустический сигнал из зоны кавитации передается на пьезопластину, где он преобразуется в электрический. Выход устройства формируется как интеграл широкополосной составляющей кавитации в диапазоне частот от 10 кГц до 10 МГц. Кавитометр позволяет измерять (в условных единицах) общую активность кавитации и вклад схлопывающихся пузырьков, т. е. активность нестационарной кавитации. Гидрофон размещался под излучателем (соноотродом) на расстоянии 1 см.

После ультразвуковой обработки частицы магния промывали водой и высушивали в сушильном шкафу до постоянной массы.

Методы исследования. Морфологию поверхности частиц анализировали с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 (Чехия) в режиме детектирования вторичных электронов при рабочем напряжении 5 кВ. Предварительно на образцы напыляли углерод для обеспечения лучшей проводимости.

Рентгенофазовый анализ проводили с применением порошкового дифрактометра Empyrean (*PANalytical*, Нидерланды) с длиной волны излучения медного анода 1,5418 Å при скорости сканирования 0,03 град/мин в диапазоне 2θ от 10 до 85 град. Для оценки инструментального уширения в качестве стандарта использовали монокристалл гексаборида лантана, размеры области когерентного рассеяния (ОКР) определяли посредством уравнения Шеррера:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta} \cos \theta,$$

где D – размер ОКР, нм; K – константа Шеррера; λ – длина волны излучения, нм; β – полная ширина на половине высоты рефлекса с учетом инструментального уширения; θ – угол дифракции.

Термический анализ проводили с использованием термогравиметрии, а также дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на анализаторе STA 449 F3 (*Netzsch*, Германия) путем нагревания образцов на воздухе от 30 до 500 °С при скорости нагрева 10 град/мин.

Результаты и их обсуждение

В ходе ультразвуковой обработки частиц магния в воде протекают реакции сонолиза воды, а также формирования гидроксида магния (фаза брукита) на поверхности частиц магния [20]. Для водных суспензий с различным содержанием частиц были обнаружены разные зависимости активности кавитации. Общей особенностью является низкий уровень активности кавитации в начальный момент включения ультразвука (рис. 1). Затем A_k растет, достигает максимального значения, а потом несколько уменьшается с последующим выходом на плато (см. рис. 1, кривые 1, 2) или постепенно увеличивается (см. рис. 1, кривая 3).

Стоит также отметить, что активность кавитации в суспензиях (см. рис. 1, а) намного ниже, чем в дистиллированной воде (см. рис. 1, б). Однако размах пульсаций величины A_k в дистиллированной воде выше.

После введения частиц магния в воду происходит интенсивное выделение водорода. Вследствие этого кавитационная область в начальный момент пересыщена пузырьками, в том числе больших размеров, пульсирующими без схлопывания и не вносящими вклад в активность кавитации. Такие пузырьки при их высокой концентрации становятся демпфирующим фактором. Кроме того, нужно отметить, что из-за высокого коэффициента диффузии водорода содержание газа внутри пузырьков в суспензии

¹Лаборатория ультразвуковых технологий и оборудования [Электронный ресурс]. URL: <https://cavitation.bsuir.by/en/> (дата обращения: 28.12.2020).

существенно выше, чем в дистиллированной воде, поэтому они схлопываются с меньшей эффективностью. Данные обстоятельства и являются основной причиной низкой активности кавитации в начальной стадии эксперимента, результаты которого представлены на рис. 1, а.

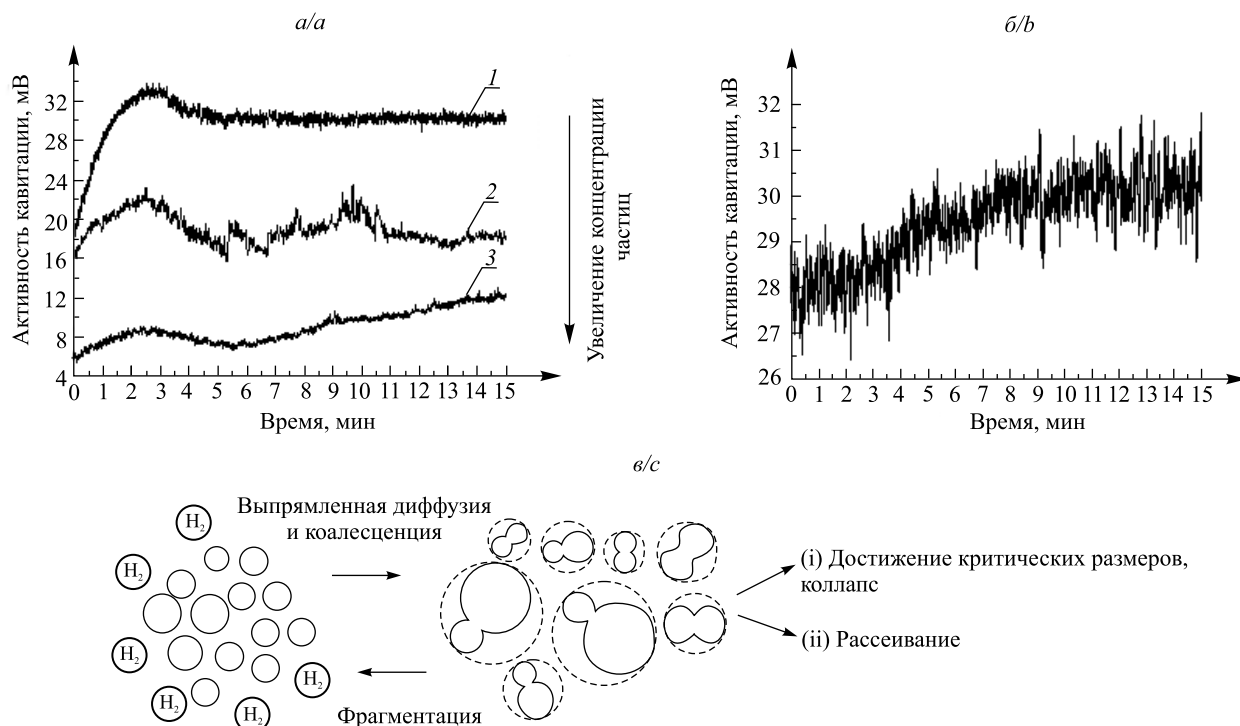


Рис. 1. Кривые изменения кавитационной активности в ходе сонохимической обработки водных суспензий частиц магния (а) с различным содержанием частиц (1 – суспензия с содержанием частиц 0,003 г/мл; 2 – 0,007 г/мл; 3 – 0,010 г/мл) и дистиллированной воды (б). Схема эволюции кавитационных пузырей (в)

Fig. 1. Curves of the cavitation activity alteration during sonochemical treatment of the aqueous suspensions of magnesium particles (a) with different particles content (1 – suspension with the particles content 0.003 g/ml; 2 – 0.007 g/ml; 3 – 0.010 g/ml) and distilled water (b). The scheme of the cavitation bubbles evolution (c)

При облучении ультразвуком начинается процесс дегазации [21], поскольку за счет сил Бьеркнеса происходит интенсивная коалесценция пульсирующих стабильных пузырьков [22], т. е. они объединяются в большие пузыри и быстро всплывают. Таким образом, доля больших стабильных пузырьков в кавитационной области снижается, а относительная концентрация захлопывающихся (нестационарных), наоборот, увеличивается. Это и является причиной роста активности кавитации на первой стадии исследованного процесса, т. е. в течение первых трех минут (см. рис. 1, а, кривые 1, 2).

Выход на плато на последующей стадии ультразвуковой обработки, очевидно, связан с достижением равновесного состояния кавитационной области, при котором удаление пузырьков из жидкости за счет дегазации компенсируется выделением газа с поверхности частиц.

В суспензии с большим количеством частиц (0,010 г/мл) (см. рис. 1, а, кривая 3) за стадией уменьшения интенсивности кавитации происходит повторное увеличение интенсивности кавитации.

Для подтверждения наличия связи между активностью кавитации и концентрацией газовых пузырьков было исследовано влияние ультразвуковой обработки на водные растворы, насыщенные углекислым газом (при условии, что углекислый газ растворен в воде под давлением 0,2 МПа [23], растворимость CO_2 составляет 1,75 л на 1 л воды). При атмосферном давлении растворимость углекислого газа также превышает значения растворимости азота, кислорода, водорода [24].

Результаты приведены на рис. 2, откуда следует, что на начальной стадии эксперимента активность кавитации незначительная (см. рис. 2, а). Ультразвуковое облучение запускает процесс дегазации жидкости с выделением большого количества пузырьков с размерами до нескольких миллиметров. Для условий данного эксперимента в течение первых 15 с происходит быстрое увеличение кавитационной активности, после чего рост замедляется (см. рис. 2, а). Приблизительно после 2,5 мин ультразвуковой обработки наблюдается скачкообразное увеличение активности, обусловленное взаимодействием пузырьков в пределах кавитационной области. Далее отмечается небольшое снижение активности с последующим медленным ростом.

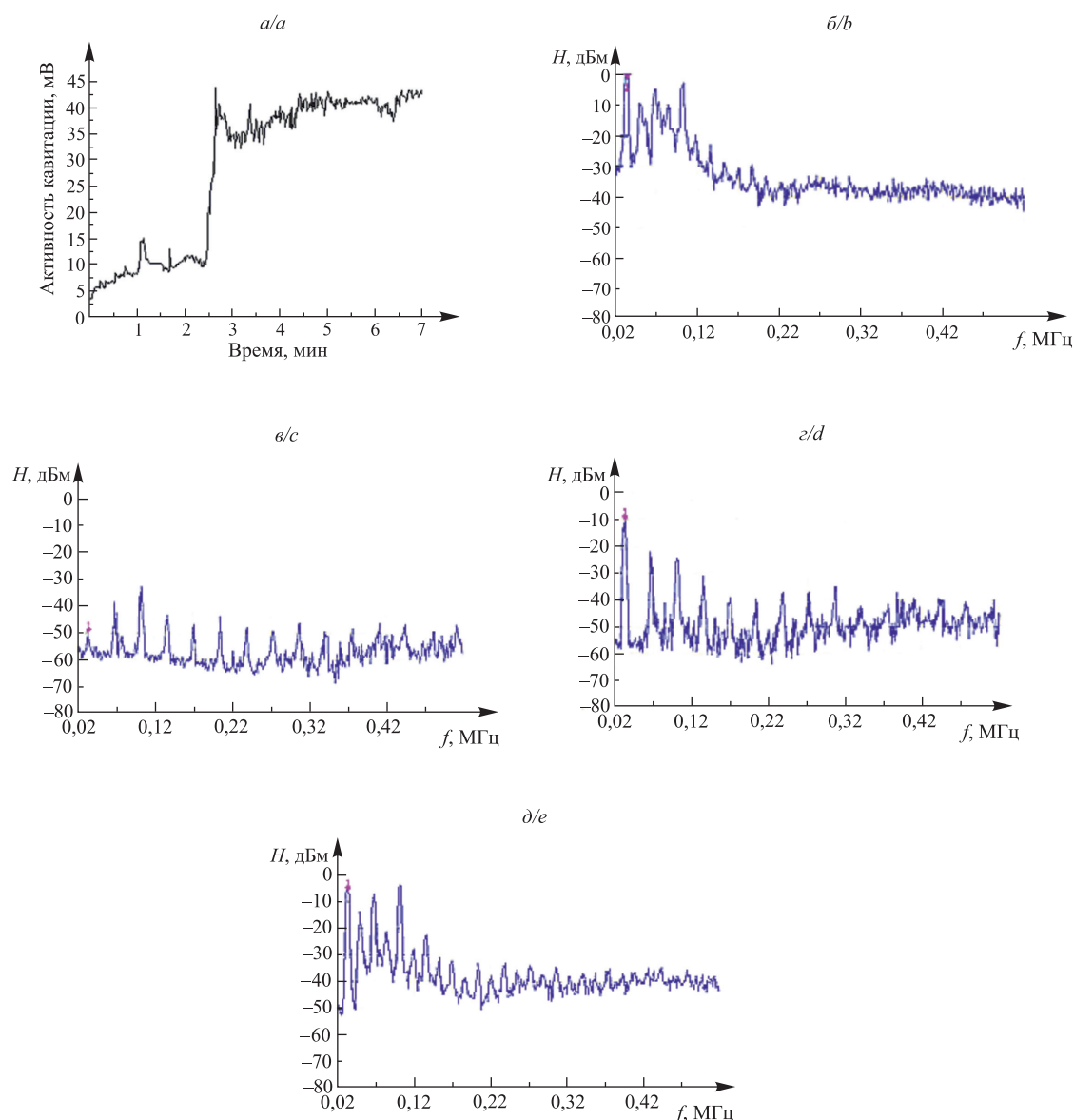


Рис. 2. Изменение кавитационной активности в ходе сонохимической обработки воды, пересыщенной углекислым газом (а), спектры кавитационного шума дистиллированной воды (б) (после 1 мин ультразвуковой обработки), а также воды, пересыщенной углекислым газом (в – д), после 1 мин (в), 2 мин (г), 4,5 мин (д) ультразвуковой обработки. Стрелкой указан сигнал основной частоты

Fig. 2. Cavitation activity alteration during sonication of water oversaturated with carbon dioxide (a), spectra of the cavitation noise recorded in distilled water (b) and oversaturated with carbon dioxide (c – e) after 1 min (c), 2 min (d), 4.5 min (e) of ultrasonic treatment. The arrow indicates the signal of the main frequency f_0

Низкий уровень активности кавитации в начале эксперимента связан с появлением значительного количества газовых полостей, в том числе пузырей большого размера в кавитационной области. В указанных условиях в жидкости не могут быть достигнуты растягивающие напряжения, достаточные для активации мелких пузырьков с размерами, близкими к резонансному (резонансный размер пузырьков составляет около 20 мкм [25]). Данное обстоятельство, в свою очередь, не позволяет жидкости достичь напряжений, вызывающих растяжение (сжатие) и коллапс пузырьков с размерами, близкими к резонансному. По мере ультразвуковой обработки прочность жидкости повышается за счет дегазации. В результате увеличивается отрицательное давление в фазе разрежения звуковой волны, активность кавитации возрастает с активацией пузырьков меньших размеров.

Действительно, из спектра кавитационного шума (см. рис. 2, *в*), зарегистрированного на первой минуте ультразвукового воздействия, видно, что интенсивность сигнала основной частоты (f_0) оказывается ниже высокочастотных компонентов nf_0 (где n – целое число). Данное явление можно объяснить поглощением звукового сигнала в кавитационной области ввиду значительного количества пузырей больших размеров. При дальнейшем облучении ультразвуком отмечается рост интенсивности на основной частоте f_0 . При сравнении спектров кавитационного шума, записанных после 1 мин (см. рис. 2, *в*) и 2 мин (см. рис. 2, *з*) дегазации соответственно, можно наблюдать увеличение интенсивности на основной частоте приблизительно на 40 дБм, т. е. более чем в 100 раз. Отдельно следует рассмотреть проявляющуюся непрерывную компоненту кавитационного шума в диапазоне от 20 до 500 кГц, связанную с коллапсом кавитационных пузырей. Из рис. 2, *в* – *д*, следует, что в начальной стадии (см. рис. 2, *в*) интенсивность непрерывной компоненты незначительна и возрастает на поздних стадиях ультразвукового воздействия, сопровождающегося дегазацией среды. Это позволяет сделать вывод о том, что при высоких концентрациях газа в жидкости эффективность преобразования энергии ультразвука в энергию ударных волн при схлопывании пузырьков низкая.

После длительного ультразвукового воздействия (рис. 3, *д*) наблюдается рост интенсивности высокочастотных компонент, в то время как данный параметр для низкочастотных компонент остается практически неизменным. Пузыри с размерами меньше резонансного генерируют в спектре компоненты с более высокими частотами [26]. По мере ультразвуковой обработки концентрация пузырей больших размеров в растворе уменьшается, при этом количество пузырьков с малыми размерами увеличивается.

Таким образом, исходя из представленных выше данных, можно сделать вывод о том, что по мере дегазации раствора под действием ультразвука в кавитационной области происходит удаление из жидкой среды пузырьков с размерами больше резонансного и увеличение концентрации пузырьков меньших размеров, которые интенсивно схлопываются и генерируют при этом специфические кавитационные эффекты – микроструи, ударные волны, локальные области высокой температуры и давления.

После регистрации кавитационной активности в водных суспензиях частиц магния была проведена характеристика модифицированных частиц. Анализ поверхности частиц до и после ультразвукового воздействия выявил различие в морфологии поверхности исходных (см. рис. 3, *а*) и модифицированных (см. рис. 3, *б*, *в*) частиц магния. Показано, что в результате сонохимической обработки поверхность частиц магния либо частично (см. рис. 3, *б*), либо полностью (см. рис. 3, *в*) покрывается слоем гидроксида магния в виде агрегатов пластинчатых кристаллов. Поверхность частиц, свободная от указанных агрегатов гидроксида магния, дополнительно покрывается плотным аморфным слоем гидроксида ввиду легкости окисления реакционно-способного магния на воздухе. Отметим, что поверхность немодифицированных частиц (см. рис. 3, *а*) покрыта тонким слоем нативного гидроксида магния, формирующегося в результате естественного окисления частиц на воздухе.

Причина различной кроющей способности покрытия из гидроксида магния, образующегося при ультразвуковой обработке частиц магния, может заключаться в большей кавитационной активности, присущей низкоконтентрированным суспензиям (0,003 г/мл) (см. рис. 3, *б*) по сравнению с более концентрированными суспензиями (0,010 г/мл) (см. рис. 3, *в*). Ударные волны и микроструи, являющиеся следствием коллапса пузырей, обеспечивают лучшее удаление агрегатов гидроксида магния, формирующихся при ультразвуковой обработке суспензий. Наличие фазы гидроксида магния модификации брусита было подтверждено рентгенофазовым анализом (см. рис. 3, *з*, рентгенограмма 1), средний размер области когерентного рассеяния составил 10 нм.

Ввиду высокой реакционной способности микрочастиц магния был проведен дополнительный эксперимент, в котором суспензию частиц обрабатывали при повышенной температуре (80 °С) в отсутствие ультразвука. По результатам рентгенофазового анализа (см. рис. 3, *з*, рентгенограмма 2) гидроксид магния в подобных условиях формируется лишь в следовых количествах, равномерно покрывая поверхность частицы (см. рис. 3, *а*, врезка). Обнаружено, что после ультразвукового воздействия на частицы появляется фаза гидроксида магния (см. рис. 3, *з*, рентгенограмма 2, врезки), что свидетельствует о химическом связывании водорода в ходе ультразвуковой обработки частиц магния с водой. Были экспериментально подобраны условия ультразвуковой обработки (длительность обработки, амплитуда колебаний), которые вызывают образование фазы гидроксида магния в модифицированных частицах. Так, менее длительное воздействие ультразвука (<15 мин), а также меньшая амплитуда (<75 %) не приводят к формированию гидроксида магния, в то время как более длительная ультразвуковая обработка суспензий (>15 мин) не позволяет получить воспроизводимые данные для их последующей интерпретации.

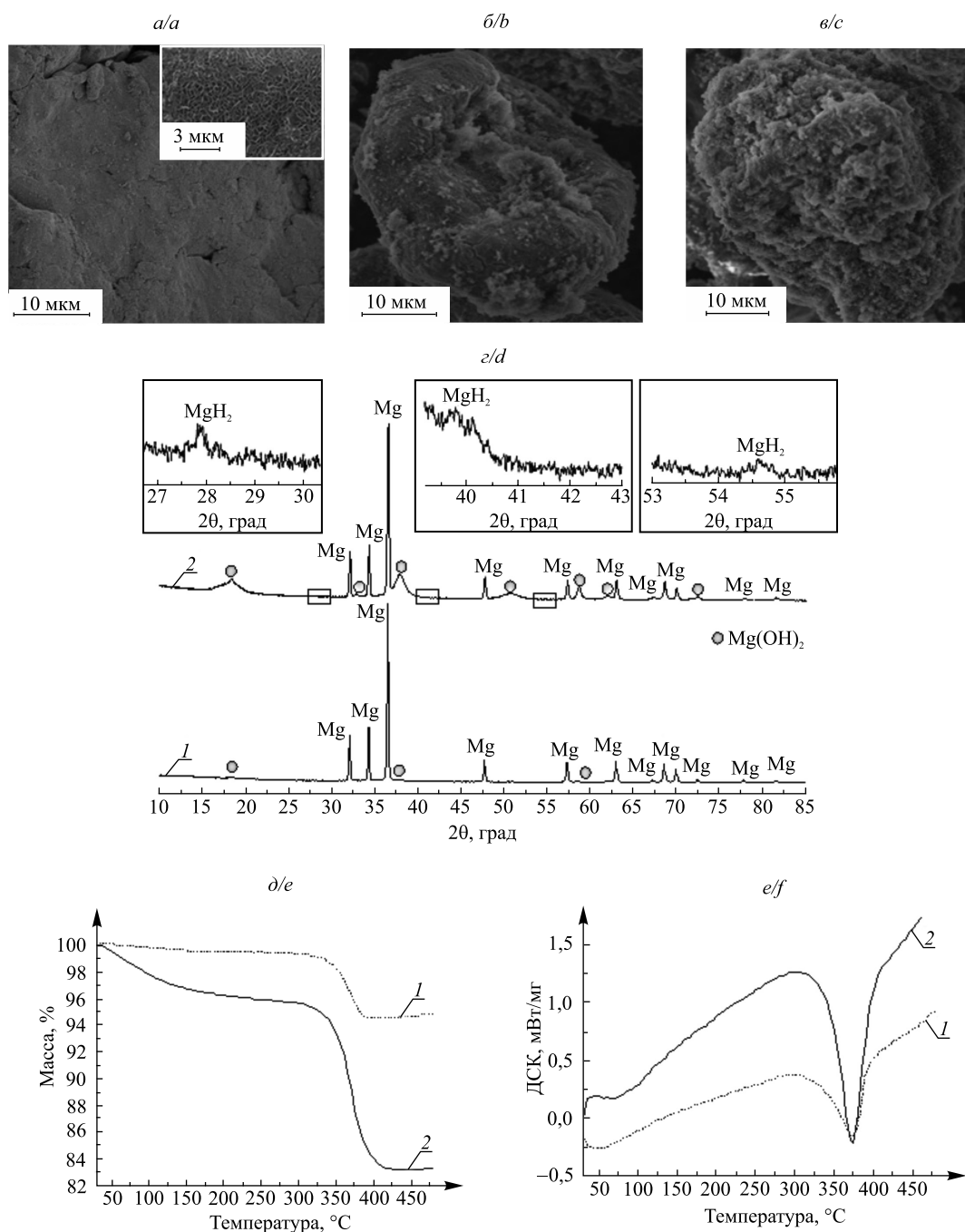


Рис. 3. СЭМ-изображения частиц магния: в исходном состоянии (а); после модификации в воде в отсутствие ультразвуковой обработки (а, врезка); после ультразвуковой модификации в суспензии с содержанием частиц 0,003 г/мл (б), 0,010 г/мл (в). Рентгенограммы образцов (д) в отсутствие ультразвуковой обработки (1) и после ультразвуковой модификации (2) (в прямоугольниках размещены увеличенные участки рентгенограммы для демонстрации наличия фазы гидрида магния). Термический анализ образцов (термогравиметрические кривые (е) и кривые дифференциальной сканирующей калориметрии (е)), обработанных в воде в отсутствие ультразвуковой модификации (1) и после нее (2)

Fig. 3. SEM images of Mg particles: in initial state (a); after modification in water in the absence of the ultrasonic impact (a, inset); after ultrasonic treatment of the suspension with the particles content 0.003 g/ml (b), 0.010 g/ml (c). XRD patterns of the samples (d) without ultrasonic treatment (1) and after ultrasonic treatment (2) (the rectangles demonstrate the enlarged regions of the diffractograms for indicating the presence of the MgH_2 phase). Thermal analysis of the sample (thermogravimetric curves (e) and differential scanning calorimetry curves (f)) treated in water in the absence of ultrasonic treatment (1) and after ultrasonic treatment in water (2)

Термогравиметрический анализ показал, что потеря массы образца, полученного в результате сонохимической обработки водных суспензий, составила 12 %, при этом в случае образцов, произведенных при тепловой обработке, не превышала 5 % (см. рис. 3, д). Наличие эндотермического эффекта на кривых дифференциальной сканирующей калориметрии свидетельствует о присутствии большого количества гидроксида магния, разложение которого начинается в области 340 °С (см. рис. 3, е). Таким образом, в результате обработки ультразвуком происходит глубокое окисление металла и формирование на поверхности частиц слоя гидроксида.

Заключение

Установлен характер изменения кавитационной активности при ультразвуковой обработке частиц магния в водных суспензиях. Обнаружено, что первоначально зона кавитации является перенасыщенной пузырьками газа, в том числе с размерами, значительно превышающими резонансные. Большие объемные концентрации таких полостей демпфируют процесс схлопывания нестационарных пузырьков с размерами, близкими к резонансному либо меньшими. В результате уровень активности кавитации в первоначальный момент оказывается низким.

Под действием ультразвука происходит дегазация раствора, сопровождающаяся удалением пузырьков больших размеров из суспензии и повышением относительной концентрации схлопывающихся (нестационарных) кавитационных пузырьков, что и приводит к росту активности кавитации A_k . Последующее снижение A_k связано с ускорением образования водорода и созданием условий для активных межпузырьковых взаимодействий, несферического коллапса пузырьков.

При продолжительном ультразвуковом воздействии процесс приобретает стационарный характер, при котором удаление пузырьков из жидкости компенсируется выделением водорода на поверхности частиц.

Сонохимическая обработка сопровождается формированием нанокристаллического гидроксида магния на поверхности частиц магния, а также гидрида магния.

Библиографические ссылки

1. Chatel G, Colmenares JC. Sonochemistry: from basic principles to innovative applications. *Topics in Current Chemistry*. 2017;375(1):8. DOI: 10.1007/s41061-016-0096-1.
2. Баранчиков АЕ, Иванов ВК, Третьяков ЮД. Сонохимический синтез неорганических материалов. *Успехи химии*. 2007;76(2):147–168.
3. Suslick KS, Price GJ. Applications of ultrasound to materials chemistry. *Annual Review of Materials Science*. 1999;29:295–326. DOI: 10.1146/annurev.matsci.29.1.295.
4. Hidding B. Sonochemistry of silicon hydrides. *Science*. 2018;360(6388):489–490. DOI: 10.1126/science.aap8005.
5. Lohse D. Sonoluminescence: cavitation hots up. *Nature*. 2005;434:33–34. DOI: 10.1038/434033a.
6. Маргулис МА. Основы звукохимии. Химические реакции в акустических полях. Москва: Высшая школа; 1984. 272 с.
7. Tzanakis I, Hodnett M, Lebon GSB, Dezhkunov N, Eskin DG. Calibration and performance assessment of an innovative high-temperature cavitometer. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2016;240:57–69. DOI: 10.1016/j.sna.2016.01.024.
8. Bong-Kyun Kang, Min-Su Kim, Jin-Goo Park. Effect of dissolved gases in water on acoustic cavitation and bubble growth rate in 0.83 MHz megasonic of interest to wafer cleaning. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2014;21:1496–1503. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2014.01.012.
9. Hauptmann M, Struyf H, Mertens P, Heyns M, De Gendt S, Glorieux C, et al. Towards an understanding and control of cavitation activity in 1 MHz ultrasound fields. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2013;20(1):77–88. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2012.05.004.
10. Baidukova O, Möhwald H, Mazheika AS, Sviridov DV, Palamarcuic T, Weber B, et al. Sonogenerated metal-hydrogen sponges for reactive hard templating. *Chemical Communications*. 2015;51(36):7606–7609. DOI: 10.1039/c4cc10026c.
11. Skorb E, Shchukin D, Möhwald H, Andreeva D. Sonochemical design of cerium-rich anticorrosion nanonetwork on metal surface. *Langmuir*. 2010;26:16973–16979. DOI: 10.1021/la100677d.
12. Kuvyrkov E, Brezhneva N, Ulasevich SA, Skorb EV. Sonochemical nanostructuring of titanium for regulation of human mesenchymal stem cells behavior for implant development. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019;52:437–445. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.12.024.
13. Dulle J, Nemeth S, Skorb EV, Irrgang T, Senker J, Kempe R, et al. Sonochemical activation of Al/Ni hydrogenation catalyst. *Advanced Functional Materials*. 2012;22(15):3128–3135. DOI: 10.1002/adfm.201200437.
14. Skorb EV, Fix D, Shchukin DG, Möhwald H, Sviridov DV, Mousa R, et al. Sonochemical formation of metal sponges. *Nanoscale*. 2011;3:985–993. DOI: 10.1039/c0nr00635a.
15. Zhukova Y, Ulasevich SA, Dunlop JWC, Fratzl P, Möhwald H, Skorb EV. Ultrasound-driven titanium modification with formation of titania based nanofoam surfaces. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2017;36:146–154. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.11.014.
16. Skorb EV, Möhwald H, Andreeva DV. Effect of cavitation bubble collapse on the modification of solids: crystallization aspects. *Langmuir*. 2016;32(43):11072–11085. DOI: 10.1021/acs.langmuir.6b02842.
17. Skorb EV, Baidukova O, Goyal A, Brothie A, Andreeva DV, Möhwald H. Sononanoengineered magnesium-polypyrrole hybrid capsules with synergetic trigger release. *Journal of Materials Chemistry*. 2012;22(27):13841–13848. DOI: 10.1039/c2jm30768e.

18. Ares JR, Leardini F, Díaz-Chao P, Bodega J, Koon DW, Ferrer IJ, et al. Hydrogen desorption in nanocrystalline MgH_2 thin films at room temperature. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010;495(2):650–654. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.10.110.
19. Ares JR, Leardini F, Díaz-Chao P, Bodega J, Fernández JF, Ferrer IJ, et al. Ultrasonic irradiation as a tool to modify the H-desorption from hydrides: MgH_2 suspended in decane. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2009;16(6):810–816. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2009.03.004.
20. Baidukova O, Skorb EV. Ultrasound-assisted synthesis of magnesium hydroxide nanoparticles from magnesium. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016;31:423–428. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.01.034.
21. Сиротюк МГ. Акустическая кавитация. Москва: Наука; 2008. 271 с.
22. Xu Zheng. Numerical simulation of the coalescence of two bubbles in an ultrasound field. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018;49:277–282. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.08.014.
23. Efica EC, Hobbalah R, Li Xuesong, May EF, Nania M, Sanchez-Vicente Y, et al. Saturated phase densities of ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) at temperatures from (293 to 450) K and pressures up to 64 MPa. *Journal of Chemical Thermodynamics*. 2016;93:347–359. DOI: 10.1016/j.jct.2015.06.034.
24. Kolev NI. Solubility of O_2 , N_2 , H_2 and CO_2 in water. In: *Multiphase Flow Dynamics 4*. 2nd edition. Berlin: Springer; 2011. p. 209–239. DOI: 10.1007/978-3-642-20749-5_11.
25. Lauterborn W, Ohl CD. The peculiar dynamics of cavitation bubbles. *Flow, Turbulence and Combustion*. 1997;58:63–76. DOI: 10.1023/A:1000759029871.
26. Segebarth N, Eulaerts O, Reisse J, Crum LA, Matula TJ. Correlation between sonoluminescence, sonochemistry and cavitation noise spectra. *ChemPhysChem*. 2002;2(8–9):536–538. DOI: 10.1002/1439-7641(20010917)2:8/9<536::AID-CPHC536>3.0.CO;2-Y.

References

1. Chatel G, Colmenares JC. Sonochemistry: from basic principles to innovative applications. *Topics in Current Chemistry*. 2017;375(1):8. DOI: 10.1007/s41061-016-0096-1.
2. Baranchikov AE, Ivanov VK, Tretyakov YuD. [Sonochemical synthesis of inorganic materials]. *Uspekhi khimii*. 2007;76(2): 147–168. Russian.
3. Suslick KS, Price GJ. Applications of ultrasound to materials chemistry. *Annual Review of Materials Science*. 1999;29: 295–326. DOI: 10.1146/annurev.matsci.29.1.295.
4. Hidding B. Sonochemistry of silicon hydrides. *Science*. 2018;360(6388):489–490. DOI: 10.1126/science.aap8005.
5. Lohse D. Sonoluminescence: cavitation hots up. *Nature*. 2005;434:33–34. DOI: 10.1038/434033a.
6. Margulis MA. *Osnovy zvukokhimii. Khimicheskie reaktsii v akusticheskikh polyakh* [Basics of sonochemistry. Chemical reactions in acoustic fields]. Moscow: Vysshaya shkola; 1984. 272 p. Russian.
7. Tzanakis I, Hodnett M, Lebon GSB, Dezhkunov N, Eskin DG. Calibration and performance assessment of an innovative high-temperature cavitometer. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2016;240:57–69. DOI: 10.1016/j.sna.2016.01.024.
8. Bong-Kyun Kang, Min-Su Kim, Jin-Goo Park. Effect of dissolved gases in water on acoustic cavitation and bubble growth rate in 0.83 MHz megasonic of interest to wafer cleaning. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2014;21:1496–1503. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2014.01.012.
9. Hauptmann M, Struyf H, Mertens P, Heyns M, De Gendt S, Glorieux C, et al. Towards an understanding and control of cavitation activity in 1 MHz ultrasound fields. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2013;20(1):77–88. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2012.05.004.
10. Baidukova O, Möhwald H, Mazheika AS, Sviridov DV, Palamarciuc T, Weber B, et al. Sonogenerated metal-hydrogen sponges for reactive hard templating. *Chemical Communications*. 2015;51(36):7606–7609. DOI: 10.1039/c4cc10026c.
11. Skorb E, Shchukin D, Möhwald H, Andreeva D. Sonochemical design of cerium-rich anticorrosion nanonetwork on metal surface. *Langmuir*. 2010;26:16973–16979. DOI: 10.1021/la100677d.
12. Kuvyrkov E, Brezhneva N, Ulasevich SA, Skorb EV. Sonochemical nanostructuring of titanium for regulation of human mesenchymal stem cells behavior for implant development. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019;52:437–445. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.12.024.
13. Dulle J, Nemeth S, Skorb EV, Irrgang T, Senker J, Kempe R, et al. Sonochemical activation of Al/Ni hydrogenation catalyst. *Advanced Functional Materials*. 2012;22(15):3128–3135. DOI: 10.1002/adfm.201200437.
14. Skorb EV, Fix D, Shchukin DG, Möhwald H, Sviridov DV, Mousa R, et al. Sonochemical formation of metal sponges. *Nano-scale*. 2011;3:985–993. DOI: 10.1039/c0nr00635a.
15. Zhukova Y, Ulasevich SA, Dunlop JWC, Fratzl P, Möhwald H, Skorb EV. Ultrasound-driven titanium modification with formation of titania based nanofoam surfaces. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2017;36:146–154. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.11.014.
16. Skorb EV, Möhwald H, Andreeva DV. Effect of cavitation bubble collapse on the modification of solids: crystallization aspects. *Langmuir*. 2016;32(43):11072–11085. DOI: 10.1021/acs.langmuir.6b02842.
17. Skorb EV, Baidukova O, Goyal A, Brothie A, Andreeva DV, Möhwald H. Sononanoengineered magnesium-polypyrrole hybrid capsules with synergetic trigger release. *Journal of Materials Chemistry*. 2012;22(27):13841–13848. DOI: 10.1039/c2jm30768e.
18. Ares JR, Leardini F, Díaz-Chao P, Bodega J, Koon DW, Ferrer IJ, et al. Hydrogen desorption in nanocrystalline MgH_2 thin films at room temperature. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010;495(2):650–654. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.10.110.
19. Ares JR, Leardini F, Díaz-Chao P, Bodega J, Fernández JF, Ferrer IJ, et al. Ultrasonic irradiation as a tool to modify the H-desorption from hydrides: MgH_2 suspended in decane. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2009;16(6):810–816. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2009.03.004.
20. Baidukova O, Skorb EV. Ultrasound-assisted synthesis of magnesium hydroxide nanoparticles from magnesium. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016;31:423–428. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.01.034.
21. Сиротюк МГ. *Akusticheskaya kavitatsiya* [Acoustic cavitation]. Moscow: Nauka; 2008. 271 p. Russian.
22. Xu Zheng. Numerical simulation of the coalescence of two bubbles in an ultrasound field. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018;49:277–282. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.08.014.

23. Efica EC, Hobbalah R, Li Xuesong, May EF, Nania M, Sanchez-Vicente Y, et al. Saturated phase densities of (CO₂ + H₂O) at temperatures from (293 to 450) K and pressures up to 64 MPa. *Journal of Chemical Thermodynamics*. 2016;93:347–359. DOI: 10.1016/j.jct.2015.06.034.

24. Kolev NI. Solubility of O₂, N₂, H₂ and CO₂ in water. In: *Multiphase Flow Dynamics 4*. 2nd edition. Berlin: Springer; 2011. p. 209–239. DOI: 10.1007/978-3-642-20749-5_11.

25. Lauterborn W, Ohl CD. The peculiar dynamics of cavitation bubbles. *Flow, Turbulence and Combustion*. 1997;58:63–76. DOI: 10.1023/A:1000759029871.

26. Segebarth N, Eulaerts O, Reisse J, Crum LA, Matula TJ. Correlation between sonoluminescence, sonochemistry and cavitation noise spectra. *ChemPhysChem*. 2002;2(8–9):536–538. DOI: 10.1002/1439-7641(20010917)2:8/9<536::AID-CPHC536>3.0.CO;2-Y.

Статья поступила в редколлегию 29.12.2020.

Received by editorial board 29.12.2020.