УДК 535.378, 534-18, 544.778.3

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2019.4.17

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ВО ВРЕМЯ СОНОЛИЗА ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ СУСПЕНЗИЙ СУЛЬФАТОВ ЛАНТАНИДОВ В *n*-КСИЛОЛЕ ПРИ 22 И 44 кГц

© А. А. Тухбатуллин*, А. М. Абдрахманов, Г. Л. Шарипов

Институт нефтехимии и катализа УФИЦ РАН

Россия, Республика Башкортостан, 450075 г. Уфа, пр. Октября, 141.

Тел./факс: +7 (347) 284 27 50.

*Email: adiska0501@gmail.com

*Показано, что интенсивность флуоресценции молекул *n*-ксилола в спектре сонотриболюминесценции в суспензиях солей лантанидов увеличивается при обработке ультразвуком частотой 44 кГц относительно 22 кГц. Порог возникновения люминесценции ~2 Вт для 44 кГц и ~5 Вт для 22 кГц. Выявлен рост интенсивности свечения при насыщении суспензий инертными газами и молекулярным азотом. Зарегистрированы светоизлучающие продукты разложения *n*-ксилола (СН и С₂ радикалы) во время ультразвуковой обработки суспензий насыщенных аргоном. Разложение углеводородов происходит в результате плазмохимических процессов в кавитационных пузырьках и при электрических разрядах, происходящих в трещинах и на поверхности кристаллов, подверженных деформации при столкновениях во время ультразвукового воздействия на суспензии.*

Ключевые слова: ультразвук, кавитация, суспензии, люминесценция, ксилол, лантаниды.

Введение

Люминесценция в жидкости, вызванная акустической ультразвуковой кавитацией (сонолюминесценция, СЛ) зависит от многих факторов, в частности, от частоты ультразвука, акустического давления, содержания растворенных газов и т.д. [1–4]. Было показано, что интенсивность СЛ уменьшается при увеличении частоты ультразвука и она практически прекращается выше нескольких МГц [3; 5–6]. Насыщение жидкостей, большинством инертных газов приводит к значительному росту интенсивности СЛ [2; 7]. В некоторых случаях в спектрах СЛ присутствуют линии атомов этих газов [4]. Регистрируются также линии продуктов сонохимического разложения жидкостей: радикалов ОН, СН, С₂, СН и т.д. [4; 7–8].

Люминесценция различных растворенных газов, а также продуктов разложения растворителей, характерна и для свечения при ультразвуковой обработке суспензий органических и неорганических кристаллов (механолюминесценция при акустической кавитации [9], или сонотриболюминесценция, СТЛ [10–12]). Однако интенсивность СТЛ суспензий кристаллов различных веществ, как правило, намного выше интенсивности СЛ их гомогенных растворов или чистых растворителей. Существенно отличаются и сами спектры СЛ и СТЛ. Например, в бензоле, толуоле или ксилоле при многопузырьковой СЛ в спектре регистрируется широкий континуум с максимумом при 450–500 нм не вполне ясной природы. Для СТЛ суспензий в этих углеводородах характерна более интенсивная и четко выраженная флуоресценция аренов с максимумом в области 280–290 нм [11–12].

Данные отличия связаны с различиями между основными механизмами возбуждения люминесценции при воздействии ультразвука на чистые

жидкости и истинные растворы с одной стороны, или суспензии с другой. Излучение света при СЛ обусловлено преимущественно тепловым разогревом в кавитационных пузырьках паров жидкости и растворенных в ней газов [1–4]. В то же время, механизм возникновения яркого свечения во время СТЛ суспензий близок к механизму при триболюминесценции (ТЛ, свечение при разрушении твердотельных веществ [13]), а именно, обусловлен возникновением электрических разрядов во время деформации кристаллов. Кроме того, при СТЛ происходит постоянное измельчение кристаллов и обновление их поверхностей, что ведет к усилению плазмохимических разрядных и кавитационно-пузырьковых процессов. Так, измельченные наноразмерные кристаллы могут проникать в пузырьки и непосредственно участвовать в сонохимических реакциях и пузырьковой сонолюминесценции [14]. На ювенильных поверхностях кристаллов интенсифицируются каталитические, в частности, хемилюминесцентные, реакции разложения жидкостей и растворенных добавок [15]. В результате, при СТЛ возникает гораздо больше, чем в процессе СЛ, продуктов механохимических (по источнику их иницирования) реакций. Они обуславливают и более богатый спектр СТЛ.

Развитие исследований инициируемых ультразвуком механохимических превращений в суспензиях (сонотриболиза) и сопутствующей СТЛ может привести к созданию новых технологий ультразвуковой обработки и модификации жидкостей, в частности, процессов крекинга углеводородов, и люминесцентного контроля над ними. Эти процессы малоизучены. В частности, неизвестны закономерности влияния частоты и мощности ультразвука на СТЛ.

В рамках данных исследований, в настоящей работе проведено сравнительное изучение влияния мощности ультразвука при 22 и 44 кГц и растворенных газов на интенсивность и состав эмиттеров люминесценции при ультразвуковой обработке суспензий неорганических солей лантанидов в п-ксилоле.

Экспериментальная часть

В работе использовали п-ксилол ($\geq 99\%$) Acros organics без дополнительной очистки. Суспензии готовили добавлением в п-ксилол нерастворимых кристаллогидратов $\text{Eu}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Tb}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (99.99%, Lanhit). При рассмотрении ТЛ использовали также кристаллогидрат $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. Инертные (He, Ne, Ar, Kr 99.999%), и молекулярные (N_2 99.99%, O_2 99.5%, C_2H_4 99.95%) газы использовались без дополнительной очистки.

Сонотриболюминесценция возбуждалась в 10 мл п-ксилола содержащего навеску кристаллов 250 мг, в термостатируемом реакторе объемом 25 мл из нержавеющей стали с кварцевым окошком на дне [11]. Ультразвуковую обработку проводили с помощью генератора УЗДН-2Т (22 и 44 кГц) с погружным титановым волноводом с площадью торца $\sim 1 \text{ см}^2$. Плоский торец волновода устанавливался на расстоянии $\sim 1 \text{ мм}$ от дна кюветы при регистрации СТЛ суспензий и от 2 до 5 мм при регистрации сонолюминесценции (та же кювета, 10 мл п-ксилола). Поглощенную акустическую мощность измеряли калориметрическим методом [16]. Насыщение суспензий различными газами производили их барботированием со скоростью до 10 мл/сек. Температура в кювете во время регистрации сонолюминесценции и сонотриболюминесценции поддерживалась с помощью циркуляционного термостата (LOIP LT-105a). Для возбуждения триболюминесценции в атмосфере газов использовали установку, ранее описанную в работах [17–18]. Слой кристаллов (200–250 мг), размещенный на кварцевом плоском дне кюветы, подвергали механическому воздействию с помощью 4-х лопастной мешалки (1000 об/мин), изготовленной из фторопластовой трубки. Во время регистрации спектров ТЛ производился напуск в кювету этилена и инертных газов, а также их смесей. Газ подавался с помощью трубки, подведенной к слою кристаллов со скоростью подачи до 10 мл/сек. Перед проведением измерений проводился напуск газов в течение 5 мин. ТЛ регистрировали при комнатной температуре (295 К).

Спектры многопузырьковой сонолюминесценции и сонотриболюминесценции регистрировали при помощи спектрофлуориметра “Aminco-Bowman J4-8202” или спектрофлуориметра собственного изготовления на базе сканирующего монохроматора МДР-206. Детектором света в обоих случаях служил фотоэлектронный умножитель Hamamatsu

R3896. Спектры ТЛ и флуоресценции регистрировали на спектрофлуориметре Fluorolog-3 (Horiba Jobin Yvon), с детектором света Hamamatsu R928P.

Результаты и их обсуждение

На *рис. 1а* приведены спектры СТЛ, содержащие полосу флуоресценции п-ксилола, во время ультразвуковой обработки (22 и 44 кГц) суспензии сульфата тербия в этом растворителе при одинаковой мощности 15 Вт. Как можно заметить, при частоте ультразвука 44 кГц относительно 22 кГц наблюдается рост интенсивности свечения в ~ 1.5 раза. Такая тенденция увеличения интенсивности свечения с частотой ультразвука наблюдается практически во всем исследованном диапазоне мощностей (*рис. 1б*). В тоже время, при мощности ≥ 25 Вт для 22 кГц увеличение интенсивности СТЛ замедляется и наступает насыщение. Также следует отметить, что порог возникновения люминесценции составил 2–3 Вт для 44 кГц и ~ 5 –6 Вт для 22 кГц.

Как отмечено во введении, СТЛ суспензий возникает в результате разрушения кристаллов и сопутствующих электрических разрядов. По-видимому, наблюдаемая зависимость интенсивности свечения от мощности ультразвука в большой степени связана с амплитудой колебаний ультразвукового волновода и интенсивностью ударных волн, возникающих в результате коллапса пузырьков, которые являются основным источником ускорения частиц и их столкновений в системе [10; 19]. А именно, при низких мощностях ультразвукового воздействия значение амплитуды колебаний небольшое, следовательно, воздействие на кристаллы в суспензии незначительно. Увеличение мощности, соответственно и амплитуды колебаний, приводит к увеличению количества и максимального радиуса кавитационных пузырьков, их последующему интенсивному схлопыванию с генерацией сильных ударных волн, что сопровождается ускорением частиц в суспензии и ростом числа их столкновений между собой, с волноводом и стенками реактора. В тоже время, рост интенсивности свечения п-ксилола прекращается, аналогично сонолюминесценции [20–21], при достижении максимального числа пузырьков при высоких амплитудах колебаний. Отметим, что подобная зависимость интенсивности свечения твердотельных веществ от силы механического воздействия характерна и для триболюминесценции [22].

Интенсивность свечения молекул п-ксилола также зависит от состава газовой среды. Насыщение одноатомными инертными газами приводит к заметному росту интенсивности СТЛ суспензий (*табл. 1*). В тоже время, молекулярные газы, в основном тушащие сонолюминесценцию [2; 23], в некоторых случаях активируют свечение при СТЛ суспензий.

Рис. 1. а) Спектры СТЛ суспензии сульфата тербия в *n*-ксилоле при 22 и 44 кГц, $P=15$ Вт, $T=295$ К, МДР-206, $\Delta\lambda=4$ нм. Для сравнения приведен спектр флуоресценции *n*-ксилола (штриховая линия) зарегистрированного в геометрии «на отражение» при $T=295$ К, $l=1$ см, $\lambda_{\text{exc}}=250$ нм, Fluorolog-3, $\Delta\lambda=2$ нм. б) Зависимость интенсивности свечения молекул *n*-ксилола ($\lambda_{\text{max}}=290$ нм) от мощности во время ультразвукового (22 и 44 кГц) воздействия на суспензии сульфата тербия в *n*-ксилоле, $T=295$ К.

Таблица 1

Относительные интенсивности свечения *n*-ксилола (290 нм) во время ультразвукового (22 кГц) воздействия на суспензии, насыщенные разными газами.

$P=15$ Вт, $T=295$ К

Газ	I_{290} (отн. ед.) ^a
Воздух	1
O ₂	0.6
N ₂	1.7
He	1.5
Ne	1.7
Ar	2
Kr	2.1

^a Интенсивности при 290 нм нормализованы относительно интенсивности на воздухе.

Молекулярный кислород, тушащий большинство видов люминесценции, также подавляет СТЛ

суспензий, тогда как N₂, тушащий СЛ [2–3; 7; 23], напротив, увеличивает интенсивность свечения молекул *n*-ксилола при СТЛ. Для СЛ, с характерным тепловым механизмом свечения [1–4], известен факт уменьшения ее интенсивности при увеличении теплопроводности разных насыщающих газов. При СТЛ суспензий зависимость интенсивности свечения от вида газов имеет в большой степени сходство с обычной триболоминесценцией кристаллов в различной газовой атмосфере [18; 24]. Однако в системе жидкость-твердое тело-газ следует учитывать растворимость газов, которая сильно различается в различных жидкостях. В ароматических углеводородах растворимость газов низкая, порядка $\leq 10^{-3}$ мольных долей [25–26], поэтому действие газов на СТЛ проявляется не столь эффективно, как для системы твердое тело-газ при ТЛ [24]. Например, напуск He, увеличивающий на

порядок интенсивность ТЛ солей лантанидов [24], лишь незначительно усиливает СТЛ суспензий в *n*-ксилоле. Как можно заметить из *табл. 2*, растворимость He в ксилоле невысокая. Продувка гелием, по-видимому, полностью не вытесняет растворенный в системе воздух. В спектре СТЛ, соответственно, регистрируются линии молекулярного азота (*рис. 2*).

Таблица 2

Растворимость газов (в мольных долях x)
в ксилоле при $T = 298$ К и парциальном
давлении газа 101.32 кПа [25–26]

Газ, x					
O ₂	N ₂	He	Ne	Ar	Kr
$1.2 \cdot 10^{-3}$	$0.6 \cdot 10^{-3}$	$0.1 \cdot 10^{-3}$	$0.15 \cdot 10^{-3}$	$1.25 \cdot 10^{-3}$	$3.8 \cdot 10^{-3}$

Рис. 2. Нормализованные спектры СТЛ суспензий сульфата тербия в *p*-ксилоле: 1 – насыщение N₂, 2 – на воздухе, 3 – насыщение He.

СТЛ регистрировали при 44 кГц, $P = 15$ Вт и $T = 295$ К.

МДР-206, $\Delta\lambda = 5$ нм.

Рис. 3. Спектры: а) СТЛ суспензии сульфата тербия в *p*-ксилоле (сплошная линия) и ТЛ сульфата тербия (штриховая линия) в атмосфере Ne в области 560–750 нм; б) СТЛ суспензии сульфата европия в *p*-ксилоле (сплошная линия), насыщение Ar, и ТЛ сульфата европия (штриховая линия) в атмосфере смеси Ar/C₂H₄ в области 415–800 нм. Регистрация СТЛ: $f = 22$ кГц, $P = 15$ Вт, МДР-206, $\Delta\lambda = 5$ нм, Регистрация ТЛ: Fluorolog-3, $\Delta\lambda = 5$ нм. Для всех спектров $T = 295$ К.

Ранее в [27] было показано, что при сонолизе растворов до 0.08% об. бензола в воде, в спектре СЛ регистрируются полосы радикала C_2 , однако увеличение содержания бензола приводит к их подавлению, так как в кавитационном пузырьке концентрация бензола увеличивается. При этом происходит вытеснение ОН радикала – основного окислителя бензола, и его разложение до коротких фрагментов с последующим образованием электронно-возбужденных радикалов C_2 . В случае ультразвукового воздействия на суспензию, высокие скорости столкновений кристаллов в ароматических растворителях приводят к сильной деструкции кристаллов, образованию трещин и генерации разрядов в них, за счет чего может происходить более эффективное разложение органических веществ. При сонотриболизе основную роль играют плазмохимические процессы в разрядах, которые могут способствовать диссоциации молекул растворителя и приводить к образованию соответствующих продуктов разложения.

Заключение

Во время сонотриболюминесценции суспензий переход от частоты 22 кГц к 44 кГц и увеличение мощности ультразвука приводит к росту интенсивности флуоресценции молекул *n*-ксилола в спектре свечения, однако при мощности ≥ 25 Вт для 22 кГц рост интенсивности замедляется и наступает насыщение. Наблюдаемая зависимость интенсивности свечения от частоты и мощности ультразвука связана с увеличением максимального радиуса, числа кавитационных пузырьков и их последующим интенсивным коллапсом с формированием ударных волн, приводящих к увеличению числа их столкновений в системе. В результате столкновений микрочастицы подвергаются деструкции и трещинообразованию с интенсивной электризацией и разрядами с последующим возбуждением молекул *n*-ксилола. Помимо флуоресценции *n*-ксилола, в составе газовой компоненты спектра сонотриболюминесценции суспензий, насыщенных инертными газами, регистрируются линии атомов этих газов, а также регистрируются полосы светоизлучающих продуктов механохимических реакций, имеющих место при сонотриболизе (C_2 и CN радикалы).

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ и Республики Башкортостан в рамках научного проекта №17-42-020200, а также в рамках государственного задания (№АААА-А19-119022290005-5). Спектрофлуориметрические и спектрофотометрические исследования проведены в Центре коллективного пользования «Агидель» при Институте нефтехимии и катализа УФИЦ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ashokkumar M. The characterization of acoustic cavitation bubbles-an overview // *Ultrason. sonochem.* 2011. V. 18. P. 864–872.
2. Rooze J., Rebrov E. V., Schouten J. C., Keurentjes J.T.F. Dissolved gas and ultrasonic cavitation-a review // *Ultrason. sonochem.* 2013. V. 20. P. 1–11.

3. Борисенок В. А. Сонолюминесценция: Эксперименты и модели (обзор) // *Акуст. журн.* 2015. Т. 61. С. 333–360.
4. Suslick K. S., Eddingsaas N. C., Flannigan D. J., Hopkins S. D., Xu H. The chemical history of a bubble // *Acc. Chem. Res.* 2018. V. 51. P. 2169–2178.
5. Beckett M. A., Hua I. Impact of ultrasonic frequency on aqueous sonoluminescence and sonochemistry // *J. Phys. Chem. A*. 2001. V. 105. P. 3796–3802.
6. Lee J., Yasui K., Ashokkumar M., Kentish S.E. Quantification of cavitation activity by sonoluminescence to study the sonocrystallization process under different ultrasound parameters // *Cryst. Growth Des.* 2018. V. 18. P. 5108–5115.
7. Маргулис М. А. Сонолюминесценция // *УФН.* 2000. Т. 170. С. 263–287.
8. Pflieger R., Lejeune M., Noel C., Belmonte T., Nikitenko S.I., Draye, M. Diagnosing the plasma formed during acoustic cavitation in [BEPip][NTf₂] ionic liquid // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2019. V. 21. P. 1183–1189.
9. Eddingsaas N. C. Mechanoluminescence induced by acoustic cavitation. Triboluminescence: Theory, synthesis, and application. Eds. Olawale D. O., Okoli O.O.I., Fontenot R. S., Hollerman W. A. Springer International Publishing, Switzerland. 2016. P. 237–271.
10. Шарипов Г. Л., Абдрахманов А. М., Тухбатуллин А. А. Сонотриболюминесценция суспензий кристаллов соединений трехвалентного тербия // *ПЖТФ.* 2009. Т. 35. №10. С. 25–33.
11. Tukhbatullin A. A., Sharipov G. L., Burangulova N. F., Mustafin A. G. Luminescence of aromatic hydrocarbon molecules in the sonication of terbium sulfate suspensions // *Ultrason. sonochem.* 2019. V. 50. P. 251–254.
12. Tukhbatullin A. A., Sharipov G. L., Burangulova N. F., Scintillation activation of luminescence of terbium sulfate suspensions in aromatic hydrocarbons under sonication // *J. Mol. Liq.* 2019. V. 289. P. 110973.
13. Collins A. L., Camara C. G., Van Cleve E., Putterman S. J. Simultaneous measurement of triboelectrification and triboluminescence of crystalline materials // *Rev. Scient. Instrum.* 2018. V. 89. P. 013901.
14. Sharipov G. L., Gareev B. M., Abdrakhmanov A. M. Spectroscopic measurement of electronic temperature in the bubbles during single- and multibubble sonoluminescence of metal carbonyl solutions and nanodispersed suspensions // *Ultrason. sonochem.* 2019. V. 51. P. 178–181.
15. Толстиков Г. А., Шарипов Г. Л., Волошин И. А., Казаков В. П. Хемиллюминесценция при катализированном поверхностно кристаллических веществ распаде пероксидов как причина кристаллолюминесценции // *Докл. АН СССР.* 1984. Т. 274. №3. С. 658–661.
16. Маргулис И. М., Маргулис М. А. Измерение акустической мощности при исследовании кавитационных процессов // *Акуст. журн.* 2005. Т. 51. С. 802–812.
17. Sharipov G. L., Tukhbatullin A. A., Bagautdinova A. R. Quenching of electronically excited N₂ molecules and Tb³⁺/Eu³⁺ ions by polyatomic sulfur-containing gases upon triboluminescence of inorganic lanthanide salts // *Luminescence.* 2017. V. 32. P. 824–828.
18. Tukhbatullin A. A., Sharipov G. L., Galina A. A. Mechanoluminescence of Ce/Tb inorganic salts in methane-acetylene mixtures with inert gases // *Luminescence.* 2018. V. 33. P. 1180–1184.
19. Eddingsaas N. C., Suslick K. S. Mechanoluminescence: light from sonication of crystal slurries // *Nature.* 2006. V. 444. P. 163.
20. Choi P. K. Acoustic bubbles and sonoluminescence / *Handbook of Ultrasonics and Sonochemistry.* Ed. Ashokkumar M. Springer Science+Business Media, Singapore. 2016. P. 177–205.
21. Kanthale P., Ashokkumar M., Grieser F. Sonoluminescence, sonochemistry (H₂O₂ yield) and bubble dynamics: frequency and power effects // *Ultrason. sonochem.* 2008. V. 15. P. 143–150.
22. Chandra B. P., Chandra V. K., Jha P., Patel R., Shende S. K., Thaker S., Baghel R. N. Fracto-mechanoluminescence

- and mechanics of fracture of solids // J. Lumin. 2012. V. 132. P. 2012–2022
23. Gielen B., Marchal S., Jordens J., Thomassen L.C.J., Braeken L., Van Gerven T. Influence of dissolved gases on sonochemistry and sonoluminescence in a flow reactor // Ultrason. sonochem. 2016. V. 31. P. 463–472.
24. Тухбатуллин А. А., Шарипов Г. Л., Абдрахманов А. М. Механолюминесценция сульфатов тербия и церия в атмосфере благородных газов // Оптика и спектроскопия. 2014. Т. 116. С. 747–750.
25. Byrne J. E., Battino R., Wilhelm E. The solubility of gases in liquids 8. Solubility of He, Ne, Ar, Kr, CO₂, CH₄, CF₄, and SF₆ in o-, m-, and p-xylene at 283 to 313 K // J. Chem. Thermodyn. 1975. V. 7. P. 515–522.
26. Battino R., Rettich T. R., Tominaga T. The Solubility of nitrogen and air in liquids // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1984. V. 13. P. 563–600.
27. Didenko Y. T., McNamara W. B., Suslick K.S. Temperature of multibubble sonoluminescence in water // J. Phys. Chem. A. 1999. V. 103. P. 10783–10788.

Поступила в редакцию 24.09.2019 г.

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2019.4.17

**LUMINESCENCE DURING SONOLYSIS
OF GAS-SATURATED LANTHANIDE SULFATE SUSPENSIONS
IN p-XYLENE UNDER 22 AND 44 kHz**

© A. A. Tukhbatullin*, A. M. Abdrakhmanov, G. L. Sharipov

*Institute of Petrochemistry and Catalysis, Ufa Federal Research Center of RAS
141 Oktyabrya Avenue, 450075 Ufa, Republic of Russia.*

Phone: +7 (347) 284 27 50.

**Email: adiska0501@gmail.com*

The authors of the article showed that the fluorescence intensity of p-xylene in sonotriboluminescence spectrum of lanthanide salt suspensions increases under sonication at a frequency of 44 kHz compared to that of 22 kHz. The luminescence appears at ~2 W under 44 kHz and ~5 W under 22 kHz. The dependence of luminescence intensity on frequency and power of ultrasound is due to an increase in maximum radius, the number of cavitation bubbles, and their subsequent collapse to form shock waves, leading to an increase in the number of their collisions in the system. The microparticles are destructed and cracked due to collisions with subsequent electrization and discharge. This leads to the excitation of p-xylene molecules and lanthanide(III) ions. There is an increase in luminescence intensity during the saturation of suspensions with inert gases and molecular nitrogen. The gas component of a sonotriboluminescence spectrum of the suspensions saturated with inert gases involves their atomic lines (*He, *Ne, *Ar, and *Kr). There are also bands of light-emitting products of mechanochemical reactions (*C₂ and *CH radicals) formed during the sonotribolysis in these gases. The hydrocarbons are decomposed due to plasma-chemical processes in cavitation bubbles and during the electrical discharges in cracks and on the surface of crystals, which are destructed under collisions during the ultrasonic treatment of suspensions.

Keywords: ultrasound, cavitation, suspensions, luminescence, xylene, lanthanides.

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at bulletin_bsu@mail.ru if you need translation of the article.

REFERENCES

1. Ashokkumar M. *Ultrason. sonochem.* 2011. Vol. 18. Pp. 864–872.
2. Rooze J., Rebrov E. V., Schouten J. C., Keurentjes J.T.F. *Ultrason. sonochem.* 2013. Vol. 20. Pp. 1–11.
3. Borisenok V. A. *Akust. zhurn.* 2015. Vol. 61. Pp. 333–360.
4. Suslick K. S., Eddingsaas N. C., Flannigan D. J., Hopkins S. D., Xu H. *Acc. Chem. Res.* 2018. Vol. 51. Pp. 2169–2178.
5. Beckett M. A., Hua I. J. *Phys. Chem. A* 2001. Vol. 105. Pp. 3796–3802.
6. Lee J., Yasui K., Ashokkumar M., Kentish S.E. *Cryst. Growth Des.* 2018. Vol. 18. Pp. 5108–5115.
7. Margulis M. A. *UFN*. 2000. Vol. 170. Pp. 263–287.
8. Pflieger R., Lejeune M., Noel C., Belmonte T., Nikitenko S.I., Draye, M. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2019. Vol. 21. Pp. 1183–1189.
9. Eddingsaas N. C. *Mechanoluminescence induced by acoustic cavitation. Triboluminescence: Theory, synthesis, and application.* Eds. Olawale D. O., Okoli O.O.I., Fontenot R. S., Hollerman W. A. Springer International Publishing, Switzerland. 2016. Pp. 237–271.
10. Sharipov G. L., Abdrakhmanov A. M., Tukhbatullin A. A. *PZhTF*. 2009. Vol. 35. No. 10. Pp. 25–33.
11. Tukhbatullin A. A., Sharipov G. L., Burangulova N. F., Mustafin A. G. *Ultrason. sonochem.* 2019. Vol. 50. Pp. 251–254.
12. Tukhbatullin A. A., Sharipov G. L., Burangulova N. F. *J. Mol. Liq.* 2019. Vol. 289. Pp. 110973.
13. Collins A. L., Camara C. G., Van Cleve E., Putterman S. J. *Rev. Scient. Instrum.* 2018. Vol. 89. Pp. 013901.
14. Sharipov G. L., Gareev B. M., Abdrakhmanov A. M. *Ultrason. sonochem.* 2019. Vol. 51. Pp. 178–181.
15. Tolstikov G. A., Sharipov G. L., Voloshin I. A., Kazakov V. P. *Dokl. AN SSSR*. 1984. Vol. 274. No. 3. Pp. 658–661.
16. Margulis I. M., Margulis M. A. *Akust. zhurn.* 2005. Vol. 51. Pp. 802–812.
17. Sharipov G. L., Tukhbatullin A. A., Bagautdinova A. R. *Luminescence*. 2017. Vol. 32. Pp. 824–828.
18. Tukhbatullin A. A., Sharipov G. L., Galina A. A. *Luminescence*. 2018. Vol. 33. Pp. 1180–1184.
19. Eddingsaas N. C., Suslick K. S. *Nature*. 2006. Vol. 444. Pp. 163.
20. Choi P. K. *Handbook of Ultrasonics and Sonochemistry*. Ed. Ashokkumar M. Singapore: Springer. 2016. Pp. 177–205.
21. Kanthale P., Ashokkumar M., Grieser F. *Ultrason. sonochem.* 2008. Vol. 15. Pp. 143–150.
22. Chandra B. P., Chandra V. K., Jha P., Patel R., Shende S. K., Thaker S., Baghel R. N. *J. Lumin.* 2012. Vol. 132. Pp. 2012–2022.
23. Gielen B., Marchal S., Jordens J., Thomassen L.C.J., Braeken L., Van Gerven T. *Ultrason. sonochem.* 2016. Vol. 31. Pp. 463–472.
24. Tukhbatullin A. A., Sharipov G. L., Abdrakhmanov A. M. *Mekhanolyuminesentsiya sul'fatov terbiya i tseriya v atmosfere blagorodnykh gazov. Optika i spektroskopiya*. 2014. Vol. 116. Pp. 747–750.
25. Byrne J. E., Battino R., Wilhelm E. J. *Chem. Thermodyn.* 1975. Vol. 7. Pp. 515–522.
26. Battino R., Rettich T. R., Tominaga T. J. *Phys. Chem. Ref. Data*. 1984. Vol. 13. Pp. 563–600.
27. Didenko Y. T., McNamara W. B., Suslick K.S. *J. Phys. Chem. A*. 1999. Vol. 103. Pp. 10783–10788.

Received 24.09.2019.