

ОСОБЕННОСТИ ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА В ПОЛЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Г.Н. Фадеев¹

gerfad@mail.ru

В.С. Болдырев¹

boldyrev.v.s@bmstu.ru

Н.А. Богатов^{1, 2}

nikitabogatov@list.ru

А.Л. Николаев³

nicmsu@gmail.com

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Российская Федерация

³ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Исследовано действие низкочастотных колебаний на систему, состоящую из двух биохимически активных компонентов: красителя метиленового голубого и аскорбиновой кислоты. Каждый компонент может обратимо и окисляться, и восстанавливаться. Система позволяет проследить влияние поля низкочастотных колебаний на взаимный окислительно-восстановительный процесс и выявить особенности таких воздействий. Обнаружено, что в отличие от ранее изученных клатратных и хелатных структур в такой системе при введении низкочастотных воздействий окислительно-восстановительные процессы не ускоряются, а замедляются. Наблюдается эффект ингибирования звукохимического процесса в поле низкочастотных воздействий. Эффект оценен количественно

Ключевые слова

Окислительно-восстановительная реакция, низкочастотные воздействия, звукохимические процессы, эффект ингибирования

Поступила 25.03.2019

Принята 12.09.2019

© Автор(ы), 2020

Введение. Особенности энергетики химических реакций при низкочастотных воздействиях приведены в работах [1–4]. Внимание сосредоточено на интервале частот, включающих в себя инфразвуковую (до 17 Гц) и начало звукового (до 50 Гц) диапазона. В работе [3] перечислены отличия влияния низкочастотных колебаний от действия ультразвука.

Экспериментальные исследования позволили установить следующее: звукохимически активной может быть та часть энергии поступающих акустических воздействий, которая поглотилась системой (аналогично закону Гротгуса — Дрейпера [5] в фотохимии). Ввиду этого в энергетических и кинетических расчетах следует учитывать не всю вводимую в рас-

твор акустическую энергию, а лишь ее активную долю, расходуемую на образование ионов, свободных радикалов или перестройку структуры молекул (например, перевод димеров в мономеры и обратно) и других процессов. На этой стадии влияние акустических колебаний является непосредственным и называется эффектом прямого действия. Такая энергия называется химико-акустической энергией E_{x-a} . Ее связь с общей акустической энергией E_a предложено Л.Д. Розенбергом оценивать через константу η_{x-a} , которая, по существу, является КПД звукохимического процесса [6]:

$$E_{x-a} = \eta_{x-a} E_a.$$

При изучении физико-химических процессов принято полагать, что выделяющейся в процессе акустических воздействий энергии достаточно для возбуждения, ионизации и диссоциации молекул воды, газов и веществ с высоким давлением насыщенного пара внутри кавитационного пузырька.

Косвенное действие колебаний осуществляется после перехода в раствор возникших в системе активных частиц. Они реагируют с имеющимися в растворе веществами, сольватируются с молекулами растворителя или переводят их в другое состояние, отличное от первоначального. Для оценки звукохимического превращения М.А. Маргулисом и А.Н. Мальцевым введено понятие о начальном химико-акустическом выходе F_R [7]. Величина F_R равна числу частиц продуктов сонолиза, образовавшихся в результате прямого действия на каждые 100 эВ затраченной химико-акустической энергии и перешедших в раствор (без учета их дальнейших реакций в растворе).

Для учета дальнейших превращений (т. е. косвенного действия) введено понятие F_{R2} — вторичного химико-акустического выхода. Эта величина равна числу частиц, образовавшихся (или исчезнувших) на каждые 100 эВ поглощенной химико-акустической энергии. Для акустического воздействия так же, как и для других видов энергетического действия [8, 9], фундаментальной характеристикой является коэффициент рекомбинации β_R . В случае акустической энергии коэффициент рекомбинации β_R — отношение химико-акустического выхода рекомбинировавших частиц F_{R2} к величине F_R — акустического выхода частиц до рекомбинации:

$$\beta_R = F_{R2} / F_R.$$

Величина β_R зависит от многих факторов: плотности или концентрации энергии; размера области воздействия и ее локализации; числа и концентрации образующихся частиц и состава реакционной среды. Учитывая общий характер коэффициента рекомбинации β_R , его можно использовать для сопоставления акустической энергии с другими видами физического воздействия на исследуемые структуры [10–12]. Воспользуемся этой особенностью коэффициента рекомбинации β_R для оценки результатов работы.

Основной инструмент воздействия акустических полей на физико-химические и биологические системы — кавитация. В результате кавитации плотность энергии и интенсивность акустического поля локально увеличиваются на несколько порядков. Процесс сопровождается сонолизом воды и появлением в системе радикалов H^* , OH^* , а также гидратированного электрона и продуктов их рекомбинации. В основном эти частицы ответственны за сонохимические эффекты акустического воздействия. Возникающие при пульсации кавитационных пузырьков ударные волны и кумулятивные течения обуславливают появление и других физико-химических эффектов. Поступающей извне энергии достаточно (как показали предыдущие результаты исследований) для разрыва слабых химических и водородных связей. Наблюдаемые эффекты не являются резонансными, так как частоты колебания связи на много порядков выше частот акустических колебаний. *Цель работы* — установление конкретного механизма, лежащего в основе наблюдаемых явлений.

Экспериментальная часть. Экспериментально определено влияние акустических воздействий на состояние тиазинового красителя. Спектр водного раствора метиленового голубого (МГ) позволяет одновременно следить за мономерной ($\lambda_m = 615$ нм) и димерной ($\lambda_d = 665$ нм) формами и соотношением оптических плотностей, существующим между ними ($D_m/D_d = 1,43$) в водном растворе.

Статистическую обработку полученных экспериментальных данных проводили с использованием метода точечной оценки среднего, применяемого в вариационной статистике. Оценку достоверности различий выборок осуществляли с помощью t -критерия Стьюдента, основанного на одноименном распределении. В соответствии с ГОСТ Р 50779.22–2005 для подобных исследований доверительная вероятность принята 0,95. Поскольку использован метод прямых многократных измерений, в соответствии с национальным стандартом Государственной системой обеспечения единства измерения (ГСИ) применен ГОСТ Р 8.736–2011 — расчет

среднего квадратичного отклонения от искомой величины. В рамках требований этого стандарта осуществлен учет систематической погрешности измерений (в рассматриваемом случае погрешность спектрофотометра ПЭ-5400). Точность параметра $D \pm 0,005$ определена возможностями прибора — спектрофотометра ПЭ-5400В. Именно указанными стандартами и объясняются разбросы значений параметров, приведенных в табл. 1–3.

Таблица 1

Значения оптической плотности растворов без акустического воздействия и при акустическом воздействии ($\nu = 15$ Гц, $W = 1$ Вт/см², рН = 5,6–5,8)

Время реакции, мин	Мономер		Димер	
	Без акустического воздействия	При акустическом воздействии	Без акустического воздействия	При акустическом воздействии
0	0,859 ± 0,005	0,868 ± 0,005	0,515 ± 0,005	0,520 ± 0,005
5	0,788 ± 0,005	0,807 ± 0,005	0,462 ± 0,005	0,467 ± 0,005
10	0,744 ± 0,005	0,754 ± 0,005	0,437 ± 0,005	0,443 ± 0,005
15	0,718 ± 0,005	0,747 ± 0,005	0,414 ± 0,005	0,434 ± 0,005
20	0,711 ± 0,005	0,739 ± 0,005	0,403 ± 0,005	0,430 ± 0,005
ΔD_{0-20}	0,148 ± 0,005	0,129 ± 0,005	0,112 ± 0,005	0,090 ± 0,005

Таблица 2

Значения констант скорости ($k_R \cdot 10^4, c^{-1}$) реакции восстановления красителя Мг аскорбиновой кислотой для мономера (числитель) и димера (знаменатель)

Частота, Гц	рН	
	3,1	10,2
0	13,80 ± 0,05/15,36 ± 0,05	3,74 ± 0,05/5,17 ± 0,05
7	7,36 ± 0,05/8,29 ± 0,05	1,52 ± 0,05/1,35 ± 0,05
15	5,96 ± 0,05/7,07 ± 0,05	1,06 ± 0,05/0,85 ± 0,05
22	9,14 ± 0,05/9,98 ± 0,05	0,98 ± 0,05/0,84 ± 0,05

Таблица 3

Значения коэффициента рекомбинации реакции восстановления красителя Мг аскорбиновой кислотой для мономера (числитель) и димера (знаменатель)

Частота, Гц	рН	
	3,1	10,2
7	0,533 ± 0,005/0,534 ± 0,005	0,406 ± 0,005/0,261 ± 0,005
15	0,432 ± 0,005/0,460 ± 0,005	0,283 ± 0,005/0,164 ± 0,005
22	0,662 ± 0,005/0,649 ± 0,005	0,262 ± 0,005/0,162 ± 0,005

Влияние акустического низкочастотного воздействия определяли в трех точках исследуемого интервала частоты: 1) 7 Гц (инфразвуковой диапазон); 2) 15 Гц (граница звук–инфразвук); 3) 22 Гц (начало звукового диапазона) при подаче напряжения 5...7 В (соответствует $W = 1...2$ Вт/см²). Экспериментальная установка и ее характеристики подробно описаны в работах [1, 3]. Фиксировалось изменение оптической плотности в течение 20 мин в растворах, подвергавшихся действию акустических колебаний, и в растворах, находившихся вне их действия. Использован однолучевой спектрофотометр ПЭ-5400В со спектральным диапазоном 325...1000 нм и точностью определения оптической плотности $D \pm 0,005$. Равновесие между двумя формами Мг устанавливалось в течение 2 мин, а затем оставалось постоянным. В течение всего времени воздействия колебаний (20 мин) оптическая плотность ни мономерной, ни димерной форм не изменилась.

Разнообразные органические восстановители могут превращать Мг в бесцветную лейкоформу. В качестве восстановителя использована аскорбиновая кислота. Таким образом, в работе мишенью низкочастотного акустического воздействия являлась окислительно-восстановительная система, состоящая из обратимо восстанавливающегося красителя и биологически активной аскорбиновой кислоты, способной обратимо восстанавливаться. Изучаемая окислительно-восстановительная система позволяет проследить влияние низкочастотного акустического поля на окислительно-восстановительный процесс и установить особенности воздействия низкочастотных колебаний.

Исходный раствор, в котором происходил окислительно-восстановительный процесс, готовили следующим образом. Аскорбиновую кислоту массой 0,1 г растворяли в 10 мл воды. Затем 1,5 мл приготовленного раствора вводили в 50 мл водного раствора Мг с оптической плотностью $D = 1,0$. Через заданный временной интервал одновременно определяли оптическую плотность растворов при отсутствии колебаний и в результате их действия. Изменение оптической плотности водных растворов, в которых проходила реакция между красителем Мг и аскорбиновой кислотой, отдельно определяли для мономерной и димерной форм красителя.

Сравнение полученных данных (см. табл. 1) показало, что оптическая плотность мономерной и димерной форм красителя под действием только аскорбиновой кислоты (без акустического воздействия) изменяется сильнее, чем при воздействии на раствор низкочастотных акустических колебаний. Таким образом, в поле низкочастотных акустических воздействий наблюдается тенденция замедления окислительно-восстановительного процесса:

для мономера $\Delta D_{0-20} = 0,148 - 0,129 = 0,019$;

для димера $\Delta D_{0-20} = 0,112 - 0,090 = 0,022$.

В биохимически активных системах акустическое воздействие ускоряло процесс звукохимического превращения компонентов. Здесь наблюдается эффект торможения окислительно-восстановительного процесса в поле низкочастотных акустических воздействий.

Превращение иона красителя Mg^+ в бесцветную лейкоформу связано с присоединением двух атомов водорода. Известно, что на дегидрирование аскорбиновой кислоты влияет присутствие ионов водорода H^+ . Исходная енольная форма аскорбиновой кислоты наиболее устойчива в кислой среде, поэтому исключительно важным представлялось определить влияние кислотности среды на окислительно-восстановительную систему, содержащую краситель Mg и аскорбиновую кислоту. Эксперимент проводился в кислотной ($pH = 3,1$) и щелочной ($pH = 10,2$) средах.

Особенность рассматриваемой системы — полувосстановленная форма красителя Mg и полуокисленная форма аскорбиновой кислоты при их появлении участвуют сразу в нескольких одновременно протекающих процессах. На реакцию прямого превращения красителя в бесцветную лейкоформу накладывается реакция с промежуточным веществом — полуокисленной формой аскорбиновой кислоты, что дает перегиб вверх кинетической кривой на начальном участке. Если это исключить, то реакция имеет первый порядок по красителю, что следует из экспериментальных данных (см. табл. 1). В предположении, что реакция восстановления красителя Mg аскорбиновой кислотой в звуковом поле имеет первый порядок, рассчитаны константы скорости процесса по уравнению

$$k = \ln (D_0 / D_i) / \tau,$$

где D_0, D_i — оптические плотности исходного раствора до и после действия акустического поля.

Наиболее впечатляющим фактом (см. табл. 2) является уменьшение скорости процесса восстановления красителя при акустическом воздействии на раствор. Для оценки наблюдаемого эффекта использована универсальность коэффициента рекомбинации

$$\beta_R = k_{R2} / k_R,$$

т. е. отношения константы k_{R2} скорости процесса в поле низкочастотных колебаний и константы k_R скорости процесса при отсутствии колебаний.

Представленные в табл. 3 значения коэффициента рекомбинации более информативны, так как коэффициент рекомбинации β_R является

фундаментальной характеристикой. Он показывает эффект косвенного действия подаваемых извне акустических воздействий и позволяет оценить величину вызываемых ими сопутствующих процессов.

Обсуждение результатов. При исследовании [1, 2] клатратных соединений, образованных иодом с крахмалом (так называемый синий иод), обнаружен экстремальный характер действия инфразвуковых колебаний. Близкие по составу, но различные по структуре клатраты — амилоидин и амилопектоидин — чувствительны к разным частотам: амилоидин — к инфразвуковым (12...15 Гц), амилопектоидин — к звуковым (20...22 Гц). Результаты экспериментов показывают, что изучаемый окислительно-восстановительный процесс в системе Мг–аскорбиновая кислота не имеет экстремума в интервале использованных частот.

В рассматриваемой системе наблюдается своеобразный эффект торможения звукохимического процесса: при действии низкочастотных колебаний в растворе замедляется процесс восстановления красителя Мг. Можно предположить, что эффект торможения обусловлен изменением лимитирующей промежуточной стадии процесса. Это связано с тем, что не только аскорбиновая кислота способна восстанавливать молекулу Мг, но и краситель может возвращать промежуточную полуокисленную кетонную форму аскорбиновой кислоты — монодегидроаскорбиновую кислоту — обратно в енольную исходную форму. Этот процесс естественным образом связан с изменением концентрации мономерной или димерной формы красителя. О правильности такого предположения свидетельствует влияние кислотности среды на скорость процесса.

Редокс-потенциал биохимически активных систем зависит от кислотности среды (например, [11, 12]). В исследуемой реакции это сказывается на поведении аскорбиновой кислоты — в кислой среде она более сильный восстановитель. Аскорбиновая кислота более устойчива в кислой среде и малоустойчива в щелочной. Во всем интервале исследованных частот скорость процесса в кислой среде (при $\text{pH} = 3$) более высокая, чем в щелочной.

Процесс дегидрирования кислоты катализируется катионами водорода, поэтому кислая среда увеличивает скорость окисления аскорбиновой кислоты. Среда, содержащая избыток протонов, в равной мере способствует звукохимическому превращению обоих компонентов окислительно-восстановительного процесса — красителя и кислоты. В щелочной среде сказывается неустойчивость аскорбиновой кислоты и продуктов ее превращения. Выяснение механизма окислительно-восстановительного процесса является предметом дальнейшего исследования.

В кислой среде и мономер, и димер красителя имеют практически равные значения коэффициентов рекомбинации β_R . Для красителя Мг играет роль особенность строения его димерной формы. Ассоциация форм Мг в димер (в виде структуры типа «сэндвич») возможна при участии Н-связи в трех точках: 1) азота аминогрупп; 2) азота; 3) серы в тиазиновом кольце молекулы. В этих же точках при образовании лейкоформы присоединяется и атом водорода. У димера эти «активные центры» менее доступны, поэтому в щелочной среде преимущество получает мономер как более «открытая» форма реагирующего компонента.

Одной из причин полученных результатов — эффекта торможения — могут быть процессы рекомбинации промежуточных форм красителя (представляющих радикалы-семихиноны [13]) в условиях кавитационных пузырьков при акустическом воздействии [8–10]. Это уменьшает концентрацию активных частиц, участвующих в восстановлении красителя Мг. О вероятности такого процесса свидетельствует значение квантового выхода γ при фотохимическом восстановлении Мг, равное $\gamma = 1,6 \cdot 10^{-4}$ [17]. Небольшое значение квантового выхода указывает на значительную дезактивацию первичных активных центров. В этом случае большую роль играют акустохимические последствия, которые заключаются в следующем.

Если активными центрами являются возбужденные молекулы, то дезактивация включает в себя передачу энергии при столкновении с другими молекулами или излучение этой энергии (сонолюминесценция) [8–10]. Если продукты промежуточных стадий — радикалы, то основная причина дезактивации — рекомбинация этих структур. При этом невозможно исключить эффект обратного процесса (например, превращение мономерной формы в димерную).

Выводы. Полученные результаты показывают, что окислительно-восстановительные системы, подобные представленной, могут быть мишенями при воздействии инфразвукового излучения на биологические объекты. Это обстоятельство является ориентиром при разработке стратегии биохимической защиты от низкочастотного воздействия.

Экспериментально обнаружена окислительно-восстановительная система, состоящая из биологически активных компонентов, в которой под действием внешнего низкочастотного акустического воздействия процессы не ускоряются, а замедляются. Следовательно, такие системы, поглощая энергию акустического воздействия, могут играть роль антидотов от неблагоприятного воздействия низкочастотных колебаний на организм человека.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Фадеев Г.Н., Болдырев В.С., Ермолаева В.И. Биологически активные клатраты амилоиодин и амилопектоиодин в поле низкочастотных акустических воздействий. *ДАН*, 2012, т. 446, № 4, с. 466–470.
- [2] Фадеев Г.Н., Болдырев В.С., Синкевич В.В. Звукохимические превращения хелатных и клатратных структур в поле низкочастотных акустических воздействий. *ДАН*, 2015, т. 462, № 4, с. 426–430. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0869565215160161>
- [3] Болдырев В.С. Действие низкочастотных колебаний на биохимически активные структуры. Дис. ... канд. техн. наук. М., РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2013.
- [4] Болдырев В.С., Ермолаева В.И., Синкевич В.В. и др. Дестабилизация соединений хелатной структуры поливинилпирролидон-иода в поле низкочастотных воздействий. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2017, № 4, с. 90–99. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2017-4-90-99>
- [5] Большой энциклопедический словарь. Химия. М., Большая российская энциклопедия, 2000.
- [6] Розенберг Л.Д. Об оценке кавитационной эффективности акустической энергии. *Акустический журнал*, 1965, т. 11, № 1, с. 121–124.
- [7] Маргулис М.А., Мальцев А.Н. Об оценке энергетического выхода химических реакций, инициированных ультразвуком. I. Химико-акустический выход реакций. *Журнал физической химии*, 1968, т. 42, № 6, с. 1441–1446.
- [8] Маргулис М.А., Маргулис И.М. Механизм звукохимических реакций и сонолюминесценции. *Химия высоких энергий*, 2004, т. 38, № 5, с. 323–333.
- [9] Маргулис М.А., Маргулис И.М. Об условиях выхода звукохимических реакций в кинетическую область. *Журнал физической химии*, 2005, т. 79, № 11, с. 2076–2081.
- [10] Margulis I.M., Margulis M.A. Dependence of the rate of formation of nitrate ions in water on the intensity and frequency of ultrasound waves. *Russ. J. Phys. Chem.*, 2009, vol. 83, iss. 13, pp. 2233–2237. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036024409130093>
- [11] Ершов Ю.А., Хачатурян М.А., Семенова Н.С. и др. Инфразвуковая обработка фармацевтических дисперсных материалов. *Биомедицинская радиоэлектроника*, 2017, № 9, с. 40–43.
- [12] Gorshkova V.M., Savchenko S.V. Potential use of ultrasound for subcutaneous delivery of anesthetics. *Biomed. Eng.*, 2013, vol. 47, iss. 1, pp. 36–38. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10527-013-9329-6>
- [13] Теренин А.Н. Фотоника молекул красителей и родственных органических соединений. Ленинград, Наука, 1967.
- [14] Горшкова В.М. Воздействие низкочастотного ультразвука на биологическую ткань. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2015, № 6, с. 63–67. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2015-6-63-67>
- [15] Горшкова В.М., Двучичанская Н.Н. Влияние низкочастотного ультразвука на лидокаин и гликозаминогликаны. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2017, № 1, с. 103–111. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2017-1-103-111>

[16] Горшкова В.М., Двудичанская Н.Н., Альков С.В. Экспериментальное исследование воздействия низкочастотного ультразвука на гепарин. *Биомедицинская радиоэлектроника*, 2018, № 10, с. 57–60.

DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604136-201810-10>

[17] Краткая химическая энциклопедия. Т. 5. М., Сов. энциклопедия, 1967.

Фадеев Герман Николаевич — канд. хим. наук, д-р пед. наук, доцент, профессор кафедры «Химия» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Болдырев Вениамин Станиславович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Химия» МГТУ им. Н.Э. Баумана, ведущий инженер инжинирингового центра «Автоматика и робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Богатов Никита Алексеевич — аспирант кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); ассистент кафедры физики РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

Николаев Александр Львович — канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (Российская Федерация, 119991, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Фадеев Г.Н., Болдырев В.С., Богатов Н.А. и др. Особенности окислительно-восстановительного процесса в поле низкочастотного воздействия. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2020, № 1 (88), с. 80–92.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2020-1-80-92>

SPECIFICS OF REDUCTION-OXIDATION PROCESSES EXPOSED TO A LOW-FREQUENCY ACOUSTIC FIELD

G.N. Fadeev¹

gerfad@mail.ru

V.S. Boldyrev¹

boldyrev.v.s@bmstu.ru

N.A. Bogatov^{1, 2}

nikitabogatov@list.ru

A.L. Nikolaev³

nicmsu@gmail.com

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The investigation concerned the effects of low-frequency vibrations on a system consisting of two biochemically active components: methylene blue dye and ascorbic acid. Each component can be reversibly oxidized and reduced. This system allows us to trace the effect that a low-frequency vibration field has on the reciprocal reduction-oxidation process and detect specific features of this type of exposure. We discovered that reduction-oxidation processes in such systems do not accelerate but slow down when exposed to low frequencies, unlike those in the previously studied clathrate and chelate structures. We observe an inhibition effect concerning the sonochemical process in a low-frequency acoustic field. We performed a qualitative estimation of the effect

Keywords

Reduction-oxidation reaction, exposure to low sonic frequencies, sonochemical processes, inhibition effect

Received 25.03.2019

Approved 12.09.2019

© Author(s), 2020

REFERENCES

- [1] Fadeev G.N., Boldyrev V.S., Ermolaeva V.I. Biologically active clathrates amiloiodin and amilopektoidin under exposure to low-frequency acoustic field. *Dokl. Biochem. Biophys.*, 2012, vol. 446, iss. 1, pp. 247–250. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1607672912050067>
- [2] Fadeev G.N., Boldyrev V.S., Sinkevich V.V. Sonochemical transformations of chelate and clathrate structures in a low-frequency acoustic field. *Dokl. Phys. Chem.*, 2015, vol. 462, iss. 2, pp. 119–123. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0012501615060019>
- [3] Boldyrev V.S. Deystvie nizkochastotnykh kolebaniy na biokhimicheski aktivnyye struktury. Dis. kand. tekhn. nauk [Effect of low-frequency oscillations on bioactive structures. Cand. Sc. (Eng.) Diss.]. Moscow, MUCTR Publ., 2013 (in Russ.).
- [4] Boldyrev V.S., Ermolaeva V.I., Sinkevich V.V., et al. Destabilization of polyvinyl pyrrolidone-iodine chelate structure in low-frequency field. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2017, no. 4, pp. 90–99 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2017-4-90-99>
- [5] Bol'shoy entsiklopedicheskiy slovar'. Khimiya [Big encyclopedic dictionary. Chemistry]. Moscow, Bol'shaya rossiyskaya entsiklopediya Publ., 2000.
- [6] Rozenberg L.D. On evaluation of cavitation efficiency of acoustical energy. *Akusticheskiy zhurnal*, 1965, vol. 11, no. 1, pp. 121–124 (in Russ.).
- [7] Margulis M.A., Mal'tsev A.N. On evaluation of the energy yield of chemical reactions initiated by ultrasound. I. Chemico-acoustic yield of reactions. *Zhurnal fizicheskoy khimii*, 1968, vol. 42, no. 6, pp. 1441–1446 (in Russ.).
- [8] Margulis M.A., Margulis I.M. Mechanism of sonochemical reactions and sonoluminescence. *High Energy Chem.*, 2004, vol. 38, iss. 5, pp. 285–294. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:HIEC.0000041338.11770.74>

- [9] Margulis M.A., Margulis I.M. On the conditions of the transition of sonochemical reactions into the kinetic region. *Russ. J. Phys. Chem.*, 2005, vol. 79, iss. 11, pp. 1848–1853.
- [10] Margulis I.M., Margulis M.A. Dependence of the rate of formation of nitrate ions in water on the intensity and frequency of ultrasound waves. *Russ. J. Phys. Chem.*, 2009, vol. 83, iss. 13, pp. 2233–2237.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036024409130093>
- [11] Ershov Yu.A., Khachatryan M.A., Semenova N.S., et al. Infrasonic treatment of disperse pharmaceutical preparations. *Biomeditsinskaya radioelektronika* [Biomedical Radioelectronics], 2017, no. 9, pp. 40–43 (in Russ.).
- [12] Gorshkova V.M., Savchenko S.V. Potential use of ultrasound for subcutaneous delivery of anesthetics. *Biomed. Eng.*, 2013, vol. 47, iss. 1, pp. 36–38.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10527-013-9329-6>
- [13] Terenin A.N. *Fotonika molekul krasiteley i rodstvennykh organicheskikh soedineniy* [Photonics of dye molecules and related organic compounds]. Leningrad, Nauka Publ., 1967.
- [14] Gorshkova V.M. Impact of low-frequency ultrasound on biological tissue. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2015, no. 6, pp. 63–67 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2015-6-63-67>
- [15] Gorshkova V.M., Dvulichanskaya N.N. The low-frequency ultrasound influence on lidocain and glycosaminoglycans. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2017, no. 1, pp. 103–111 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2017-1-103-111>
- [16] Gorshkova V.M., Dvulichanskaya N.N., Al'kov S.V. Experimental investigation of the low-frequency ultrasound effect for heparinum. *Biomeditsinskaya radioelektronika* [Biomedical Radioelectronics], 2018, no. 10, pp. 57–60 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604136-201810-10>
- [17] *Kratkaya khimicheskaya entsiklopediya. T. 5* [Brief chemical encyclopedia. Vol. 5]. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1967.

Fadeev G.N. — Cand. Sc. (Eng.), Dr. Sc. (Ped.), Professor, Department of Chemistry, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

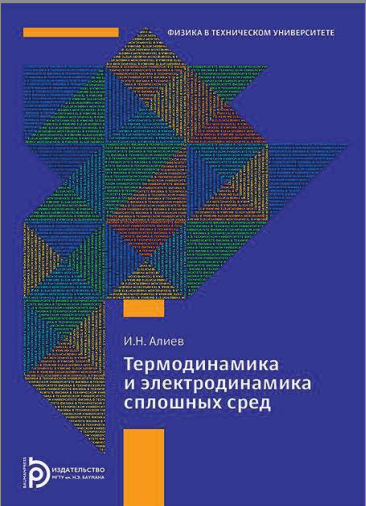
Boldyrev V.S. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Chemistry, Bauman Moscow State Technical University, Leading Engineer, Engineering Center “Automation and Robotics”, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Bogatov N.A. — Post-Graduate Student, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Assistant, Department of Physics, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Nikolaev A.L. — Cand. Sc. (Chem.), Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University (Leninskie gory ul. 1, Moscow, 119991 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Fadeev G.N., Boldyrev V.S., Bogatov N.A., et al. Specifics of reduction-oxidation processes exposed to a low-frequency acoustic field. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2020, no. 1 (88), pp. 80–92 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2020-1-80-92>



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие автора
И.Н. Алиева

**«Термодинамика и электродинамика
сплошных сред»**

Рассмотрены различные аспекты механики поляризованных и проводящих сплошных тел и сред с учетом магнитных, электрических и тепловых эффектов. Изложение ведется в рамках общего подхода, базирующегося на термо- и электромеханическом вариационных принципах, которые позволяют находить условия равновесия, что невозможно с помощью принципов Гиббса и Планка. Полученные результаты применены к теории неравновесных процессов при выводе определяющих соотношений, необходимых для замыкания систем термоэлектромагнитодинамических уравнений. Пособие снабжено большим числом задач, часть из них дополняет соответствующие главы, а часть является кратким изложением проведенных научных исследований.

Содержание учебного пособия соответствует курсу лекций, которые автор читает в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов и аспирантов технических университетов и вузов, преподавателей высшей школы, научных сотрудников, занимающихся техникой и физикой сплошных сред.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
<http://baumanpress.ru>