

Сергей Михайлович Царев родился в 1978 г., окончил в 2001 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Ассистент кафедры “Вычислительная математика и математическая физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Имеет ряд научных работ по численным методам в теории больших упругих деформаций.

S.M. Tsarev (b.1978) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2001. Assistant of “Computational Mathematics and Mathematical Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of some publications on numerical methods for theory of large elastic deformations.

Алексей Владимирович Веретенников родился в 1983 г., окончил в 2005 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры “Вычислительная математика и математическая физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Имеет ряд научных работ, посвященных применению метода конечных элементов для решения задач механики при конечных деформациях.

A.V. Veretennikov (b.1983) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2005. Post-graduate student of “Computational Mathematics and Mathematical Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of some publications on finite element method applications for mechanical problems under finite strain.

ХИМИЯ

УДК (534.23: 541.124) +535.378

Г. Н. Фадеев, В. И. Ермолаева,
А. А. Николаев, А. Л. Николаев,
И. В. Мелихов

МЕХАНИЗМ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МОДЕЛИ БИОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Модулированные акустические колебания способны вызвать у человека отрицательные эмоции и отклонения от нормального состояния. Любое из этих отклонений связано с изменением протекания в организме химических и биохимических процессов. В статье обобщены важнейшие результаты исследований в области акустической химии, выполненных в МГТУ им. Н.Э. Баумана, и изложены новые подходы к развитию работ в этой области, проводимых в настоящее время совместно с сотрудниками химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

В основу данной работы положены результаты исследований, проводимых на кафедре химии МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством Г.Н. Фадеева с начала 1980-х гг. Инициатором этих работ [1, 2] был профессор 2-го Московского медицинского института Л.А. Николаев, а в МВТУ им. Н.Э. Баумана — ректор, действительный член АН СССР профессор Г.А. Николаев и заведующий кафедрой химии заслуженный деятель науки и техники РСФСР профессор В.В. Фролов.

Изучались эффекты, возникающие при взаимодействии звуковых (инфразвуковых, ультразвуковых) волн с веществом. Систематические комплексные исследования позволили выяснить существенные особенности механизма переноса акустической энергии и специфичность ее воздействия на механизмы химических реакций в поле акустических колебаний. Область химии, охватывающую такие объекты изучения, часто называют *звукохимией* [3] или, по нашему мнению, более точно — *акустической химией* [4], а в приложении к биологическим системам — *биоакустической химией* [5, 6].

Известно, что низкочастотные акустические колебания способны вызвать у человека различные отрицательные эмоции. Некоторые наиболее важные из них приведены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние акустических колебаний на организм человека

Характеристика воздействия	Частота f , Гц,			
	2–15	2–10	6–7	5–10
Интенсивность, дБ	95–105	125	90	135
Реакция организма	Замедление зрительной реакции	Неприятные ощущения внутренних органов	Нарушение альфа-ритма головного мозга	Учащенное сердцебиение

Любое из этих отклонений связано с изменением протекания химических и биохимических процессов в организме человека. Нами было высказано предположение, что для каждой химической реакции существует своя собственная резонансная частота, при которой эффект воздействия акустических колебаний становится максимальным. Это предположение было экспериментально проверено и подтверждено на моделях, являющихся ступенями к моделированию более сложных биохимических систем (табл. 2).

Был определен ряд важных особенностей протекания химических процессов в поле акустических колебаний.

- Инфразвуковые колебания меняют состояние сольватированных частиц путем воздействия на их сольватные оболочки.
- В случае окислительно-восстановительных реакций ускорение процессов при акустическом воздействии связано с изменением окислительно-восстановительных потенциалов сопряженных систем.
- Межмолекулярные соединения типа клатратов, состоящие из полимерной молекулы-“хозяина” и низкомолекулярной молекулы-“гостя”, меняют свою структуру под действием акустических

полей в первую очередь в соответствии с поведением их низкомолекулярной составляющей, представляющей в некотором роде микронеоднородность такой системы.

В данной статье изложены новые теоретические и экспериментальные подходы к развитию этой проблемы.

Таблица 2

Резонансные частоты модельных систем

№ п/п	Тип системы	Состав	Резонансная частота, Гц
1	Низкомолекулярные биологически активные вещества [1]	Иод–вода	30
2	Высокополимерная система [2]	Полисахарид крахмал	140
3	Кладратная структура [4]	Крахмал–иод	45
4	Биологически активная структура	Поливиниловый спирт–иод (“синий иод”)	40

Большое внимание уделяется проблеме локализации акустической энергии в полимерных и биополимерных системах на искусственно созданных неоднородностях [7, 8]. Такие неоднородности, введенные в полимерную матрицу, повышают чувствительность содержащих их участков к действию акустических полей (эффект соносенсибилизации). В последнее время такие исследования проводятся на химическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова совместно с кафедрой “Химия” МГТУ им. Н.Э. Баумана

Под повышением чувствительности следует понимать увеличение интенсивности кавитационных и тепловых процессов, а также снижение устойчивости модифицированных участков к механическим и тепловым воздействиям. При этом воздействие акустического поля на биологические объекты должно быть обусловлено совместным действием целого комплекса факторов: механических колебаний тканей, гидродинамических ударов, тепловых эффектов и т.п. Роль каждого из указанных, а также других факторов в суммарном биологическом эффекте ясна далеко не во всех случаях.

Нами установлено [8, 9], что абсолютная величина отклика участка полимерной системы на действие акустического поля модифицированного участка системы (по сравнению с немодифицированным) зависит от природы включений, их массы и распределения по размерам. Изменение размеров включений от 10^{-9} до 10^{-3} м приводит к изменению соотношения интенсивностей факторов, составляющих это увеличение.

При малых интенсивностях и небольших частотах происходит, по всей вероятности, локальный разогрев тканевых элементов. При превышении определенной пороговой интенсивности акустических воздействий начинаются вторичные физико-химические эффекты. Они обусловлены, вероятнее всего, сильным перегревом тканей и возникновением того или иного вида кавитации. Отмечена сложная зависимость между значением акустической энергии и деструктивным эффектом кавитации.

Был предложен [9, 10] механизм разрушения структур тканей под действием акустического поля в присутствии соносенсибилизаторов, образующих гетерофазные включения в биополимерной матрице. Согласно этому механизму в районе гетерофазных включений, локализованных в основном в мембранных структурах, под действием акустического поля средней интенсивности происходит разрушение жизненно важных структурных элементов клетки, что приводит к ее гибели.

Изменением параметров акустического воздействия и вариацией характеристик включений (природы, массы и распределения по размерам) можно регулировать как избирательность, так и глубину воздействия на биополимерную систему. Основными этапами изучения проблемы воздействия акустических полей на модельные биополимерные системы (независимо от предполагаемых областей применения) являются, по нашему мнению, следующие.

1. Выявление закономерностей изменения кавитационной прочности растворов полимеров, биополимерных и полимерных матриц в присутствии гетерогенных модификаторов.
2. Детальное изучение механизмов соносенсибилизации.
3. Нарботка экспериментальной базы данных для количественных оценок основных важнейших параметров процессов.
4. Разработка методологии направленного синтеза гетерогенных включений на моделях, а также на субклеточном, клеточном и органном уровнях.
5. Математическое моделирование процессов фазообразования для условий *in vivo* и *in vitro*.

Экспериментальной задачей на данном этапе работы является выявление закономерностей кавитационных и иных процессов, протекающих в полимерных матрицах под действием акустических полей. В качестве биомоделей выбраны гидрогелевые матрицы, по своей структуре близкие к биологическим объектам (полиакриламидные гели, желатина, агароза, плуроники).

Как трассеры предполагается использовать пептиды, белки, ферменты, клатратные соединения. Гетерогенные включения в матрицу

синтезировались взаимодействием реагентов в условиях встречной диффузии. Таким образом, были получены полимерные матрицы, содержащие в качестве включений: карбонаты кальция, магния и других элементов; гидроксид железа; фосфаты кальция; органические красители. Для подобных систем разрабатывается в настоящее время математическая модель, использующая подходы, развитые в математическом моделировании при рассмотрении химической кристаллизации в пористых средах.

Дальнейшие исследования предполагают расшифровку механизма твердофазной соносенсибилизации полимерных модифицированных систем в акустических полях при различных режимах воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаев Л. А., Фадеев Г. Н. // Докл. АН СССР. – 1984. – Т. 276. – № 3. – С. 638–642.
2. Фролова О. К., Елисеева Н. М., Фадеев Г. Н. Кинетика реакций в поле звуковых колебаний. – М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1988. – 12 с.
3. Моргулис М. А. Основы звукохимии. – М.: Высшая школа, 1984. – 272 с.
4. Фадеев Г. Н., Ермолаева В. И., Фролова О. К., Елисеева Н. М. // Тр. 2-й Всероссийской конференции “Необратимые процессы в природе и технике”. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – С. 163–175.
5. Fadeev G., Ermolaeva V., Modelling the effect of non-lethal weapons // Proceeding of 2-nd European Symposium on Non-Lethal Weapons. – Ettlingen (Germany), May 13–14, 2003.
6. Фадеев Г. Н., Ермолаева В. И. // Вопросы оборонной техники. – 2004. Сер. 16. – Вып. 1–2. – С. 28–34.
7. Patent RF, № 21539. 10.08.2000.
8. Chicherin D. S., Sinani V. A., Melikhov I. V., Plate N. A., Noa O. V., Nikolaev A. L. // Polymer Science, Ser. A. – 2001. – V. 23. – № 1. – P. 22.
9. Nikolaev A. L., Chicherin D. S., Gerasimova G. K., Andronova N. K., Treshchalina E. M., Melikhov I. V. // Doklady Physical Chemistry. – 2003. – V. 390. – № 1. – P. 1.
10. Nikolaev A. L., Chicherin D. S., Melikhov I. V. // Rus. Chem. J. – 2002. – V. XLVI. – № 3. – P. 75.

Статья поступила в редакцию 26.02.2007

Герман Николаевич Фадеев родился в 1940 г., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова. Канд. хим. наук, д-р педагог. наук, заведующий кафедрой “Химия” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ, в том числе 22 монографий. Специализируется в области кинетики процессов в акустических полях.

G.N. Fadeev (b. 1940) graduated from the Lomonosov Moscow State University. Ph. D. (Chemistry), D. Sc. (Pedagogic), head of “Chemistry” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications, including 22 monographs in the field of kinetics of processes in acoustic fields.





Вioletta Ивановна Ермолаева родилась в 1948 г., окончила МХТИ им. Д.И. Менделеева. Канд. техн. наук, зам. заведующего кафедрой “Химия” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области гомогенных и гетерогенных процессов в поле акустических колебаний.

V.I. Yermolaeva (b. 1948) graduated from the Moscow Chemical-Technological Institute n.a. D.I. Mendeleev. Ph. D. (Eng.), deputy head of “Chemistry” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications in the field of homogeneous and heterogeneous processes in acoustic fields.



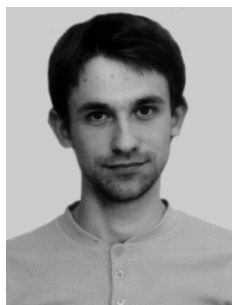
Игорь Витальевич Мелихов родился в 1931 г., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова. Заведующий лабораторией гетерогенных процессов кафедры радиохимии МГУ им. М.В. Ломоносова, чл.-кор. РАН, д-р хим. наук. Автор более 350 научных работ в области кинетики фазовых превращений, топохимических реакций, синтеза и исследования ультрадисперсных твердых веществ и наноструктур.

I.V. Melikhov (b. 1931) graduated from the Lomonosov Moscow State University. D. Sc. (Chemistry), head of laboratory for heterogeneous processes in “Radio-Chemistry” department of the Lomonosov Moscow State University. Corresponding member of the Russian Academy of Sciences. Author of more than 350 publications in the field of phase transitions, topochemical reactions, synthesis and research of ultra-disperse solids and nanostructures.



Александр Львович Николаев родился в 1941 г., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова. Канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник. Автор более 80 научных работ в области биофизических эффектов в акустических полях и кристаллизационных процессов в биологических системах.

A.L. Nikolaev (b. 1941) graduated from the Lomonosov Moscow State University. Ph. D. (Chemistry), leading researcher. Author of more than 80 publications in the field of biophysical effects in acoustic fields and crystallization processes in biological systems.



Александр Александрович Николаев родился в 1980 г., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова. Аспирант кафедры “Химия” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области кристаллизационных процессов в полимерных средах при воздействии акустических колебаний.

A.A. Nikolaev (b. 1980) graduated from the Lomonosov Moscow State University. Post-graduate of “Chemistry” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of crystallization processes in polymer media under influence of acoustic oscillations.