

УДК (534.23:541.124)+535.378

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ АСПЕКТЫ ДЕЙСТВИЯ АКУСТИЧЕСКОГО НЕЛЕТАЛЬНОГО ОРУЖИЯ

Г.Н. Фадеев, В.С. Болдырев, В.Н. Тверитинов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
e-mail: gerfad@mail.ru

Исследовано поведение моделей биологически активных систем в поле действия низкочастотных акустических колебаний инфразвукового и звукового диапазонов от 5 до 45 Гц при мощности 5 Вт/см². Приведены экспериментальные результаты низкочастотных акустических воздействий на образование и разрушение амилоидина и амилопектоидина — клатратных комплексов, образованных иодом с компонентами крахмала.

Ключевые слова: акустические колебания, модели биохимических систем, клатратные комплексы, амилоидин, амилопектоидин, резонансная частота, кинетика образования и дестабилизации клатратов.

MOLECULAR ASPECTS OF IMPACT OF THE ACOUSTIC NON-LETHAL WEAPONS

G.N. Fadeev, V.S. Boldyrev, V.N. Tveritinov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow
e-mail: gerfad@mail.ru

The behavior of models of biologically active systems in the area of impact of low-frequency acoustic oscillations of infrasonic and sonic regions from 5 to 45 Hz with a power of 5 W/cm² is studied. Experimental results of investigations of the low-frequency acoustic impact on formation and destruction of amyloidine and amylopectin-iodine (clathrate complexes created by iodine with amyllum components) are given.

Keywords: acoustic oscillations, models of biochemical systems, clathrate complexes, amyloidine, amylopectin-iodine, resonant frequency, kinetics of formation and destabilization of clathrates.

Работы в области действия низкочастотных колебаний на различные физико-химические и биохимические системы начались в МГТУ им. Н.Э. Баумана после того, как было установлено влияние низкочастотных колебаний на химическую активность низкомолекулярных соединений [1]. Систематические комплексные исследования (см., например, [2, 3]) позволили выявить существенные особенности механизма переноса акустической энергии и специфичность ее воздействия на механизмы химических реакций и поведение биологически активных структур в поле акустических воздействий. Научное направление химии, охватывающее эту область исследований, называют *звукохимией* [4] или, точнее, *акустической химией* [5], а в приложении к

биологически активным системам — *биоакустической химией* [5, 6]. Исследования по биоакустической химии на кафедре химии МГТУ им. Н.Э. Баумана стали более целенаправленными после обсуждения на 2-м Европейском симпозиуме [6] результатов проведенных исследований и публикации сведений о проводимых работах в специальном выпуске российского журнала [7].

Следует иметь в виду, что создание средств нелетального оружия Non-Lethal Weapons и изучение механизмов его действия должно основываться на обобщенном подходе. В него должны быть включены, кроме других не менее важных, такие аспекты, как медицина, физиология, биохимия, окружающая среда. Non-Lethal Weapons — это оружие, предназначенное для вывода из строя личного состава с очень малой вероятностью смертельного исхода или долговременного повреждения. Простой технический подход здесь невозможен, так как эффективность и моральный фактор применения Non-Lethal Weapons зависят от множества условий.

Интегрированный проект Европейской рабочей группы по нелетальному оружию European Working Group on Non-Lethal Weapons (EWG-NLW) инициирует решение важнейших проблем. Это предопределяет необходимость интеграции знаний из различных областей и совместной работы исследователей, осознающих важность данной проблемы. Результаты, приведенные в настоящей статье, направлены на выявление химических и физико-химических причин и определение механизма воздействий низкочастотных акустических колебаний, вызывающих у человека отрицательные эмоции и отклонения от нормального состояния (табл. 1).

Таблица 1

Отрицательное влияние низкочастотных колебаний на организм человека (по данным из обзора [8])

Частота, 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 α -ритма головного мозга	Учащенное сердцебиение

Любая из указанных в табл. 1 реакций организма связана с изменением скорости, а возможно, и механизма протекания химических и биохимических процессов. Поэтому необходимо более глубокое понимание явлений, сопровождающих применение оружия нелетального действия. Нами на основе проведенных экспериментальных исследований высказано следующее предположение: для каждой химической

реакции имеется собственная резонансная частота акустических низкочастотных колебаний, при которой эффект воздействия максимален. Эта гипотеза была экспериментально проверена и подтверждена на моделях, являющихся ступенями к более сложным биохимическим системам (табл. 2). При их исследовании установлен ряд важных особенностей воздействия внешних акустических колебаний и сопровождающих их факторов на протекание химических и физико-химических процессов.

Таблица 2

Резонансные частоты модельных систем

Тип системы	Состав	Резонансная частота, Гц
Низкомолекулярные биологически активные вещества	Продукты гидролитического контрдиспропорционирования иода	25–30
Высокомолекулярная органическая система	Полисахарид крахмал	140
Клатратные структуры	Амилоидин и амилопектоидин	10–20
Иодиол	Поливиниловый спирт–иод	20–25

Воздействие акустических полей на биохимические объекты должно быть обусловлено совместным действием целого комплекса факторов: механических колебаний как самих молекул, так и отдельных частей макромолекул; гидродинамических ударов (вызывающих физико-химические изменения); тепловых эффектов, обусловленных поглощением или выделением энергии в макросистеме и т.п. Роль каждого из этих и других факторов в суммарном эффекте ясна далеко не в каждом случае. В настоящее время можно указать на ряд найденных в экспериментах важных особенностей протекания процессов в поле действия акустических колебаний.

- Инфразвуковые колебания меняют состояние низкомолекулярных соединений путем воздействия на сольватные оболочки ионов и молекул.

- В случае окислительно-восстановительных реакций изменение скорости реакций связано с изменением окислительно-восстановительных потенциалов сопряженных систем.

- Для высокомолекулярных соединений интенсивность отклика полимерной системы связано с размерами ее структурированных участков.

- Межмолекулярные соединения типа клатратов изменяют свою структуру под действием акустических полей, в первую очередь, в соответствии с состоянием их низкомолекулярной составляющей.

Однако в случае биологически активных структур не ясно, какие их особенности ответственны за изменение состояния в поле низкочастотных акустических колебаний. Для более детального экспериментального изучения в качестве модельной взята система иод–крахмал. Этот выбор обусловлен следующими причинами.

1. Амилоидин с 1940–1941 гг. известен как активный медицинский препарат [9] широкого применения.

2. Низкочастотные колебания оказывают на эти соединения, как и на биохимические системы организма человека, отрицательное воздействие — комплексы дестабилизируются.

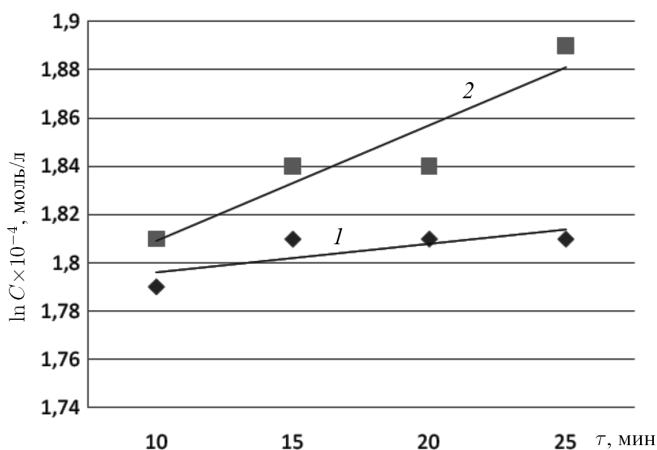
3. Комплексы амилоидин и амилопектоидин построены по типу клатратов, и их можно рассматривать как модели биокатализаторов, где коферментом представляется иод, а апоферментом — гомополисахариды, составляющие крахмал: амилопектин и амилоза.

4. Особенности исследуемой системы позволяют одновременно наблюдать за двумя одинаковыми по составу, но различающимися по структуре соединениями, образованными иодом, соответственно, с амилозой и амилопектином.

Реакции клатратов на внешние воздействия оценивали по оптическим спектрам, различающимся в видимой области. Иод при внедрении внутрь двойной спирали амилозы дает клатратный комплекс сине-фиолетового цвета с максимумом поглощения на длине волны 620–680 нм. Измерения оптической плотности проводили с использованием фильтра на длине волны $\lambda = 670$ нм. Разветвленная структура амилопектина образует сферолит шарообразной формы и при адсорбции иода возникает комплекс красно-фиолетового цвета с максимумом поглощения при 520–555 нм. Оптическую плотность раствора амилопектоидина определяли с фильтром на длине волны $\lambda = 540$ нм.

Экспериментально найдено (рисунок), что в поле акустических воздействий равновесие в растворах при образовании клатратов устанавливается в течение 10 мин. Для исследуемых соединений (амилоидина и амилопектоидина) определена экстремальная зависимость изменения оптической плотности от частоты внешнего воздействия и установлены частоты 10–20 Гц, вызывающие максимальное изменение оптической плотности водных растворов амилоидина и амилопектоидина.

Известно, что при нагревании иод-крахмальных комплексов их окраска исчезает, но при охлаждении появляется вновь. В поле акустических колебаний, в отличие от действия температурного фактора, окраска растворов исчезает необратимо и после прекращения воздействий цвет клатратов не восстанавливается. Экспериментально определено, что процессы образования и дестабилизации амилоидина и



Зависимости установления равновесия процесса образования клатратных комплексов амилоидина (1) и амилопектоидина (2) в поле действия внешних акустических колебаний с частотой 30 Гц при подаваемой электрической мощности 5 Вт/см²:

измерения на длине волны 540 нм (1) и 670 нм (2)

амилопектоидина в поле действия низкочастотных акустических колебаний отличаются по своим кинетическим характеристикам и зависят от порядка смешения их составляющих (табл. 3 и 4).

Анализ значений констант скоростей (табл. 3 и 4) показывает, что в изучаемой микрогетерогенной системе во время действия акустических колебаний имеет место смена режима процесса, сопровождающаяся изменением соотношения констант скоростей. Крахмал, прибавляемый к раствору иода, образует комплексы амилоидин и амилопектоидин, дестабилизация которых во всем исследованном интервале частот подчиняется кинетическому уравнению 1-го порядка. Константы скорости дестабилизации амилоидина и в инфразвуковом, и в звуковом диапазонах выше (табл. 3) констант скоростей разрушения амилопектоидина.

Кинетика дестабилизации клатратов, образованных прибавлением иода к избытку крахмала, иная (табл. 4). Процесс в инфразвуковом диапазоне частот (5–15 Гц) следует кинетическому уравнению 2-го порядка. В звуковой области, начиная с 20 Гц, скорости дестабилизации и амилоидина и амилопектоидина начинают соответствовать кинетическому уравнению 1-го порядка. По мере увеличения частоты воздействия, константы скорости дестабилизации амилопектоидина и амилоидина становятся равными, а при 45 Гц даже больше, чем константа скорости дестабилизации амилоидина (табл. 4). Кинетический порядок реакции дестабилизации амилопектоидина, оставаясь

Константы скорости дестабилизации k_I ($I_2 + (C_6H_{10}O_5)_n$) клатратных комплексов иод–крахмал, образованных при последовательности смешения $I_2 + (C_6H_{10}O_5)_n$

Частота, Гц	Константа скорости $k_I \cdot 10^4, c^{-1}$	
	Амилопектоиодин ($\lambda = 540$ нм)	Амилоиодин ($\lambda = 670$ нм)
5	2,7	3,3
7	2,4	3,1
10	2,2	3,5
15	2,4	3,3
25	2,2	3,4
45	4	7,2
Среднее значение в диапазоне частот 5–25 Гц	$2,4 \pm 0,3$	$3,3 \pm 0,2$
Порядок реакции n	$1,1 \pm 0,2$	$1,3 \pm 0,2$

Таблица 4

Константы скоростей и порядок процесса дестабилизации клатратных комплексов иод–крахмал, образованных при последовательности смешения $(C_6H_{10}O_5)_n + I_2$

Частота, Гц	Константа скорости $k_{II} \cdot 10^4, л \cdot моль^{-1} \cdot c^{-1}$	
	Амилопектоиодин ($\lambda = 540$ нм)	Амилоиодин ($\lambda = 670$ нм)
5	0,88	1,34
7	0,93	1,65
10	0,87	1,65
Среднее значение в диапазоне частот 5–15 Гц	$0,9 \pm 0,2$	$1,6 \pm 0,2$
Порядок реакции	$1,9 \pm 0,2$	$2,3 \pm 0,2$

	Константа скорости $k_I \cdot 10^4, c^{-1}$	
20	1,1	1,2
35	0,88	0,89
45	0,88	0,66
Среднее значение в диапазоне частот 20–45 Гц	$0,95 \pm 0,2$	$0,95 \pm 0,2$
Порядок реакции	$1,3 \pm 0,2$	$0,8 \pm 0,2$

первым, по своей величине превышает порядок дестабилизации амилоиодина.

Обсуждение результатов. В первую очередь важно отметить, что на процесс дестабилизации влияет коллоидная природа структуры вод-

ных растворов крахмала: порядок смешения компонентов клатратных соединений (иода и крахмала) определяет кинетику процесса дестабилизации образующихся комплексов. Для понимания механизма действия низкочастотных акустических воздействий на биологически активные клатратные комплексы амилоидин и амилопектоидин необходимо рассмотреть структуру компонентов, составляющих крахмал: амилозы (20 масс. %) и амилопектина (80 масс. %). В настоящее время наиболее последовательной признается теория строения крахмала по Мейеру, основанная на химическом различии компонентов крахмала. Мы будем придерживаться основных ее положений и выводов.

В противоположность прежним представлениям о структуре молекулы амилопектина как центральной цепи с боковыми ветвями теория Мейера предполагает существование в крахмале сильно разветвленной трехмерной структуры амилопектина и линейной, скрученной в двойную спираль, амилозы. Рентгенография крахмала с иодом показала [10], что иод располагается внутри спиральной структуры амилозы и вытянут в цепочку. Линейная структура амилозы способна к соединению с другими молекулами амилозы и амилопектина за счет образования водородных мостиков между гидроксилами соседних молекул. В результате такого взаимодействия образуются мицеллы.

Кристаллоподобные мицеллы амилозы располагаются в аморфной области, образованной разветвленными цепями амилопектина, которые заключают кристаллиты амилозы в сетчатую трехмерную структуру. Связи, образующие трехмерную сеть, являются связями вторичной валентности, идентичными связям, образующим квазикристаллическую решетку амилозы. Таким образом, спиральная структура амилозы находится в двух валентных состояниях.

Одно — внешнее насыщение молекулярных сил — создается наличием Н-мостиков и групп -ОН других молекул. Это приводит к образованию мицелл. Другое валентное состояние определяется внутренней структурой спирали и является внутренним молекулярным насыщением. Таким образом, особенности мицеллярной структуры комплексов амилоидина и амилопектоидина определяются особенностями внутреннего строения компонентов крахмала и объясняются различными способностями амилозы и амилопектина взаимодействовать с иодом. Рентгенограммы показывают, что не только комплекс с иодом, но и сухая и влажная амилоза обладают спиральной структурой. Для целей проводимого исследования особенно важно отметить окисление альдегидных групп крахмала солями иодистых кислот (в особенности йодной): как установлено в [1], в поле низкочастотных акустических колебаний усиливается процесс окислительного диспропорционирования иода.

Рентгенографическими методами определено, что поведение отдельных звеньев цепей крахмала может отличаться от поведения всей цепи или даже отдельных ее участков; так, отдельные звенья могут быть расположены хаотически, а участки цепей остаются ориентированными. Рентгенограммы показывают [11] концентрические слои, составленные из кристаллитов размером не более 1 мкм (10^{-6} м). Эти слои представляют собой радиально расположенные мицеллы. Цепи главных валентностей крахмала в отдельных местах упорядочены друг с другом путем соединения либо Н-связями, либо радикалами фосфорной кислоты. Во всех образцах обнаружена кристаллизационная вода, удаление которой делает рентгенограмму нечеткой и плохо идентифицируемой.

Кроме углеводной части, в крахмалах содержится небольшое количество фосфатных остатков, азотистых и других минеральных веществ и жирных кислот. В картофельном крахмале фосфора содержится гораздо больше в амилопектиновой фракции, чем в амилозной. Предполагается, что амилопектин содержит остатки фосфорной кислоты, связанной у 6-го гидроксила в виде фосфатного эфирного мостика.

При образовании коллоидных частиц ядра мицеллы в обоих случаях одинаковы: при введении “гостя” (иода) в структуру “хозяина” (крахмала) и при добавлении наоборот “хозяина” (крахмала) в раствор иода (“гостя”). С большой долей вероятности можно утверждать, что различие в этих двух случаях состоит в характере адсорбционного слоя.

Когда в избытке находится крахмал, то под действием акустических колебаний и связанных с ними факторов, разрушение клатратного комплекса идет по общему 1-му порядку во всем исследованном интервале частот (табл. 3). Если же адсорбционный слой состоит из иода, то колебания усиливают его гидролиз. В результате гидролиза в растворе появляется целый набор разнозаряженных ионов. При этом оптическая плотность раствора падает. При возрастании частоты происходит смена кинетического режима. При действии инфразвуковых колебаний до 20 Гц процесс дестабилизации клатратов подчиняется кинетической зависимости 2-го порядка. При переходе к звуковому диапазону частот 25–45 Гц процесс начинает соответствовать 1-му кинетическому порядку. Если судить по значениям констант скоростей (табл. 3 и 4), то в изучаемой микрогетерогенной системе во время действия акустических колебаний имеют место три режима процесса.

Рассмотрим дестабилизацию комплексов, созданных прибавлением крахмала к раствору иода (табл. 3). При частотах 5–10 Гц имеет место диффузионный режим. Характер процесса определяется влиянием больших ($A = 2,0\text{--}2,2\text{ мм}$) значений амплитуды колебаний.

Кинетический порядок дестабилизации всегда первый, а константы скорости для амилоиодина выше констант скорости дестабилизации амилопектоиодина.

Энергия активации адсорбции иода на амилозе $E_{\text{акт}} = 44 \pm 2$ кДж/моль выше энергии активации адсорбции иода на амилопектине ($E_{\text{акт}} = 29 \pm 2$ кДж/моль). Казалось бы, большая энергия адсорбции иода на амилозе должна способствовать стабилизации амилоиодина в поле акустических воздействий, однако этого не происходит. Константы скорости процесса для амилоиодина больше (табл. 3), чем для амилопектоиодина, а энергия активации дестабилизации амилоиодина $E_{\text{акт АЛ}} = 31 \pm 2$ кДж/моль меньше чем для амилопектоиодина ($E_{\text{акт АП}} = 41 \pm 2$ кДж/моль). По значению адсорбции должен быть прочнее амилоиодин, а по энергии дестабилизации и константам скоростей в инфразвуковой области он разрушается легче. Возникает некоторый казус: иод на амилозе адсорбируется прочнее, а комплекс амилоиодин дестабилизируется легче, чем амилопектоиодин. Напрашивается вывод, что основное значение для поведения амилоиодина имеет не сама по себе адсорбция иода, а его состояние в исследуемых клатратах.

На основании анализа количественного поглощения иода установлено, что одна молекула иода приходится на шесть гликозидных остатков, которые закручены в спираль, т.е. одна молекула иода приходится на один виток спирали. Шаг спирали составляет 0,75–0,8 нм. Внешний диаметр спирали 1,3 нм. Молекулы иода в двойной спирали амилозы испытывают сильное влияние межмолекулярных сил и полярных групп -ОН. В результате этого межатомная связь в молекуле иода с первоначальной длины 0,267 нм заметно увеличивается и в комплексе иод–амилаза становится равной 0,306 нм. Это значение едино для всех атомов иода. Цепочки таким образом “атомизированных” молекул иода в зависимости от своей длины (т.е. степени полимеризации n в клатрате) придают [12] комплексам разный цвет (табл. 5)

Таблица 5

Влияние степени полимеризации n в клатрате $\text{I}_2 + (\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ на его характеристики

Характеристика	Степень полимеризации n		
	≥ 45	35–40	≤ 12
Цвет клатрата	Синий	Пурпурный	Бесцветный
Число витков спирали амилозы	≥ 6	4,5–5	$\leq 1,5–2$

Состояние атомизированных молекул иода внутри спирали амилоиодина настолько чувствительно к внешним акустическим воздействиям, что они быстрее, чем иод в амилопектоиодине, откликаются

на эти воздействия. Акустические колебания и сопровождающие эти колебания факторы приводят к изменению состояния амилоидина и уменьшению длины цепочек клатратов вплоть до обесцвечивания комплекса.

При этом не обязательно должен иметь место разрыв цепочек из атомов иода. Цвет может измениться в результате изгиба или растяжения витков спирали амилозы, при котором изменится соотношение 1:6 молекул иода и витков спирали. Можно предположить, что цепочечная структура иода внутри спирали амилозы делает его более чувствительным к внешним воздействиям, более подвижным и более активным.

Значительный интерес представляют результаты, полученные по второму варианту смешения — при прибавлении водного раствора иода к раствору крахмала. Здесь при изменении частоты подаваемых колебаний прослеживается смена кинетических условий протекания процесса дестабилизации клатратов иод–крахмал. При частотах от 5 до 10 Гц, процесс протекает в диффузионном режиме и определяющим является влияние амплитуды внешних акустических низкочастотных колебаний. При этом процесс дестабилизации комплексов подчиняется кинетическому уравнению 2-го порядка, а в случае амилоидина имеет несколько большее значение $n_{\text{АД}}$ ($2,3 \pm 0,2$) по сравнению с процессом дестабилизации амилопектоидина ($n_{\text{АП}} = 1,9 \pm 0,2$).

В диапазоне звуковых частот выше 20 Гц кинетический порядок дестабилизации комплексов резко меняется. В интервале частот от 20 до 45 Гц процесс описывается кинетическим уравнением уже не 2-го, а 1-го порядка. При этом меняется соотношение констант скоростей дестабилизации амилоидина и амилопектоидина.

При низких частотах дестабилизация амилоидина происходила неизменно быстрее. Однако при 35 Гц значения констант процесса дестабилизации амилоидина и амилопектоидина выравниваются (см. табл. 4), а при 40–45 Гц скорость дестабилизации амилопектоидина становится больше. Порядок реакции (при общем следовании кинетическому уравнению 1-го порядка) для амилопектоидина становится равным $n_{\text{АП}} = 1,3 \pm 0,2$, т.е. выше, чем значение для амилоидина $n_{\text{АД}} = 0,8 \pm 0,2$.

Результаты проведенного исследования можно рассматривать как шаг к пониманию механизма воздействия звукового нелетального оружия Non-Lethal Weapons. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют об особенностях в различном поведении комплексов амилоидина и амилопектоидина в поле действия низких акустических частот, соответствующих приведенным в табл. 1. Воздействие

низкочастотных акустических колебаний позволяет изучать поведение сложных комплексов, имеющих признаки биологически активных систем, в поле действия Non-Lethal Weapons.

Выводы. 1. Амилоиодин и амилопектоиодин в результате действия низкочастотных акустических колебаний и сопровождающих их факторов необратимо дестабилизируются и их цвет не восстанавливается.

2. Определены резонансные частоты, которые оказывают максимальное воздействие на клатратные комплексы амилоиодин и амилопектоиодин.

3. Обнаружено влияние природы компонентов крахмала на поведение клатратов в поле низкочастотных акустических воздействий.

4. Экспериментально найдено, что основные параметры процесса дестабилизации клатратных комплексов амилоиодина и амилопектоиодина заметно различаются.

5. Более активное поведение амилоиодина определяется состоянием иода в амилозе, делающим амилоиодин более чувствительным к внешним низкочастотным воздействиям.

Авторы благодарны профессору МГТУ им. Н.Э. Баумана В.В. Селиванову за интерес к работе и плодотворное обсуждение ее результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаев Л. А., Фадеев Г. Н. Действие акустических колебаний на окислительно-восстановительное диспропорционирование иода в растворе // Доклады АН СССР. – 1984. – Т. 256. – С. 638–642.
2. Фадеев Г. Н., Елисеева Н. М., Фролова О. К. Действие колебаний низкой частоты на химические системы // Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана. – 1984. № 416. – С. 24–30.
3. Фролова О. К., Елисеева Н. М., Фадеев Г. Н. // Кинетика реакций в поле звуковых колебаний // Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1988. – 12 с.
4. Маргулис М. А. Основы звукохимии. – М.: Высш. шк., 1984. – 272 с.
5. Фадеев Г. Н., Ермолаева В. И., Фролова О. К., Елисеева Н. М. // Труды Второй Всероссийской конференции “Необратимые процессы в природе и технике”. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – С. 163–175.
6. Fadeev G., Ermolaeva V. Modelling the effect of non-lethal weapons // Proceeding of 2-nd European Symposiums on Non-Lethal Weapons. – Ettlingen, Germany. May 13–14, 2003.
7. Фадеев Г. Н., Ермолаева В. И. Моделирование действия нелетального оружия // Вопр. оборон. техн. – 2004. – Сер. 16, № 1–2. – С. 28.
8. Диментберг Ф. М., Фролов К. В. Вибрация в технике и человек. – М.: Знание, 1987. – 60 с.
9. Мохнач В. О. Синий иод. – СПб.: Наука, 1994. – С. 145–157.
10. Google. ANCHEM.RU. Российский химико-аналитический портал.
11. <http://www.sev-chem.narod.ru/spravochnik/kрахмал.htm>
12. Рогов И. А., Антипова И. В., Дунченин М. И. Химия пищи. – М.: Колосс, 2007. – 517 с.

Статья поступила в редакцию 15.05.2012