

О ФИЗИЧЕСКИХ ОСНОВАХ ОЦЕНКИ ХИМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКА

Л. А. Сульби

1. При получении медицинских аэрозолей с помощью ультразвука [1, 2] необходимо знать, какие химические превращения медикаментов могут иметь место в процессе распыления. Соответствующими экспериментами не удалось обнаружить существенных изменений структуры и свойств лекарств после обработки их в звуковом поле ([1], стр. 84), хотя, например, в литературе [3—13] описаны многочисленные химические реакции, вызываемые ультразвуком. Имея еще в виду, что диспергирование требует заметной интенсивности ультразвука, достигаемой фокусирующими системами, дальнейшее исследование звукохимического эффекта является актуальным и представляет интерес для развития теории и практических применений. Не касаясь химической специфики различных звукохимических реакций [11—13], рассмотрим в настоящей работе их общие физические закономерности с точки зрения закона сохранения энергии, продолжая тем самым выполненные нами первоначальные исследования [14, 15].

2. Для критического анализа возьмем в качестве примера работы [3, 4] и начнем с исследования однородного звукового поля в воде при частоте $f=2$ Мгц. Исходя из ряда значений интенсивности ультразвука, достигаемых современными техническими средствами, соответственно вычислим:

1) величину средней плотности энергии в бегущей волне:

$$E = \frac{I}{v} \text{ (дж/см}^3\text{)},$$

где I — интенсивность (вт/см^2) и v — скорость (см/сек) звука;

2) повышение температуры dt , вызывающее увеличение средней плотности тепловой энергии dQ (дж/см^3) на величину, равную E :

$$dt = \frac{dQ}{c\rho}$$

где c — удельная теплоемкость $\left(\frac{\text{дж}}{\text{г} \cdot \text{град}}\right)$ и ρ — плотность среды $(\text{г}/\text{см}^3)$;

3) амплитуду звукового давления: $P = \frac{1}{981} \sqrt{20\rho v I}$ (ат);

4) амплитуду ускорения частиц среды:

$$V = 2\pi f \sqrt{\frac{2I}{\rho v}} \cdot 10^7 \text{ (см/сек}^2\text{)}.$$

Значения вычисленных величин приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

$I \left(\frac{\text{вт}}{\text{см}^2}\right)$	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5
$E \left(\frac{\text{дж}}{\text{см}^3}\right)$	$0,67 \cdot 10^{-5}$	$0,67 \cdot 10^{-4}$	$0,67 \cdot 10^{-3}$	$0,67 \cdot 10^{-2}$	$0,67 \cdot 10^{-1}$	0,67
$dt \text{ (}^\circ\text{C)}$	$0,16 \cdot 10^{-5}$	$0,16 \cdot 10^{-4}$	$0,16 \cdot 10^{-3}$	$0,16 \cdot 10^{-2}$	$0,16 \cdot 10^{-1}$	0,16
$P \text{ (атм)}$	1,7	5,5	17	55	170	550
$V \left(\frac{\text{см}}{\text{сек}^2}\right)$	$1,5 \cdot 10^7$	$4,6 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^8$	$4,6 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^9$	$4,6 \cdot 10^9$

Данные таблицы 1 свидетельствуют о следующем.

а) По сравнению с нагреванием увеличение средней плотности энергии среды даже при сверхвысоких интенсивностях звука оказывается весьма незначительным. Величина E часто переоценивается ([6], стр. 407—408).

б) Если среднюю плотность энергии E однородного звукового поля считать основным фактором химической активации, такое поле неспособно вызывать глубокие химические превращения в стойких соединениях.

в) Эффективное значение звукового давления $P_{\text{эфф}} \frac{P}{\sqrt{2}}$ в наших примерах достигает максимально 400 атм, тогда как в обыкновенных ультразвуковых установках для распыления жидкостей оно не превосходит 10—20 атм. Постоянное давление такого же порядка, как правило, лишь в ничтожной мере деформирует молекулы и вместе с тем мало изменяет их реакционную способность [16—18].

Переменное звуковое давление периодически повышает и понижает температуру среды при адиабатическом сжатии и разрежении, но лишь в пределах 1°C даже при очень высоких интенсивностях звука ([6], стр. 93).

г) Ускорения, сообщаемые частицам среды ультразвуком, в общем весьма велики, но они оказываются совершенно ничтожными по сравнению, например, с ускорениями, имеющими место при столкновениях молекул газа в нормальных условиях за счет теплового движения.

Переменное звуковое давление и ускорение частиц среды, с точки зрения звукохимического эффекта, могут ускорять гетерогенные реакции главным образом через перемешивание, диспергирование и др. процессы.

Для дальнейшего изучения нашей проблемы целесообразно более детально проанализировать вопрос о поглощении звука и локализации энергии.

3. Общеизвестный коэффициент суммарного поглощения звука в виде показателя степени не позволяет составить корректного детального баланса энергии. Для устранения этого недостатка нами был предложен новый метод определения поглощения звука по трансформациям энергии [19].

Например, при проходящем потоке звука в цилиндрическом объеме среды поглощение по новому методу вычисляется формулой:

$$I_1 = I_0 \left(1 - \sum_1^n K_i\right),$$

где I_0 — интенсивность падающего и I_1 — интенсивность прошедшего звукового потока.

Следовательно, мы заменили экспоненциальную функцию $e^{-2\alpha x}$ рядом $1 - \sum_1^n K_i$, члены которого K_i выражают:

1) рассеяние (псевдопоглощение) звуковой энергии [3, 6, 20], где $K_1 = K_p$ определяет рассеянную часть интенсивности, а $K_2 = K_m$ — уменьшение интенсивности за счет трансформации волн (например, продольные волны могут трансформироваться в поперечные и т. д.);

2) остальные K_i выражают трансформацию звуковой энергии:

а) в энергию механического действия — течения [21, 22], диспергирования, распыления и т. д. — $K_3 = K_m$ (в твердых телах, может быть $K_3 = 0$);

б) в теплоту (нагревание среды) [23, 24] — $K_4 = K_n$;

в) в энергию, затрачиваемую на структурные изменения вещества (химические превращения и т. п.) — $K_5 = K_x$;

г) в энергию, затрачиваемую на электрические явления — $K_6 = K_э$;

д) в энергию, затрачиваемую на оптические явления [25—27] — $K_7 = K_о$ и т. д.

В общем каждый член K_i является функцией нескольких переменных (структуры вещества, частоты звука, температуры и т. д.), значение которого в конкретных условиях можно вычис-

лить на основе молекулярной акустики, квантовой механики и химии, уточняя полученные данные экспериментально. Соответственно системе единиц СИ, K_i следует определить на отрезке (при толщине слоя среды) 1 м для составления таблиц коэффициентов поглощения звука.

K_i позволяют с желаемой точностью согласовать эксперименты с теорией, открывая возможности для исправлений, дополнений и развития теории.

Нахождение системы функций K_i для разных веществ, по нашему мнению, является более плодотворным, чем трудоемкие попытки применения старого коэффициента поглощения, усложненного многочисленными дополнениями в рамках релаксационной теории [28, 29].

С точки зрения квантовой акустики, K_n , K_x , K_ε и K_o выражают взаимодействие между звуковыми квантами (фононами) и электронами или ядрами атомов.

Для распыления жидкостей применяются частоты звука порядка 10^6 гц и, следовательно, энергия звуковых квантов в данном случае в миллионы раз меньше, чем у квантов инфракрасного излучения. Химический эффект звуковых фононов возможно оценить на основе фото- и радиационной химии.

При звукохимических реакциях, сопровождаемых поглощением энергии (звука), K_x определяет количество выделяющегося продукта реакции. Охват звукохимического эффекта таким способом в первом приближении отражает коэффициент суммарного поглощения звука

$$K_c = K_m + K_n + K_x + K_\varepsilon + K_o +$$

или общеизвестного α .

Если суммарное поглощение звука небольшое, энергетические возможности возникновения звукохимических реакций ограничены. Только максимумы поглощения указывают на опасные интервалы частот для распада медикаментов при распылении.

Во избежание нежелательных последствий необходимы изменения поглощения звука в лекарствах на частотах, применяемых для получения аэрозолей.

В отношении распада самыми чувствительными являются большие сложные молекулы со слабыми химическими связями, клетки, микроорганизмы и т. п. [1—9, 30—34]. Опасность образования вредных или ядовитых остатков деполимеризации макромолекулярных медикаментов в ультразвуковом поле маловероятно, так как ультразвук только во время длительного облучения влияет механически, изменяя вязкость, молекулярный вес и т. п. у полимеров. Но окончательное выяснение появляющихся химических превращений требует в конкретных условиях соответственного анализа. Процессы ультразвуковой деполимеризации и

полимеризации макромолекул подробно описываются, например, в работе [9].

Для оценки звукохимического эффекта нужно K_x определяется после элиминации K_m из формулы

$$K_x = K_c - K_n$$

Непосредственное измерение K_c и калориметрическое определение K_n следует проводить в проходящем звуковом потоке с интенсивностью, соответствующей в действительности применяемой, например, при распылении жидкости и т. д. [14]. K_m , которое прежде всего показывает затраты поглощенной энергии звука на образование потоков, определяется для элиминации радиометрическими измерениями мощности звука без и при наличии у диска радиометра тонкой звукопроницаемой пленки [39].

Остальные K_i в звукохимических реакциях можно считать незначительно малыми.

В закрытых сосудах (см. напр., [8], стр. 17) при заграждении потока звука невозможно определить истинное первичное значение K_x , соответствующее прямому взаимодействию между звуковыми фонами и реагирующими молекулами, из-за сильного влияния нагревания, стенок сосуда и пр.

В стоячих звуковых волнах указанный коэффициент может в известной мере превосходить свое первоначальное значение, определенное в проходящем потоке звука.

В прегражденном потоке звука K_n теряет смысл, так как нагревание среды зависит тогда только от мощности излучения звука, что при достаточных запасах энергии может привести к значительному повышению температуры. Это принуждает к применению надежно работающей системы термостатирования (охлаждения) у ультразвуковых распылителей жидкостей для предотвращения термохимических превращений медикаментов.

Как правило, значение K_n во много раз превосходит значение K_x .

Заканчивая анализ идеализированного однородного звукового поля с аспекта звукохимии, заметим, что в действительности, как хорошо известно, существуют разные неоднородности поля. Из них нас привлекают концентрации энергии, среди которых самую важную роль играет кавитация ([35], стр. 10). Последняя является фактором, способным инициировать звукохимические реакции [33, 35, 36] и др. Но в то же время экспериментально показано, что распыление жидкости в ультразвуковом фонтане протекает только при образовании кавитации [37-38].

4. В свете вышеуказанных факторов необходимо остановиться на процессах, сопровождающих локализации энергии благодаря кавитации.

При кавитации относительно низкая средняя плотность энер-

гии звукового поля концентрируется в высокую плотность энергии внутри и вблизи захлопывающегося пузырька. Внутри замыкающихся пузырьков температура может повышаться до тысячи градусов, а пиковое давление возникающих ударных волн достигает тысячи атмосфер. Однако влияние указанных экстремальных значений параметров захватывает очень ограниченное количество вещества в течение коротких интервалов времени (части периода колебания ультразвука). В результате этого выход продукта реакции, исключая процессы диспергирования, является незначительным и перспективы звукохимии — технологические процессы, основывающиеся на действии кавитации, необоснованны ([35], стр. 101)

Но сказанное нас не удовлетворяет, так как опасными для здоровья пациента могут оказаться и очень слабые концентрации ядовитых веществ. Нам необходимы основы и методы количественной оценки звукохимического эффекта кавитации [15, 35—47].

Оценка кавитационных и их сопровождающих процессов проводится на базе специальной системы коэффициентов полезного действия, которые определяются на основе соответствующих количеств энергии [40] или исходя из мощностей [15]. Последняя обобщенная система коэффициентов, позволяющая оценить эффективность получения и использования ультразвуковой энергии выражается, например, формулой

$$\eta_{э-x} = \eta_r \eta_n \eta_\phi \eta_k \eta_x,$$

где $\eta_{э-x}$ — к.п.д. использования электрической энергии для химических превращений,

$\eta_r, \eta_n, \eta_\phi$ — к.п.д. ультразвукового (высокочастотного) генератора, преобразователя и фокусирующего устройства (концентратора),

η_k — к.п.д. кавитационного использования акустической энергии,

η_x — к.п.д. использования кавитационной энергии для химических изменений.

η_r определяется электрическими измерениями потребляемой и выходной мощности генератора.

Определение η_n и η_ϕ требует измерения акустической мощности излучения, например, калориметрическим методом [3, 6].

η_k и связанное с ним η_x изучаются в работах [39—43]. На основе приближенной теоремы Борнуса считается, что энергия, затраченная на образование кавитации, равна кинетической энергии течения, измеряемой при помощи радиометра и звукопроницаемой пленки. Получены данные, что в обычных излучателях η_k составляет около 20%, а при использовании сверхмощных концентраторов имеет значение 85—90% [39, 40].

Представляет интерес оценить максимальные энергетические возможности кавитации и искать другие пути определения η_k .

Одинаковые сферические пузырьки, независимо от величины диаметра, плотно расположенные в рассматриваемом объеме, занимают максимально около 70% общего объема системы. В 1 см³ среды кавитационные полости могут занять объем $\Delta V = 0,7 \text{ см}^3$

Работа преодоления нормального давления $P \approx 10^5 \text{ н/м}^2$ при расширении пузырьков [43]:

$$A_{\partial} \approx 7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2 = 0,07 \text{ дж},$$

если не учитывать инерции.

Далее вычисляем при разных максимальных диаметрах D

- 1) объем одного пузырька: $V_n = \frac{\pi D^3}{6} \text{ (см}^3\text{)}$;
- 2) число пузырьков N в объеме $\Delta V = 0,7 \text{ см}^3$: $N = \frac{\Delta V}{V_n}$;
- 3) величину поверхности пузырька: $S_n = \pi D^2 \text{ (см}^2\text{)}$;
- 4) суммарную поверхность пузырьков: $S_c = NS_n \text{ (см}^2\text{)}$;
- 5) работу поверхностных сил при поверхностном натяжении $\delta = 70 \text{ дин/см}$ (вода) $A_{\text{пн}} = \delta S_c \text{ (дж)}$;
- 6) полную работу образования кавитации в течение одного периода в 1 см³ среды (воде): $A = A_{\partial} + A_{\text{пн}} \text{ (дж)}$;
- 7) среднюю плотность кавитационной энергии: $E_k = fA \text{ (дж/см}^3\text{)}$ при частоте $f_1 = 20 \text{ кгц}$, $f_2 = 500 \text{ кгц}$ и $f_3 = 2000 \text{ кгц}$.

Из полученных данных составляем таблицу.

Таблица 2

D (см)	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵
V _n (см ³)	0,54 · 10 ⁻⁶	0,54 · 10 ⁻⁹	0,54 · 10 ⁻¹²	0,54 · 10 ⁻¹⁵
N	1,34 · 10 ⁶	1,34 · 10 ⁹	1,34 · 10 ¹²	1,34 · 10 ¹⁵
S _n (см ²)	3,14 · 10 ⁻⁴	3,14 · 10 ⁻⁶	3,14 · 10 ⁻⁸	3,14 · 10 ⁻¹⁰
S _c (см ²)	4,2 · 10 ²	4,2 · 10 ³	4,2 · 10 ⁴	4,2 · 10 ⁵
A _{пн} (дж)	2,94 · 10 ⁻³	2,94 · 10 ⁻²	2,94 · 10 ⁻¹	2,94
A (дж)	0,073	0,1	0,37	3,07
E ₁ (дж/см ³)	1,46 · 10 ³	2 · 10 ³	7,4 · 10 ³	6,14 · 10 ⁴
E ₂ (дж/см ³)	3,65 · 10 ⁴	5 · 10 ⁴	1,85 · 10 ⁵	1,54 · 10 ⁶
E ₃ (дж/см ³)	1,46 · 10 ⁵	2 · 10 ⁵	7,4 · 10 ⁵	6,14 · 10 ⁶

Теоретически максимальные плотности кавитационной энергии очень высокие, растущие с уменьшением пузырьков и увеличением частот. Но образование максимально возможного количества пузырьков, составляющих 70% из облучаемого объема, требует огромных интенсивностей ультразвука. При полном использовании акустической энергии в слое толщиной 1 см для достижения максимального эффекта кавитации необходимы ин-

тенсивности, по величине равные плотностям кавитационной энергии. Например, в воде при частоте 20 кГц для образования $1,34 \cdot 10^9$ пузырьков диаметром 10^{-3} см требуется интенсивность звука $2 \cdot 10^3$ Вт/см² = 2 кВт/см². В действительности суммарный объем возникающих полостей очень мал и измерим тонким капилляром, а абсолютное количество кавитационных пузырьков в одном кубическом сантиметре имеет порядок 10^6 [43]. Таким образом, реальные запасы энергии и эффективность кавитации в тысячи раз меньше идеализированных возможностей. При интенсивности $I = 10$ Вт/см² плотность кавитационной энергии достигает 2 Дж/см³ при частоте 20 кГц, согласно экспериментально определенному $\eta_k = 20\%$.

Измеряя поглощение звука в тонком слое (для уменьшения рассеяния на пузырьках) при проходящем потоке без и при наличии кавитации (с маленькой и технологической интенсивностью), увеличение поглощения выражают в некоторой мере части акустической энергии, расходуемой на возбуждение кавитации. Пусть по указанной причине поглощается в течение одного периода в объеме 1 см³ количество энергии $A_{\text{пог}}$, а для образования кавитационных пузырьков потребляется работа A , тогда

$$\eta_k = \frac{A}{A_{\text{пог}}} = \frac{A_0 + A_{\text{пп}}}{A_{\text{пог}}} = \frac{\Delta VP + \delta S_c}{A_{\text{пог}}}$$

η_x вычисляется по данным соответствующих физических измерений и химических анализов [36] и пр.

Так как распыление жидкостей в ультразвуковом поле протекает благодаря кавитации [37, 38], нас интересует, чтобы η_k и η_0 (к.п.д. использования кавитационной энергии для диспергирования) были максимальными, а η_x минимальным. По данным работы [42] люминесценция и химические реакции, обусловленные окислением ионов, имеют место только при наличии газа в кавитационном пузырьке. Следовательно, дегазация медикаментов перед распылением приводит к уменьшению звукохимического эффекта кавитации и к увеличению эффекта туманообразования, вследствие того, что у пустых полостей возрастает интенсивность ударных волн захлопывания.

Звуколюминесценция дистиллированной воды с повышением температуры круто падает [42] и при температуре более 40° С прекращается, но интенсивность ударных волн при данной температуре остается еще на заметном уровне. Так открываются перспективы для нахождения полезного температурного режима для разных лекарств, обеспечивающие удовлетворительное распыление и минимальное химическое изменение соединения, если действительно сонолюминесценция всегда сопровождается химическими реакциями [46].

Звукохимический распад лекарств в процессе распыления

понижается уменьшением времени облучения посредством использования минимального резервуара распыления и т. д.

Для количественной оценки звукохимического эффекта нам нужны данные распылителя и свойства медикамента. Зная акустическую мощность установки, η_k и η_x , можем вычислить количество энергии, затрачиваемой для химических превращений, и согласно энергетическим параметрам реакции, найти массу продукта реакции.

Дополнительные данные о химическом и биологическом эффекте кавитации получаются изучением кавитационного процесса под давлением [44, 45]. Например, процесс деструкции полимеров активизируется увеличением интенсивности ударных волн, указывающим на механический характер деполимеризации и т. д. Изучению разных сторон процесса кавитации при повышенных гидростатических давлениях посвящена работа [47] и многие другие.

Гидродинамическая кавитация в крови крупных животных и человека может привести к их смерти. Под воздействием кавитации красные тельца крови — эритроциты дробятся [48].

5. В настоящей работе старались найти общие пути для количественной оценки звукохимического эффекта, анализируя для этого опубликованные материалы и применяя при этом разработанный нами новый метод определения поглощения звука, а также обобщенную систему коэффициентов полезного действия. Вычислены плотности энергии в однородном звуковом поле и при наличии кавитации.

Исходя из представленных позиций, можно оценить количества превращающихся в ходе звукохимических реакций веществ, которые имеют место при поглощении энергии.

Каталитическое действие ультразвука в данной статье не рассматривается. В дополнение к вышесказанному рассматривается влияние некоторых факторов на звукохимический эффект.

В заключение подчеркнем, что локальные плотности энергии при захлопывании пузырьков могут во много раз превосходить средние плотности кавитационной энергии, открывающие пути происхождения любой химической реакции ограниченными количествами вещества. Поэтому при облучении медикаментов ультразвуком необходимо в каждом конкретном случае проводить всесторонние контрольные химические, биологические и медицинские анализы.

Автор выражает сердечную благодарность К. К. Шальневу и Г. А. Кардашеву за обсуждение статьи, а также А. Лайсаару, И. Пийру и другим, оказавшим помощь в оформлении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pickroth, G., *Ultraschall- und Düsen-Aerosole in der Medizin*. Jena, 1963.
2. Wiedau, E., Röher, O., *Ultraschall in der Medizin*. Dresden und Leipzig, 1963.
3. Бергман, Л., *Ультразвук*. М., ИЛ, 1957.
4. Weissler, A., *Sonochemistry: The Production of Chemical Changes with Sound Waves*. JASA, 1953, 25, 4, 651—657.
5. Beier, W., Dörner, E., *Der Ultraschall in Biologie und Medizin*. Leipzig, 1954.
6. Matauschek, J., *Einführung in die Ultraschalltechnik*. Berlin, 1962.
7. Hertorth, L., Winter, H. M., *Ultraschall*. Leipzig, 1958.
8. О химическом и биологическом действии ультразвука. Отв. ред. Ф. А. Гуревич. АН СССР, сиб. отд. Красноярск, 1962.
9. Эльпинер, И. Е., *Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие*. М., Физматгиз, 1963.
10. Atkinson, G., Kor, S. K., Petrucci, S., *Ultrasonics in Chemistry*. Proceedings of the IEEE, 1965, 53, 10, 1355—1362.
11. Pancholy, M., Singal, S. P., *Ultrasonic studies and chemical kinetics-I application of Freedman's theory*. Acustica, 1964, 14, 174—177.
12. Pancholy, M., Singal, S. P., *Ultrasonic studies and chemical kinetics-II application of Tabuchi's theory*. Acustica, 1964, 14, 178—181.
13. Chen, J. W., Kalback, W. M., *Effect of ultrasound on chemical reaction rate*. Industrial and Engineering Chemistry. Fundamentals, 1967, 6, 2, 175—178.
14. Сульби, Л. А., Поглощение звука и химические изменения. Доклад на Двенадцатой межвузовской научной конференции по применению ультразвуки к исследованию вещества. МОПИ. М., 1—5 февраля 1966 г.
15. Сульби, Л. А., Кавитация и химические изменения. Некоторые вопросы баланса энергии. Доклад на Двенадцатой межвузовской научной конференции по применению ультразвуки к исследованию вещества. МОПИ. М., 1—5 февраля 1966 г.
16. Hamann, S. D., *Physico-Chemical Effects of Pressure*. London, 1957.
17. Гоникберг, М. Г., *Химическое равновесие и скорость реакций при высоких давлениях*. М., изд-во АН, 1960.
18. Leiber, C. O., *Der Druckeinfluß bei Reaktionen elektronisch angelegter Moleküle in Lösung*. Dissertation TH. Stuttgart, 1963.
19. Сульби, Л. А., О механизме поглощения звука. Некоторые новые аспекты. Доклад на Совещании по квантовой акустике и ультразвуковой интерферометрии с 26 по 30 июня 1967 г. в г. Вильнюсе.
20. Гитис, М. Б., Химунин, А. С., О поправках на дифракцию при измерении коэффициента поглощения и скорости звука. Акуст. ж., 1968, 14, 3, 363—370.
21. Медников, Е. П., О микроструктуре акустической турбулентности. Акуст. ж., 1966, 12, 4, 466—473.
22. Статников, Ю. Г., Потoki, вызванные звуком конечной амплитуды. Акуст. ж., 1967, 13, 1, 146—148.
23. Parthasarathy, S., Srinivasan, D., Chari, S. S., *Thermische Untersuchungen über die Absorption von Ultraschallwellen in Flüssigkeiten*. Zs. für Physik, 1953, 135, 395—402.
24. Parthasarathy, S., Srinivasan, D., Chari, S. S., *Die Beziehung des durch Ultraschallwellen in Flüssigkeiten erzeugten Temperatureffektes zu ihrem Absorptionskoeffizienten*. Zsch. für Physik, 1953, 135, 403—405.
25. Alfredsson, B., *A study of sonoluminescence in ultrasonic induced cavitation*. Acustica, 1965/66, 16, 127—133.
26. Gabrielli, I., Iernetti, G., Lavenia, A., *Sonoluminescence and cavitation in some liquids*. Acustica, 1967, 18, 173—179.

27. Danielmeyer, H. G., Schallabsorption durch optische Phononen in Molekülkristallen. *Acustica*, 1966, 17, 102—109.
28. Schaaffs, W., *Molekularakustik*. Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1963.
29. Михайлов, И. Г., Соловьев, В. А., Сырников, Ю. П., Основы молекулярной акустики. М., Наука, 1964.
30. Архангельский, М. Е., Сергеева, К. Я., О роли ультразвуковой кавитации в снижении вязкости гидравлических жидкостей. *Акуст. ж.*, 1964, 10, 2, 111—112.
31. Сергеева, К. Я., О возможности деполимеризации низкомолекулярных фракций полимера под действием ультразвука. *Акуст. ж.*, 1965, 11, 3, 405—407.
32. Schmid, G., Neues über die Anwendung von Ultraschall in der Chemie. *Die Chemie (Angewandte Chemie, Neue Folge)*, 56. Jahrgang, Nr. 11/12, S. 67—82, März 1943.
33. Grabar, P., Prudhomme, P. O., Die mechanischen und chemischen Wirkungen der Ultraschallwellen. *Ultraschall in Med.* 1, 114—121, 1949.
34. Boucher, R. M. G., Pisano, M. A., Tortora, G., Sawicki, E., Sonochemical sterilization. *Ultrasonics*, 1967, July, 168—172.
35. Флинн, Г., Физика акустической кавитации в жидкостях. *Физическая акустика*. Под ред. У. Мэзона. М., Мир, 1967, т. 1, ч. Б, 7—138.
36. Gabrielli, I., Iernetti, G., Cavitation and chemical effects in ultrasonic stationary fields. *Acustica*, 1963, 13, 165—174.
37. Ильин, Б. И., Экнадиосянц, О. К., К вопросу о природе распыления жидкостей в ультразвуковом фонтане. *Акуст. ж.*, 1966, 12, 3, 310—318.
38. Экнадиосянц, О. К., О роли кавитации в процессе распыления жидкостей в ультразвуковом фонтане. *Акуст. ж.*, 1968, 14, 1, 107—111.
39. Сиротюк, М. Г., Баланс энергии звукового поля при наличии кавитации. *Акуст. ж.*, 1964, 10, 4, 465—469.
40. Розенберг, Л. Д., Об оценке кавитационной эффективности акустической энергии. *Акуст. ж.*, 1965, 11, 1, 121—124.
41. Акуличев, В. А., Розенберг, Л. Д., О некоторых соотношениях в кавитационной области. *Акуст. ж.*, 1965, 11, 3, 287—293.
42. Сиротюк, М. Г., Влияние температуры и газосодержания жидкости на кавитационные процессы. *Акуст. ж.*, 1966, 12, 1, 87—92.
43. Сиротюк, М. Г., Об энергетике и динамике кавитационной области. *Акуст. ж.*, 1967, 13, 2, 265—269.
44. Сергеева, К. Я., Об ультразвуковой деполимеризации при повышенном статическом давлении. *Акуст. ж.*, 1967, 13, 1, 145.
45. Бронская, Л. М., Вигдерман, В. С., Сокольская, А. В., Эльпинер, И. Е., О влиянии статического давления на ультразвуковые химические и биологические эффекты. *Акуст. ж.*, 1967, 13, 3, 442—444.
46. Мальцев, А. Н., Маргулис, М. А., Возникновение окислительно-восстановительных процессов в растворах триоксалаферрата (III) калия в поле ультразвуковых волн. *Акуст. ж.*, 1968, 14, 2, 295—296.
47. Сиротюк, М. Г., Протекание процессов ультразвуковой кавитации при повышенных гидростатических давлениях. *Акуст. ж.*, 1966, 12, 2, 231—238.
48. Шальнев, К. К., Некоторые проблемы кавитации. *Вестник АН СССР*, 1967, 6, 68—74.

ULTRAHELI KEEMILISE MÖJU HINDAMISE FÜSIKALISTEST ALUSTEST

L. Sulbi

Resümee

Töös tuuakse andmeid idealiseeritud helivälja energiatiheduste kohta homogeensel juhul ja kavitatsiooni puhul ning võetakse kasutusele uus meetod heli neeldumise kirjeldamiseks energeetilistest üleminekutest lähtudes. Energiabilansi koostamiseks esitatakse üldistatud kasutegurite süsteem, mis võimaldab hinnata helienergia tootmist ja kulutamist. Lähtudes artiklis toodud põhimõtetest ja meetoditest avaneb võimalus arvutada helikeemiliste reaktsioonide puhul muunduvate ainete hulki näiteks medikamentide pihustamisel ultraheli abil jne.

PHYSICAL FOUNDATIONS OF EVALUATING THE CHEMICAL EFFECT OF ULTRASOUND

L. Sulbi

Summary

The paper presents data on the energy densities of an idealized ultrasonic field in a homogeneous case and in cavitation. A new method is introduced to describe sound absorption proceeding from energetic transitions. To draw up an energy balance, a system of generalized efficiencies is presented, which makes it possible to evaluate the production and consumption of sonar energy. Proceeding from the principles and methods presented in the paper, it becomes possible to calculate the amounts of converted substances in sonochemical reactions, for instance, in spraying medicaments by ultrasound, etc.