

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

---

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени А. А. ЖДАНОВА

*Е. В. РОМАНЕНКО*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН  
КОНЕЧНОЙ АМПЛИТУДЫ В ЖИДКОСТЯХ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

*диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук*

МОСКВА — 1962 г.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

---

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени А. А. ЖДАНОВА

*Е. В. РОМАНЕНКО*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ  
ИССЛЕДОВАНИЕ  
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН  
КОНЕЧНОЙ АМПЛИТУДЫ  
В ЖИДКОСТЯХ

*АВТОРЕФЕРАТ*

*диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук*

МОСКВА — 1962 г.

Работа выполнена в Акустическом институте АН СССР.  
Научный руководитель акад. Н. Н. Андреев.

В настоящее время существует несколько условное деление акустических волн на волны малой (вернее, бесконечно малой) и волны конечной амплитуды. Такое деление сложилось в результате того, что в случае волн бесконечно малой амплитуды систему гидродинамических уравнений можно свести к линейному волновому уравнению, чего нельзя сделать в случае волн конечной амплитуды. Поэтому, волнами конечной амплитуды обычно называют волны, для описания которых необходим учет нелинейных членов в уравнениях гидродинамики и в уравнении состояния. Волны конечной амплитуды — это промежуточная область между волнами бесконечно малой амплитуды и сильными ударными волнами.

Существенным отличием волны конечной амплитуды от волны малой амплитуды, рассматриваемой линейной акустикой, является изменение ее формы при распространении.

Вопрос о распространении волны конечной амплитуды рассматривался еще Пуассоном [1] и Риманом [2]. Было получено точное решение уравнений гидродинамики, описывающее распространение плоской волны конечной амплитуды в идеальной среде. (Здесь под идеальной средой понимается среда без вязкости и теплопроводности). Согласно формулам, полученным Пуассоном и Риманом, скорость распространения отдельных участков волны конечной амплитуды неодинакова. Участкам с большим значением колебательной скорости частиц соответствует большая скорость распространения. Поэтому, по мере распространения, форма волны будет искажаться и в конце концов на протяжении каждого периода волны образуется разрыв.

В вязкой теплопроводящей среде процесс искажения формы волны конечной амплитуды сопровождается поглощением энергии волны, причем, по мере того, как увеличивается крутизна фронта волны, возрастает и влияние диссипативных процессов, сглаживающих крутизну фронта. Когда оба эффекта окажутся в равновесии, крутизна фронта волны достигает максимально возможной величины. При дальнейшем движении волны ее амплитуда постепенно уменьшается, но изменение искажений фор-

мы будет минимальным для данных условий. Говорят в данном случае, что образовалась относительно устойчивая (стабильная) форма волны. При значительном уменьшении амплитуды волны начинает преобладать влияние вязкости, которое приводит к уменьшению крутизны фронта волны. Когда амплитуда волны становится бесконечно малой, форма волны вновь становится синусоидальной.

В последние годы интерес к нелинейной акустике сильно возрос. Это объясняется тем, что ультразвуковые поля большой интенсивности стали находить все большее и большее применение для решения самых разнообразных технических задач, в научных исследованиях, в медицине и биологии. При практическом использовании ультразвуковых полей большой интенсивности необходимо учитывать прежде всего нелинейные искажения формы волны при распространении в нерелаксирующей и релаксирующей жидкости, а также явления, обусловленные искажениями формы волны. К числу таких явлений следует отнести существенное увеличение поглощения искаженных волн конечной амплитуды по сравнению с поглощением неискаженных волн, зависимость скорости акустических потоков и радиационного давления от степени искажения формы волны и ряд других.

Многие из этих явлений детально изучены теоретически [3—5]. Из вопросов, связанных с распространением волн конечной амплитуды в жидкостях, экспериментально изучено только искажение и поглощение плоских волн конечной амплитуды [6—8]. Причем, удовлетворительное количественное изучение степени искажения волн ограничено только первыми гармониками волны.

Результаты качественного наблюдения формы волны конечной амплитуды на расстояниях от излучателя, превышающих расстояние стабилизации, с помощью широкополосных кварцевых пластинок [7] и оптическим методом [8] свидетельствуют о том, что форма волны близка к пилообразной.

Настоящая работа содержит результаты экспериментального исследования некоторых нелинейных явлений, проявляющихся при распространении волн конечной амплитуды в нерелаксирующей (вода) и релаксирующей (водные растворы электролитов  $\text{CoSO}_4$ ,  $\text{MnSO}_4$  и  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) жидкой среде.

В первой главе приведен краткий обзор теоретических и экспериментальных исследований по рассматриваемым вопросам. Кроме того, получены некоторые соотношения, касающиеся ширины фронта волны пилообразной формы и величины радиационного давления на плоское и сферическое препятствие, помещенное на пути луча плоских искаженных волн.

Во второй главе обобщен выбор методики исследования и описана экспериментальная установка. В эксперименте использован импульсный режим работы излучающей аппаратуры, позволяющий проводить измерения в незаглушенной акустической

ванне. Измерения проводились, как правило, в дальней зоне поля плоского излучателя, где неоднородности поля плоского излучателя, обусловленные диффракционными явлениями, несущественны. В качестве приемников ультразвука использовались специально сконструированные миниатюрные пьезоэлектрические приемники со сферическими и плоскими приемными элементами, а также миниатюрные сферические радиометры.

В третьей главе приведены результаты исследования спектрального состава искаженных волн конечной амплитуды, распространяющихся в воде. Исследования проводились с помощью калиброванных миниатюрных пьезоэлектрических приемников ультразвука. Показано, что акустическая волна, имеющая вблизи плоского излучателя синусоидальную форму, на некотором расстоянии от излучателя становится пилообразной. Ее спектральный состав удовлетворительно описывается уточненным [4,5] решением Фэя [3].

$$V(a, t) = \frac{2b_1\omega}{\rho_0 c_0 (\gamma + 1)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n(\omega t - ka)}{\operatorname{sh} n(\alpha_0 + a \cdot a)}, \quad (1)$$

где

$$a_1 = \frac{4}{3} \eta + \xi + \mu \left( \frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_p} \right)$$

здесь  $V(a, t)$  — колебательная скорость частиц среды в волне,  
 $\eta$  и  $\xi$  — первый и второй коэффициенты вязкости,

$\mu$  — коэффициент теплопроводности,

$C_v$  и  $C_p$  — теплоемкости при постоянных объеме и давлении соответственно,

$a$  — координата Лагранжа,

$t$  — время,

$\omega$  — круговая частота,

$\gamma$  — параметр, характеризующий нелинейность уравнения состояния,

$\alpha_0$  — параметр, характеризующий амплитуду волны,

$n$  — номер гармонической составляющей волны,

$\rho_0$  — плотность среды,

$c_0$  — скорость звука в среде,

$\alpha$  — малоамплитудный коэффициент поглощения звука в среде.

Соотношение (1) выполняется в реальной акустической искаженной волне по крайней мере до гармонических составляющих с номерами 30—40 при значениях числа Рейнольдса до 50. Под числом Рейнольдса подразумевается величина

$$Re = \frac{p'}{b_1\omega} \quad (2)$$

где  $p'$  — амплитуда давления в волне.

Ширина фронта пилообразной волны может быть оценена по формуле

$$x = A \cdot \frac{\lambda}{(\gamma + 1)Re} \text{ при } A \approx 1 \quad (3)$$

Здесь  $\lambda$  — длина волны.

Исследования показали, что синусоидальная волна конечной амплитуды, распространяющаяся от сферического излучателя, также может заметно исказиться и принять форму, близкую к пилообразной, если амплитуда давления у поверхности излучателя достаточно велика (число Рейнольдса порядка 100).

В четвертой главе приведены результаты исследования ряда явлений, имеющих место при распространении в воде волн конечной амплитуды и обусловленных искажением формы волны. В частности, исследовано поглощение сферически расходящихся пилообразных волн; измерено радиационное давление волн синусоидальной и пилообразной формы на плоское и сферическое препятствие; измерена скорость акустических потоков в поле синусоидальных и пилообразных волн; изучена работа концентраторов ультразвука при больших интенсивностях излучения, когда на пути между излучающей поверхностью концентратора и фокусом форма волны искажается. Показано, что:

1. Коэффициент поглощения расходящихся пилообразных волн совпадает с коэффициентом поглощения плоских пилообразных волн, т. е. поглощение не зависит от характера расхождения волны и определяется лишь вязкостью и теплопроводностью среды.

2. Величины радиационного давления на препятствия и скорости акустических потоков существенно зависят от формы волны. При одной и той же амплитуде давления синусоидальных и пилообразных волн и прочих равных условиях величины радиационного давления и скорости потоков в поле пилообразных волн оказываются в 1,50 раз меньше, чем в поле синусоидальных волн.

3. Коэффициент усиления сферических концентраторов ультразвука зависит не только от геометрических размеров и рабочей частоты концентраторов, но и от интенсивности излучения.

Параметр, характеризующий влияние нелинейных явлений на работу концентратора ультразвука, имеет вид

$$a_k = -\frac{1}{\pi} + \frac{\gamma + 1}{\lambda c_0} F V_F' \ln \frac{F}{r_\phi} \quad (4)$$

где  $F$  — фокусное расстояние концентратора,  $V_F'$  — амплитуда колебательной скорости частиц среды у поверхности концентратора,  $r_\phi = \lambda / (\pi \sin^2 \alpha_m)$ ,  $\alpha_m$  — угол раскрытия системы.

Если  $a_k < 0$ , влияние нелинейных явлений несущественно и коэффициент усиления концентратора по скорости  $K_v$  может оцениваться по формуле  $K_v = F/r_\phi$  если  $a_k > 0$ , то нелинейные

явления заметно проявляются при работе концентратора и его коэффициент усиления должен рассчитываться по формуле

$$K_{\nu}' = \frac{F}{r_{\phi}(1 + a_{\kappa})} \quad (5)$$

В пятой главе приведены результаты исследования искажения формы волн конечной амплитуды, распространяющихся от плоского и сферического излучателей в водных растворах электролитов, характеризующихся релаксацией диссоциации.

Показано, что спектральный состав искаженной волны может быть описан решением ФЭя (соотношение 1) для нерелаксирующих сред, если рабочая частота на порядок и более отличается от частоты релаксации раствора. Если же рабочая частота менее, чем на порядок отличается от частоты релаксации, то решение ФЭя не может быть использовано для оценки спектрального состава волны. Фазовые соотношения между гармоническими составляющими искаженной волны не остаются постоянными по мере распространения волны. Это приводит к тому, что форма волны непрерывно меняется по мере удаления ее от излучателя. Результаты, приведенные в третьей, четвертой и пятой главах, сравниваются с известными и полученными в настоящей работе теоретическими выводами. Наблюдается качественное и количественное согласие.

В Заключении и Приложении приведены краткие выводы и некоторые практически важные рекомендации, касающиеся:

а) применения миниатюрных широполосных пьезоэлектрических приемников ультразвука — в диапазоне частот 0,4—30 мгц. и приемников с пористой прослойкой,

б) методов калибровки миниатюрных и др. пьезоэлектрических приемников,

в) конструкции и изготовления миниатюрных сферических радиометров (размер сферы до 1 мм),

г) возможности оценки параметров концентраторов по их геометрическим размерам и интенсивности излучения,

д) возможности оценки ширины фронта пилообразных волн по их спектральному составу и

е) возможности определения частот релаксации растворов электролитов по спектральному составу искаженных волн, распространяющихся в растворах.

В приложении, кроме того, приведены принципиальные схемы и краткое описание оригинальных приборов, применявшихся в настоящем исследовании.

Основные результаты диссертации доложены на Конференции по промышленному применению ультразвука (Москва 1957 г.), 3-й и 4-й Всесоюзных акустических конференциях (Москва 1957, 1958 гг.), Международном Акустическом Конгрессе (Штуттгарт 1959 г.), Конференции молодых специалистов (Ленинград 1960) и опубликованы в следующих работах:

1. Е. В. РОМАНЕНКО. Миниатюрные пьезоэлектрические приемники ультразвука. Акуст. ж. 1957, III, 4, 342—347.

2. К. А. НАУГОЛЬНЫХ, Е. В. РОМАНЕНКО. К вопросу о распространении волн конечной амплитуды в жидкости. Акуст. ж. 1958, IV, 2, 200—202.

3. Н. А. РОЙ, Е. В. РОМАНЕНКО. Широкополосные ультразвуковые приемники. Передовой научно-технический и производственный опыт. Тема 38, № П-58—169/6, 1958.

4. Е. В. РОМАНЕНКО. Экспериментальное исследование распространения сферических волн конечной амплитуды. Акуст. ж. 1959, V, 1, 101—105.

5. К. А. НАУГОЛЬНЫХ, Е. В. РОМАНЕНКО. О зависимости коэффициента усиления фокусирующей системы от интенсивности звука. Акуст. ж., 1959, V, 2, 191—195.

6. Е. В. РОМАНЕНКО. Экспериментальное исследование акустических потоков в воде. Акуст. ж. 1960, V, 1, 92—95.

7. Е. В. РОМАНЕНКО. Конструкция и применение миниатюрных приемников ультразвука. Техничко-информационный бюллетень ЦКБ ЭТО, 1960, № 1 (13), 37—47.

8. Е. В. РОМАНЕНКО. Искажение формы волны конечной амплитуды при распространении в релаксирующей среде. Акуст. ж. 1960, VI, 3, 374—380.

9. Е. В. РОМАНЕНКО. Пилообразные волны в электролитах. Акуст. ж. 1960, VI, 4, 508—509.

10. Е. В. РОМАНЕНКО. Установка для калибровки гидрофонов. Передовой научно-технический и производственный опыт. 1960, тема 34 № П. 60—59/5.

11. Е. В. РОМАНЕНКО. О ширине фронта пилообразных волн. Акуст. ж. 1961, VII, 1.

По материалам диссертации зарегистрированы два изобретения:

1. Е. В. РОМАНЕНКО. Способ определения частотных и фазовых характеристик приемников ультразвука.

Авторское свидетельство № 119025.

2. Е. В. РОМАНЕНКО. Сферический приемник ультразвука.

Авторское свидетельство № 119026.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Poisson. Memoire sur la theorie du son Journ. de l'Ecole, 1838, vol 7, 319.
2. Riemann. Über die Fortpflanzung der Luftwellen endlicher Schwingweite. Gött Nach. 1859, 19. Gött. Abh. 1860, v.
3. R. D. Fay. Plane sound waves of finite amplitude. JASA, 1931, 3, 222—241.
4. З. А. Гольдберг. Плоские акустические волны конечной амплитуды в вязкой теплопроводящей среде. Кандидатская диссертация. Акустический институт АН СССР, Москва, 1958.
5. К. А. Наугольных. Некоторые вопросы теории распространения звуковых волн конечной амплитуды. Кандидатская диссертация. Акустический институт АН СССР, Москва, 1959.
6. Л. К. Зарембо. О поглощении ультразвуковых волн конечной амплитуды в жидкостях. Кандидатская диссертация. МГУ, Москва 1958.
7. В. А. Буров, В. А. Красильников. Непосредственное наблюдение искажения формы интенсивных ультразвуковых волн в жидкости ДАН СССР, 118, 920 (1958).
8. Л. К. Зарембо, В. А. Красильников. Некоторые вопросы распространения ультразвуковых волн конечной амплитуды в жидкостях. УФН, 1959, 68, 4, 687—715.