

НЕЛИНЕЙНЫЕ СВОЙСТВА МОДЕЛИ ТРЕЩИНЫ В МЕТАЛЛЕ, ЗАПОЛНЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ

В.С. Козлов

*Московский Государственный Университет имени М.В.Ломоносова,
физический факультет, Москва, Россия
kozlov.viktor@physics.msu.ru*

В настоящее время акустические методы находят широкое применение для решения разнообразных задач не только в физике, но также в промышленности, медицине, биологии, военном деле и т. д. Примером применения является ультразвуковая диагностика в медицине, дефектоскопия, локация, томография и т. д. [1].

Проблемы нелинейной акустической диагностики вызывают повышенный интерес, поскольку имеют огромное значение для решения прикладных задач. По нелинейному отклику системы можно судить о наличии различных дефектов данной системы. Обратная задача нелинейного неразрушающего контроля решается нелинейной дифракционной томографией [2].

В данной работе рассматривается модель структурной неоднородности – флюидонасыщенной трещины в металле. Данная модель является хорошим и достаточно простым способом описать реально существующую неоднородность. Задача о падении плоской волны может быть решена аналитически, и она представлена в ряде работ и учебной литературе, где описано ее точное решение [2,4,5]. Также проводились экспериментальные исследования нелинейных свойств тонкого слоя [3]. В указанной работе изучались нелинейные свойства слоя эпоксидной смолы между двумя металлическими образцами на основе амплитудных и фазовых характеристик для первых трех гармоник.

Для изучения нелинейных свойств модели флюидной трещины в твердом теле создана схема из двух идентичных металлических образцов, промежутки между которыми заполнен слоем жидкости. Таким образом, получается тонкий нелинейный слой, поджатый двумя телами, который резко отличается по свойствам от окружающей среды – его толщина значительно меньше длины волны. Акустический импеданс слоя на порядок меньше импеданса границ.

$$\frac{\rho_{cl} C_{cl}}{\rho_0 C_0} \ll 1 \quad (1)$$
$$kd \ll 1$$

В основе работы с системой лежит ультразвуковой метод. Он заключается в том, что через образец пропускают серию импульсов и следят за

динамикой их фаз и амплитуд, через которые, в свою очередь, получают различные характеристики. Использовалась установка, схема которой приведена на рис.1. Акустический сигнал определенной частоты подавался на преобразователь на конец металлического образца и проходил через слой воды. На другой стороне принимался модифицированный сигнал, прошедший через слой. При этом можно наблюдать его форму, а также проводить его спектральный анализ.

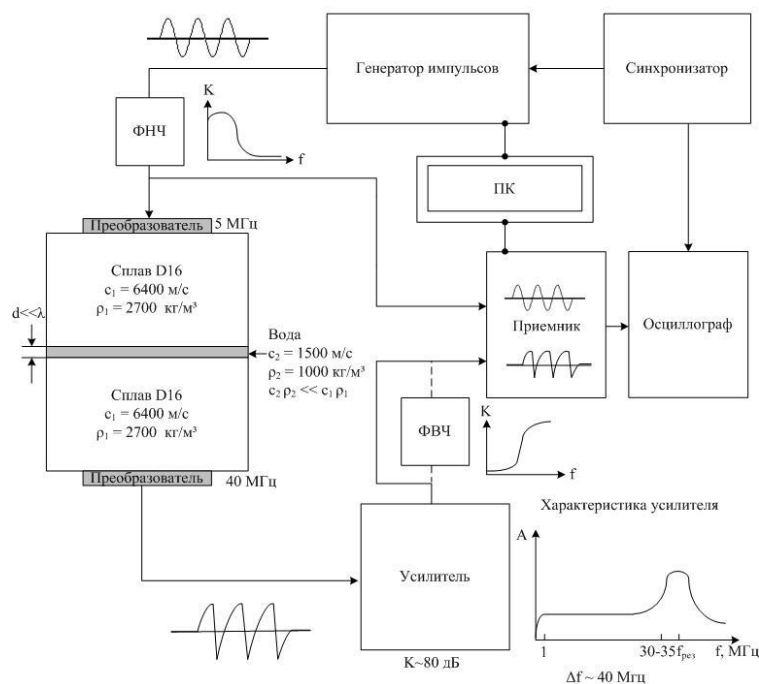


Рис.1. Схема установки и основные характеристики

В ходе эксперимента на осциллографе наблюдалось изменение формы прошедшего импульса. Наблюдения и анализ производились на первом прошедшем импульсе, поскольку последующие импульсы – это результат переотражений, наложений сигнала друг на друга и т. д. Изначально форма была синусоидальной, но после прохождения нелинейного слоя жидкости его форма стала близкой к пилообразной (асимметрия), что говорит об обогащении спектра, то есть рождении высших гармоник (рис.2). Это происходит именно в слое, поскольку исходный сигнал пропускается через низкочастотный фильтр, а нелинейность всего измерительного тракта мала настолько, что практически не дает никакой вклад в изменение формы сигнала и рост амплитуды высших гармоник.

Исследования нелинейных свойств образцов, проводились спектральным методом по эффективности генерации $2f = 10$ МГц, $3f = 15$ МГц, $4f = 20$ МГц и $5f = 25$ МГц акустических гармоник в зависимости от амплитуды волны основной частоты $f = 5$ МГц.

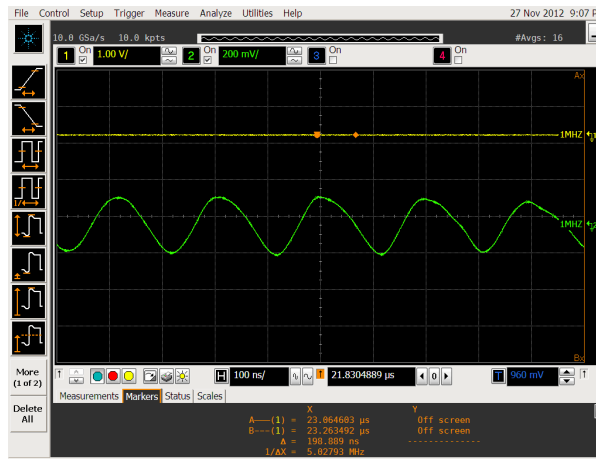


Рис.2. Изменение профиля прошедшего импульса при прохождении слоя

В аналитическом представлении амплитуда n -й гармоники выглядит следующим образом:

$$U_{n\omega} = \frac{C^*}{C} \frac{k^2 l}{8} U_{1\omega}^m \quad (2)$$

$$\frac{C^*}{C} = N$$

где N – нелинейный параметр, m – показатель степени для амплитуды n -й гармоники. Нелинейность геометрическая и вызываемая ангармонизмом решетки, описывается показателем $m=n$. Различие показателей в эксперименте говорит о появлении структурных неоднородностей.

В ходе эксперимента были получены зависимости амплитуд первых пяти гармоник от амплитуды входного сигнала – рис. 3.

Далее результаты были переведены в двойной логарифмический масштаб и были аппроксимированы линейной зависимостью. И, исходя из уравнения прямой, находились показатели степени m и относительное изменение нелинейного параметра N :

$$y = ax + b, \quad \text{где}$$

$$x = \ln(U_{1\omega}), \quad y = \ln(U_{n\omega}), \quad (3)$$

$$a = m, \quad b = \ln(N) + \ln\left(\frac{k^2 l}{8}\right)$$

В результате работы:

1. Собрана экспериментальная установка для исследования нелинейных упругих свойств тонкого поджатого слоя воды на базе ультразвуковой автоматизированной системы Ritec RAM-5000. Освоена методика измерения, обработки и анализа зависимостей амплитуд гармоник прошедшего сигнала от амплитуды исходного.

2. Получен профиль импульса, прошедшего через тонкий нелинейный слой воды, проведен качественный анализ наблюдаемых явлений – искажение профиля происходит вследствие обогащения спектра относительно большими по амплитуде высшими гармониками.

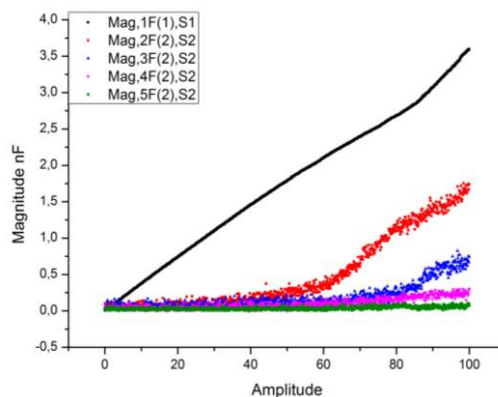


Рис.3. Зависимости амплитуд гармоник от амплитуды исходного импульса

3. Получены зависимости амплитуд 1-5 гармоник прошедшего сигнала от амплитуды исходного сигнала. По результатам измерений были рассчитаны показатели степени, определяющие зависимость амплитуд гармоник от амплитуды основной волны. Выявлено значительное отклонение показателей степеней ($m \neq n$) в зависимостях, что говорит о наличии сильной структурной нелинейности в изучаемом слое.

4. В целом, эксперимент показал, что тонкий поджатый слой воды является хорошей реализацией модели флюидной трещины, вида структурной нелинейности, вызывающей характерное поведение волны – изменение профиля, рождение высших гармоник и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руденко О.В. Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики. // Успехи физических наук. 2006. Т.176. № 1. С. 77.
2. Hedberg C.M., Rudenko O.V. Pulse response of nonlinear layer. // Acoustical Society of America. 2001. V. 110. P. 2340.
3. Hirsekorn S., Hirsekorn M., Delsanto P.P. Nonlinear ultrasonic transmission through thin bonded interfaces: theoretical background and numerical simulations. // Universality of Nonclassical Nonlinearity. 2006. P. 231.
4. Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л. О нелинейном отклике слоя на импульсное воздействие. // Гидроакустический журнал (Проблемы, методы и средства исследований Мирового океана). 2004. № 1. С. 84.
5. Руденко О.В., Солюян С.И. Теоретические основы нелинейной акустики. М.: Наука, 1975.