

Simakov I. G., Gulgenov Ch. Zh., Bazarova S. B.

Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

ACOUSTOELECTRIC METHOD FOR DETERMINING THE DIELECTRIC CHARACTERISTICS OF A FLUID IN THE BOUNDARY LAYER

Using surface acoustic waves to determine the dielectric characteristics of a liquid in the boundary layer is demonstrated. An acoustoelectric method for determining the dielectric constant of a liquid in the boundary layer is proposed. The dielectric characteristics of adsorbed water in the frequency range from 40 to 400 MHz are investigated. It is shown that the dependence of the dielectric permittivity of adsorbed water on vapor pressure at a fixed frequency of the surface wave is of a relaxation character. The developed acoustoelectric method allows one to study the electrophysical properties of nanoscale coatings and films. This method can successfully complement existing methods for studying the dielectric characteristics of boundary layers of liquids and relaxation processes in them.

Acoustoelectric method, boundary layer of a liquid, dielectric characteristics, surface acoustic waves, velocity dispersion of surface acoustic waves, adsorption, adsorbed water, dielectric relaxation

УДК 620.179.16

А. В. Вагин, А. М. Инюкина

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Уменьшение коэффициента отражения звуковой волны от слоистой среды при нормальном падении

Исследована возможность уменьшения коэффициента отражения «звуковой волны давления», падающей нормально на поверхность слоистой среды. Для уменьшения коэффициента отражения звуковой волны выбран метод введения дополнительных слоев с параметрами плотность и скорость звука, которые обеспечивают плавный переход от одной среды к другой с минимальными потерями энергии на распространение. В качестве исследуемой модели такой среды используется структура «углеродистая сталь – металлургический шлак», разделенная на три и десять с переходными параметрами, изменяющимися линейно. В работе построены зависимости коэффициента отражения от круговой частоты при двух вариантах введения количества переходных слоев: три и десять. Показано, что при увеличении количества переходных слоев между средами происходит уменьшение коэффициента отражения звука.

Коэффициент отражения, нормальное падение, наклонное падение, слоистая среда, переходный слой, плотность среды, скорость звука

При построении математических моделей, описывающих физические процессы в слоистых композитных средах различной толщины и параметров материалов, часто представляет интерес оценка коэффициента отражения волны от системы этих слоев. В настоящее время разнообразие конструкционных материалов в современном производстве чрезвычайно велико и имеет устойчивую тенденцию к нарастанию [1].

Расширение номенклатуры используемых материалов опирается на создание новых технологий, что в свою очередь сопровождается появле-

нием новых задач в области структуроскопии и дефектоскопии. Разработка таких средств контроля и диагностики должна опираться на физические предпосылки, связанные с особенностями волновых процессов в периодических слоистых средах.

Интерес к таким средам обусловлен тем фактом, что слоистые среды хорошо моделируют свойства не только сред геологического происхождения, но и композиционных материалов, а также материалов, применяемых в аддитивных технологиях. Известным примером применения результатов анализа теории слоистых сред могут

служить многослойные диэлектрические покрытия, используемые для снижения или повышения коэффициента отражения света от поверхностей линз или зеркал. Также в промышленности все большее распространение находят слоистые композитные материалы, изготовленные из различных компонентов – металлов, полимеров, стеклотканей и т. д. Такие материалы используются в тех случаях, когда необходимо получить высокие механические и термические характеристики вдоль определенных направлений. Соответствующие задачи решаются в авиации и космической технике [2].

В механике композитных материалов исследование прохождения звука через плоский слой композита некоторой фиксированной толщины h представляет важный класс задач. Актуальность таких задач вызвана потребностью современной промышленности в конструировании новых композитных материалов с высокими звукоизолирующими свойствами. Такие материалы, с одной стороны, должны обладать большой прочностью и жесткостью, а с другой – небольшим удельным весом. С этой точки зрения наиболее перспективными представляются композиты, состоящие из плотного упругого материала и достаточно легко вязкоупругого полимера. В свою очередь, среди таких смешанных композитов преимуществом по скорости поиска оптимального сочетания компонентов обладают именно слоистые периодические структуры [3].

Целью статьи является исследование отражающих свойств поверхности слоистой структуры при нормальном падении волны, а также в случае включения между средами переходного согласующего слоя.

При организации исследования композитной структуры с помощью акустических свойств контроля, а также включения в слоистую структуру переходной зоны для уменьшения отражения падающей волны обязательным этапом являются преддизмерительные изыскания, предпринимаемые с целью получения максимального количества информации о строении слоистой структуры и возможного материала переходного слоя.

Для обеспечения минимального отражения при прохождении волны из среды в среду с различными параметрами необходимо согласовать импедансы этих сред. Существует несколько способов согласования импедансов. Один из них заключается во введении между двумя рассматрива-

емыми средами переходной зоны, в которой параметры материала: плотность и скорость звука, плавно изменяются от слоя к слою [3].

Рассмотрим случай нормального падения волны давления на модель слоистой структуры (рис. 1). В качестве первого слоя рассматриваем углеродистую сталь, а в качестве второго – металлургический шлак.

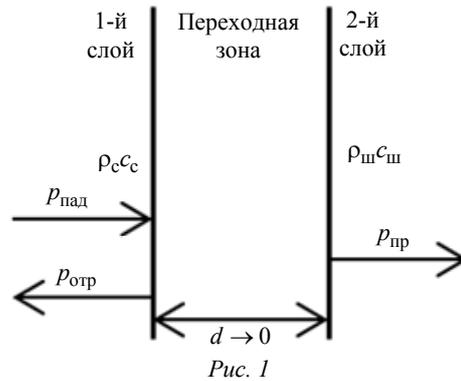


Рис. 1

На рис. 1 обозначены: ρ_c – плотность стали, c_c – скорость звука в стали, $\rho_{ш}$ – плотность шлака, $c_{ш}$ – скорость звука в шлаке, $p_{пад}$ – давление падающей звуковой волны, $p_{пр}$ – давление преломленной звуковой волны, $p_{отр}$ – давление отраженной звуковой волны, d – толщина переходной зоны.

Параметры для структуры «углеродистая сталь – металлургический шлак» известны. Пусть толщина переходной зоны $d \rightarrow 0$. В этом случае граница между сталью и шлаком будет резкой, т. е. параметры стали резким скачком переходят к значениям параметров в шлаке, что влечет за собой повышение коэффициента отражения падающей волны.

Как известно из [4], коэффициент отражения для двух твердых полупространств при резкой границе раздела имеет следующий вид:

$$R = \frac{Z_c - Z_{ш}}{Z_c + Z_{ш}},$$

где $Z_c = \rho_c c_c$ – акустическое сопротивление стали; $Z_{ш} = \rho_{ш} c_{ш}$ – акустическое сопротивление шлака.

Тогда коэффициент отражения для структуры «сталь–шлак» получается равным $R = 0.716$. Большое значение коэффициента отражения обусловливается значительной разницей между волновыми сопротивлениями стали и шлака. Для обеспечения более эффективного прохождения волны через слоистую структуру достаточно добиться возможности согласования двух сред по

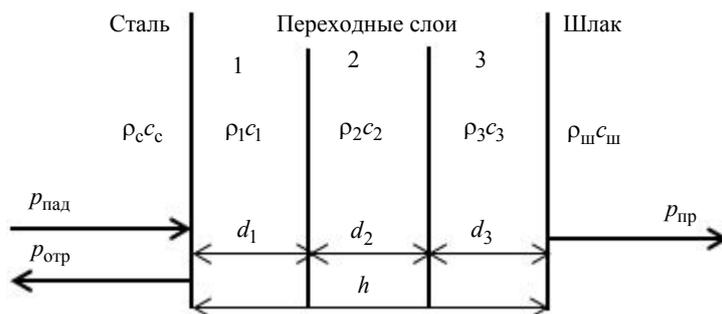


Рис. 2

импедансам с помощью введения переходной зоны между средами. Необходимо, чтобы ее параметры – плотность и скорость звука, линейно изменялись, что даст более интенсивную передачу энергии от слоя к слою.

Однако стоит отметить, что практическая реализация данного решения сложна и трудоемка.

Теперь рассмотрим случай введения переходной зоны между средами сталь–шлак. Пусть между границами стали и шлака имеется трехслойная переходная зона с общей толщиной $h = 0.25$ мм. Толщина каждого слоя одинакова и равна $d_1 = d_2 = d_3 = 0.083$ мм (рис. 2). Для стали и шлака значения плотности и скорости звука имеют следующие числовые значения: $\rho_c = 7.8 \cdot 10^3$, $\rho_{ш} = 2.25 \cdot 10^3$, кг/м³; $c_c = 5.92 \cdot 10^3$, $c_{ш} = 3.39 \cdot 10^3$, м/с.

На рис. 2 $\rho_1 c_1$, $\rho_2 c_2$, $\rho_3 c_3$ – параметры (импедансы) и d_1 , d_2 , d_3 – толщины 1-го, 2-го, 3-го слоев; h – общая толщина переходной зоны.

На значение входного импеданса слоев влияет не только толщина каждого слоя, но и собственное волновое сопротивление слоев. Каждый предыдущий слой влияет на импеданс последующего, т. е. импедансом нагрузки $(n - 1)$ -го слоя является входной импеданс n -го слоя. Наличие переходной зоны обеспечит плавный переход волны из стали в шлак через среду с линейно увеличивающимися параметрами $\rho_1 c_1$, $\rho_2 c_2$, $\rho_3 c_3$.

Значения плотности и скорости звука для слоев рассчитываются исходя из известных плотностей и скоростей звука в стали и шлаке.

Определим значения плотности $\rho_{п.з}$ и скорости звука $c_{п.з}$ переходной зоны относительно слоев стали и шлака, которые должны присутствовать в общей структуре без разделения на отдельные слои:

$$\rho_{п.з} = \frac{\rho_c - \rho_{ш}}{4} = 1387.5 \text{ кг/м}^3,$$

$$c_{п.з} = \frac{c_c - c_{ш}}{4} = 632.5 \text{ м/с.}$$

Тогда требуемые значения плотности в каждом из слоев переходной зоны будут находиться следующим образом:

$$\rho_1 = \rho_c - \rho_{п.з} = 6412.5 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_2 = \rho_c - 2\rho_{п.з} = 5025 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_3 = \rho_c - 3\rho_{п.з} = 3637.5 \text{ кг/м}^3,$$

а значения скорости звука –

$$c_1 = c_c - c_{п.з} = 5287.5 \text{ м/с};$$

$$c_2 = c_c - 2c_{п.з} = 4655 \text{ м/с};$$

$$c_3 = c_c - 3c_{п.з} = 4022.5 \text{ м/с.}$$

Определим значения импедансов в каждом из слоев переходной зоны:

$$Z_1 = \rho_1 c_1 = 33.906 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2 \text{ с};$$

$$Z_2 = \rho_2 c_2 = 23.391 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2 \text{ с};$$

$$Z_3 = \rho_3 c_3 = 14.631 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2 \text{ с.}$$

Как известно из [4], выражение для определения входного импеданса системы, состоящей из n слоев, имеет следующий вид:

$$Z_{вх\ n} = \frac{Z_{вх\ n-1} - iZ_n \operatorname{tg}(k_n d_n)}{Z_n - iZ_{вх\ n-1} \operatorname{tg}(k_n d_n)} Z_n,$$

где $Z_{вх\ n-1}$ – значение входного импеданса предыдущего слоя; Z_n – импеданс искомого слоя; k_n – волновое число; d_n – толщина искомого слоя.

Тогда значения входных импедансов системы

$$Z_{вх\ 1} = \frac{\rho_{ш} c_{ш} - iZ_3 \operatorname{tg}(k_1 d)}{Z_3 - i\rho_{ш} c_{ш} \operatorname{tg}(k_1 d)} Z_3;$$

$$Z_{вх\ 2} = \frac{Z_{вх\ 1} - iZ_2 \operatorname{tg}(k_2 d)}{Z_2 - iZ_{вх\ 1} \operatorname{tg}(k_2 d)} Z_2;$$

$$Z_{вх\ 3} = \frac{Z_{вх\ 2} - iZ_1 \operatorname{tg}(k_3 d)}{Z_1 - iZ_{вх\ 2} \operatorname{tg}(k_3 d)} Z_1.$$

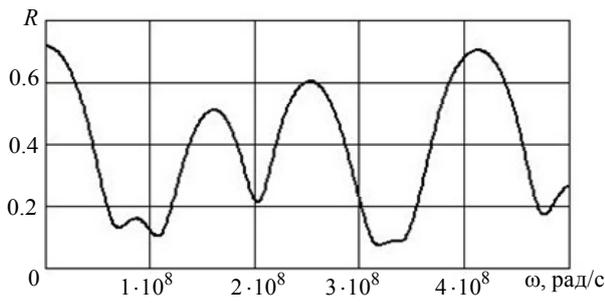


Рис. 3

Используя рекуррентное выражение для расчета входных импедансов слоев, запишем формулу для расчета коэффициента отражения от системы, состоящей из n твердых слоев:

$$R = \frac{Z_{вх\ n} - Z_{n+1}}{Z_{вх\ n} + Z_{n+1}},$$

где Z_{n+1} – импеданс среды, из которой падает волна. В рассматриваемом случае волна падает из углеродистой стали.

Определим коэффициент отражения от системы, состоящей из 3 слоев, согласно формуле

$$R = \frac{Z_{вх\ 3} - \rho_c c_c}{Z_{вх\ 3} + \rho_c c_c}.$$

Построим графическую зависимость коэффициента отражения R от круговой частоты ω (рис. 3).

Графическая зависимость, представленная на рис. 3, имеет осциллирующий характер, что обусловливается интерференционной природой волнового поля внутри слоя. Волны, отраженные от нижней границы, складываются с волнами, отраженными от верхней границы, либо в фазе, либо в противофазе [5].

Диапазон, в котором изменяется коэффициент отражения R , зависит от степени рассогласования волновых сопротивлений слоя и окружающего полупространства. Из графической зависимости видно, что диапазон коэффициента отражения не

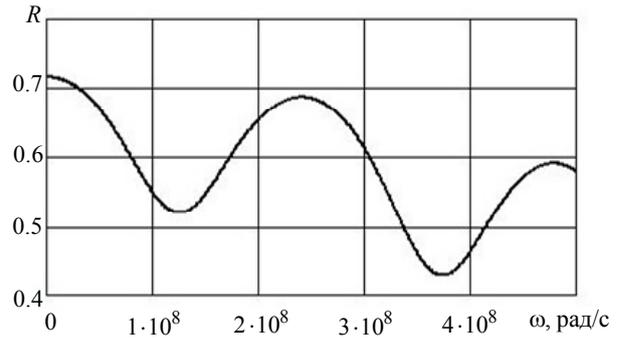


Рис. 4

превышает значения $R = 0.716$, полученного при резкой границе раздела двух твердых сред. Следовательно, при разделении переходной зоны толщиной h на три слоя одинаковой толщины d , отражение от поверхности слоистой структуры уменьшается, хотя и незначительно.

Отметим, что рассмотренный случай – это идеализация. На практике достаточно сложно реализовать одинаковую толщину слоев в переходной зоне между двумя твердыми средами. Рассмотрим задачу, когда толщины слоев имеют случайные значения в пределах переходной зоны.

Пусть между границами стали и шлака имеется трехслойная переходная зона с общей толщиной $h = 0.25$ мм. Толщина каждого слоя различна: $d_1 = 0.005$ мм, $d_2 = 0.155$ мм, $d_3 = 0.09$ мм, и в сумме составляет величину h . Для данного случая на рис. 4 представлена графическая зависимость коэффициента отражения от круговой частоты.

Из графической зависимости видно, что диапазон изменения коэффициента отражения также не превышает значения $R = 0.716$, полученного при резкой границе раздела двух твердых сред. Следовательно, даже при случайной толщине слоев можно добиться уменьшения отражающей способности.

Аналогичные расчеты проведем для случая, когда между границами стали и шлака имеется

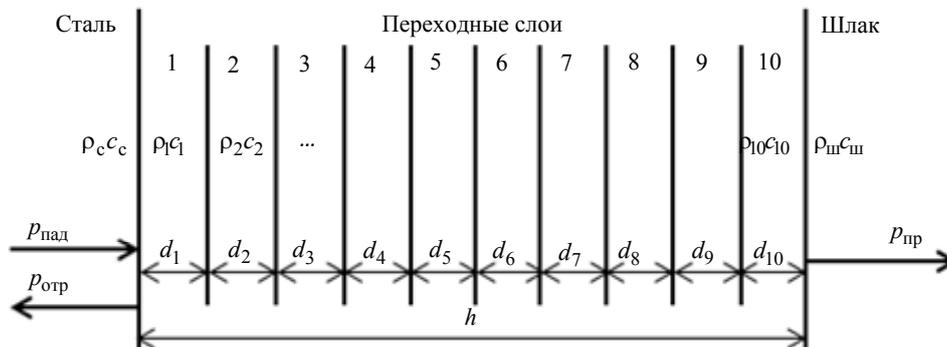


Рис. 5

десятислойная переходная зона с общей толщиной $h = 0.25$ мм. Толщина каждого слоя одинакова и равна $d_1 = d_2 \dots = d_{10} = 0.025$ мм (рис. 5).

На рис. 5 $\rho_1 c_1, \rho_2 c_2, \dots, \rho_{10} c_{10}$ – параметры (импедансы), d_1, d_2, \dots, d_{10} – толщины 1-го, 2-го, ..., 10-го слоев; h – общая толщина переходного слоя.

Значения плотности и скорости звука 1-го, 2-го, ..., 10-го слоев рассчитываются исходя из известных плотностей и скоростей звука в стали и шлаке аналогично расчетам, проведенным ранее. Требуемые значения плотности, скорости и импеданса в каждом из слоев переходной зоны приведены в таблице.

Плотность звука, кг/м ³	Скорость звука, м/с	Импеданс, 10 ⁶ кг/м ² с
7295.4	5690	41.51
6790.9	5460	37.07
6286.4	5230	32.87
5781.8	5000	28.90
5277.3	4770	25.17
4772.7	4540	21.66
4268.7	4310	18.39
3763.7	4080	15.35
3259.1	3850	12.54
2754.6	3620	9.97

Учтем, что толщина слоев d_1, d_2, \dots, d_{10} одинакова и равна $d = 0.025 \cdot 10^{-3}$ м. Определим значения входных импедансов системы:

$$Z_{\text{BX } 1} = \frac{\rho_{\text{ш}} c_{\text{ш}} - i Z_{10} \operatorname{tg}(k_1 d)}{Z_{10} - i \rho_{\text{ш}} c_{\text{ш}} \operatorname{tg}(k_1 d)} Z_{10};$$

$$Z_{\text{BX } 2} = \frac{Z_{\text{BX } 1} - i Z_9 \operatorname{tg}(k_0 d)}{Z_9 - i Z_{\text{BX } 1} \operatorname{tg}(k_0 d)} Z_9;$$

$$Z_{\text{BX } 3} = \frac{Z_{\text{BX } 2} - i Z_8 \operatorname{tg}(k_1 d)}{Z_8 - i Z_{\text{BX } 2} \operatorname{tg}(k_1 d)} Z_8;$$

$$Z_{\text{BX } 4} = \frac{\rho_{\text{ш}} c_{\text{ш}} - i Z_7 \operatorname{tg}(k_0 d)}{Z_7 - i \rho_{\text{ш}} c_{\text{ш}} \operatorname{tg}(k_0 d)} Z_7;$$

$$Z_{\text{BX } 5} = \frac{Z_{\text{BX } 1} - i Z_6 \operatorname{tg}(k_1 d)}{Z_6 - i Z_{\text{BX } 1} \operatorname{tg}(k_1 d)} Z_6;$$

$$Z_{\text{BX } 6} = \frac{Z_{\text{BX } 2} - i Z_5 \operatorname{tg}(k_0 d)}{Z_5 - i Z_{\text{BX } 2} \operatorname{tg}(k_0 d)} Z_5;$$

$$Z_{\text{BX } 7} = \frac{\rho_{\text{ш}} c_{\text{ш}} - i Z_4 \operatorname{tg}(k_1 d)}{Z_4 - i \rho_{\text{ш}} c_{\text{ш}} \operatorname{tg}(k_1 d)} Z_4;$$

$$Z_{\text{BX } 8} = \frac{Z_{\text{BX } 1} - i Z_3 \operatorname{tg}(k_0 d)}{Z_3 - i Z_{\text{BX } 1} \operatorname{tg}(k_0 d)} Z_3;$$

$$Z_{\text{BX } 9} = \frac{Z_{\text{BX } 2} - i Z_2 \operatorname{tg}(k_1 d)}{Z_2 - i Z_{\text{BX } 2} \operatorname{tg}(k_1 d)} Z_2;$$

$$Z_{\text{BX } 10} = \frac{Z_{\text{BX } 1} - i Z_1 \operatorname{tg}(k_0 d)}{Z_1 - i Z_{\text{BX } 1} \operatorname{tg}(k_0 d)} Z_1.$$

Зависимость коэффициента отражения R от системы, состоящей из 10 слоев, рассчитывается согласно формуле

$$R = \frac{Z_{\text{BX } 10} - \rho_c c_c}{Z_{\text{BX } 10} + \rho_c c_c}.$$

Построим графическую зависимость коэффициента отражения R от круговой частоты ω для такого случая (рис. 6).

Диапазон, в котором изменяется коэффициент отражения R , зависит от степени рассогласования волновых сопротивлений слоя и окружающего полупространства. Из графической зависимости, представленной на рис. 6, видно, что диапазон коэффициента отражения не превышает значения $R = 0.716$, полученного при резкой границе раздела двух твердых сред. При разделении переходной зоны на 10 слоев одинаковой толщины коэффициент отражения в заданном диапазоне частот значительно меньше, чем при разделении на 3 слоя.

Рассмотрим задачу, когда толщины слоев имеют случайные значения. Пусть между границами стали и шлака имеется десятислойный пе-

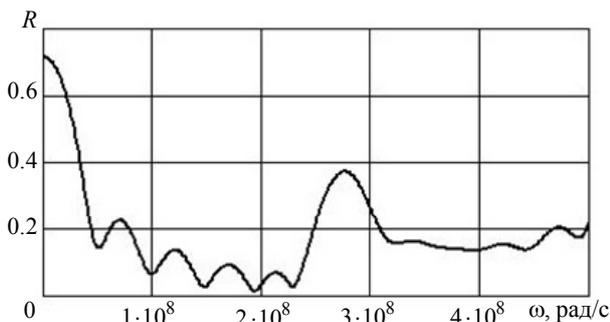


Рис. 6

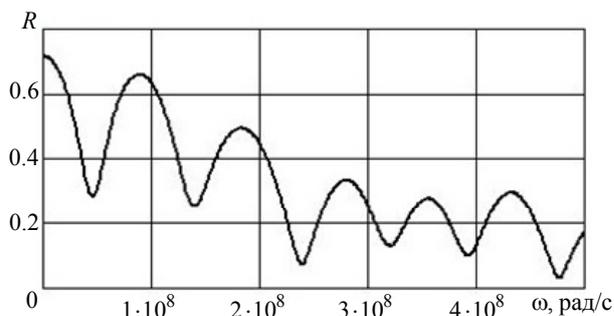


Рис. 7

реходный слой с общей толщиной $h = 0.25$ мм. Толщины каждого слоя различны: $d_1 = 0.0063$ мм, $d_2 = 0.0084$ мм, $d_3 = 0.0035$ мм, $d_4 = 0.016$ мм, $d_5 = 0.00071$ мм, $d_6 = 0.166$ мм, $d_7 = 0.0052$ мм, $d_8 = 0.00059$ мм, $d_9 = 0.0066$ мм, $d_{10} = 0.0367$ мм. На рис. 7 представлена графическая зависимость коэффициента отражения от круговой частоты.

Из графической зависимости, представленной на рис. 7, видно, что диапазон коэффициента отражения не превышает значения $R = 0.716$, полученного при резкой границе раздела двух твердых сред. При разделении переходной зоны на 10 слоев случайной толщины коэффициент отражения в заданном диапазоне частот уменьшается плавно относительно деления переходной зоны на 10 слоев одинаковой толщины.

В статье исследовано взаимодействие упругих волн с переходной зоной на границе слоя. Если пренебрегать задачей определения звукового поля внутри системы и исследовать только внешние параметры, то можно применять более простые методы расчета. Рассмотренный в работе метод, основанный на использовании рекуррентных формул, связывающих амплитуды волн в соседних слоях, был предложен академиком Л. М. Бреховских в [6]. С использованием данного метода расчета были получены входные импедансы слоистой системы и построены частотные зависимости коэффициента отражения от систем, состоящих из 3 и 10 слоев.

В статье рассмотрен случай нормального падения волны давления на модель слоистой струк-

туры. В качестве первого слоя рассматривали углеродистую сталь, а в качестве второго – металлургический шлак. В случае плоского слоя, когда толщина d стремится к 0, граница между сталью и шлаком резкая. Из-за значительной разницы между волновыми сопротивлениями двух сред имеем большое значение коэффициента отражения $R = 0.716$. Переходная зона разделялась на 3 и 10 слоев одинаковой толщины, при этом общая толщина зоны h не менялась. Также был рассмотрен вариант случайной толщины элементарных слоев, при этом общая толщина переходной зоны h оставалась неизменной.

По графическим зависимостям видно, что деление переходного слоя приводит к уменьшению коэффициента отражения в рассматриваемом частотном диапазоне. При делении переходной зоны на 10 слоев было достигнуто значительное уменьшение значения коэффициента отражения падающей волны. Деление на 3 слоя также привело к уменьшению отражающей способности, хоть и незначительному.

Рассмотренный в данной статье импедансный метод применяют для расчета многослойных структур – например, состоящих из слоев на основе звукопоглощающих материалов. Метод находит применение в различных научных областях: в архитектурно-строительной акустике, при создании звуковой и вибрационной защиты, волноводов, согласующих переходных слоев, фильтров продольных или поперечных волн, демпфирующих покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шамаев А. С., Шумилова В. В. Прохождение плоской звуковой волны через слоистый композит с компонентами из упругого и вязкоупругого материалов // Акуст. журн. 2015. Т. 61, № 1. С. 10–20.
2. Оболенцева И. Р., Чичинина Т. И. 50 лет исследований сейсмической анизотропии в России // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 10. С. 1452–1470.
3. Губайдуллин Д. А., Федоров Ю. В. Особенности отражения акустических волн от границы или слоя двухфазной среды // Акуст. журн. 2018. Т. 64, № 1. С. 162–173.
4. Lee K., Choi B. K., Yoon S. W. Acoustic pressure reflection coefficients of a subsurface bubble layer in water // J. of the Korean Physical Society. 2002. Vol. 40, № 2. P. 256–263.
5. Молотков Л. А., Хило А. Е. Эффективные модели слоистых сред с линейными контактами общего вида // Зап. науч. семинаров ЛОМИ. 1986. Т. 156. С. 148–157.
6. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.

A. V. Vagin, A. M. Inyukina
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

DECREASE IN THE REFLECTION COEFFICIENT OF A SOUND WAVE FROM A LAYERED MEDIUM DURING NORMAL INCIDENCE

In the article, the possibility of decreasing the reflection coefficient of a sound pressure wave incident normally on the surface of a layered medium is investigated. To reduce the reflection coefficient of the sound wave, the method of introducing additional layers with the parameters density and speed of sound, which provide a smooth transition from one medium to another with minimal loss of energy for propagation, was chosen. As the investigated model of such a medium, the structure "carbon steel-metallurgical slag" is used, divided into three and ten layers with transition parameters that vary linearly. In the article, the dependences of the reflection coefficient on the circular frequency are constructed for two options for introducing the number of transition layers: three and ten. It is shown that with an increase in the number of transition layers between the media, the sound reflection coefficient decreases.

Reflection coefficient, normal fall, inclined fall, layered medium, transition layer, medium density, sound speed
