

10.1

Электротермические приемники звука© Ф.Ф. Легуша¹, Б.П. Васильев¹, М.М. Олейник¹, К.В. Разрезова²¹ Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия² ООО „Звукоизоляционные Европейские Технологии“, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: kv_neveselova@mail.ru

Поступило в Редакцию 1 февраля 2023 г.

В окончательной редакции 4 марта 2023 г.

Принято к публикации 10 марта 2023 г.

Анализ физических процессов, происходящих при излучении звуковых волн электротермическими источниками звука — термофонами, показал, что термофон является обратимой физической системой. Это позволило определить условия, при которых на активном элементе термофона можно осуществить процесс преобразования акустического сигнала в переменный электрический ток и, следовательно, система будет реагировать на внешнее акустическое поле.

Ключевые слова: акустический сигнал, активный элемент, металлическая пленка, электрический ток, электротермический приемник.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.09.55324.19518

В настоящее время при проведении научных исследований применяются электротермические источники звука — термофоны. Излучение звуковых волн термофоном происходит за счет термоакустического эффекта [1]. Работоспособность термофонов, например, подтверждена экспериментальными исследованиями акустических параметров пленочных термофонов [2,3]. В настоящей работе показано, что слоистая структурная система пленочного термофона может быть использована для создания электротермического приемника звука, в котором взаимодействующий с активным элементом системы акустический сигнал преобразуется в электрический сигнал.

Рассмотрим структурную схему слоистой системы, которая используется в электротермических приемниках звука для преобразования акустического сигнала в переменный электрический ток (см. рисунок). Протекание постоянного тока I_0 по активному элементу (АЭ) 2 обеспечивает предварительный разогрев системы и стабилизацию ее термодинамического режима работы. За счет теплообмена с окружающей средой и несущей пластиной 3 температура АЭ стабилизируется и становится равной T_S . При этом всегда $T_S > T_0$, где T_0 — статическая температура системы в исходном состоянии.

На АЭ 2 устройства происходит преобразование акустического сигнала в переменный электрический ток. Обычно АЭ устройств изготавливаются в виде тонких пленок, проводящих электрический ток. Толщины пленок находятся в диапазоне от 20 нм до 1–5 мкм. Несущая пластина устройства 3 обеспечивает механическую прочность системы, а также отвод стационарных тепловых потоков, возникающих в АЭ устройства при протекании по нему опорного постоянного электрического тока I_0 . Для изготовления пластин используются диэлектрические материалы. Толщина пластины выбира-

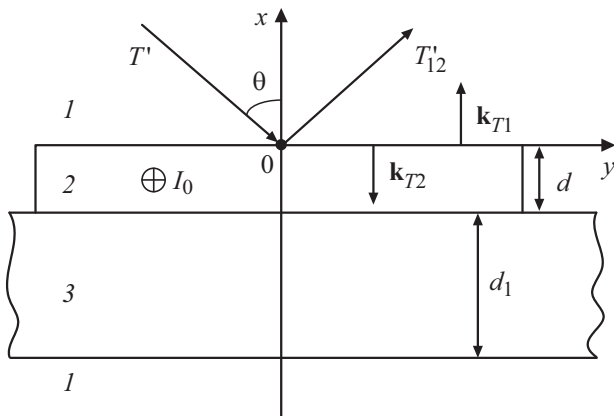
ется из условия обеспечения механической прочности устройства и составляет 1–3 мм.

При распространении звуковых волн в теплопроводной среде I периодически изменяется температура ее вещества [1]. Для описания волны, взаимодействующей с верхней поверхностью АЭ, используем акустическую добавку к температуре среды. Акустическое поле в пространстве I является результатом взаимодействия падающей звуковой волны T' и отраженной T'_{12} . Предполагается, что для поверхности АЭ выполняется неравенство $kr_0 \gg 1$, где $k = \omega c$ — волновое число; c — скорость звука в газе; ω — частота волны T' ; r_0 — радиус эквивалентного круглого приемника звука, в пределах площади которого нанесена сетка из электрических проводников, формирующих АЭ.

Для проведения анализа результатов взаимодействия акустического поля с поверхностью твердого тела, вещество которого имеет конечные значения теплофизических параметров, использовался метод, разработанный в [4,5]. Проведение этого анализа позволило установить следующее.

В результате взаимодействия акустического поля с поверхностью АЭ (плоскость $x = 0$) возникают две неоднородные тепловые волны. Тепловая волна \mathbf{k}_{T1} распространяется в газе, формируя акустический пограничный слой (АПС) в полупространстве I (см. рисунок). Тепловая волна \mathbf{k}_{T2} существует в веществе АЭ 2, возбуждая в нем АПС. Следствием появления в тонком слое электропроводящего вещества 2 тепловой волны \mathbf{k}_{T2} является поле переменных температур, влияющее на электрическое сопротивление проводника. Уравнение движения тепловой волны \mathbf{k}_{T2} имеет вид

$$T'_{T2} = T'_{m2} e^{-\frac{x}{\delta_{T2}}} \cos\left(\frac{x}{\delta_{T2}} - k_y 2y\right), \quad (1)$$



Структурная схема слоистой системы, на которой происходит преобразование сигнала. 1 — газ, 2 — электропроводящий слой, 3 — несущая пластина. I_0 — опорный постоянный ток, d — толщина АЭ, d_1 — толщина несущей пластины, $d_1 \gg d$.

где $\delta_{T2} = \sqrt{2a_2/\omega}$ — толщина АПС в веществе; a_2 — коэффициент температуропроводности вещества; $k_{y2} = k_2 \cos \theta_2$; $k_2 = \omega/c_2$ — волновое число; θ_2 — угол преломления волны.

Из работ [4,5] следует, что в звуковом диапазоне частот при углах падения θ волны T' от 0 до 75° амплитуда тепловой волны (1) не зависит от угла падения и равна

$$T'_{m2} = 2T'_m = \frac{\gamma - 1}{\beta_V} \frac{2u_m}{c}, \quad (2)$$

где u_m — амплитуда колебательной скорости волны; $\gamma = C_P/C_V$ — коэффициент Пуассона; C_P и C_V — удельные теплоемкости газа при постоянных давлении и объеме; β_V — коэффициент теплового объемного расширения среды; T'_m — амплитуда акустической добавки к температуре среды в падающей волне T' .

В исходном состоянии в газообразной среде 1 акустическое поле отсутствует (см. рисунок). При подключении к клеммам АЭ 2 разности потенциала u_0 по нему течет постоянный ток I_0 . Вещество АЭ разогревается до стационарной температуры T_S . Величина тока в цепи I_0 определяется активным сопротивлением

$$R_S = R_{20} \left[1 + \alpha_{\rho 2} (T_S - T_0) \right], \quad (3)$$

где R_{20} — электрическое сопротивление проводника при 20°C ; $\alpha_{\rho 2}$ — температурный коэффициент сопротивления вещества АЭ.

Если в газе возбуждено акустическое поле, в объеме АЭ полная температура среды будет $T_S + 2T'_{m1} \sin \omega t$. В результате взаимодействия поля переменной температуры с веществом АЭ в электрической цепи появляется переменное активное сопротивление

$$R_{ae} = R_{am} \sin \omega t, \quad (4)$$

где $R_{am} = 2R_S \alpha_{\rho 2} T'_{m2} = 4R_S \alpha_{\rho 2} T'_m$ — амплитуда переменного активного сопротивления.

В результате того, что к клеммам АЭ приложена постоянная разность потенциалов u_0 , появление изменяющегося во времени акустического сопротивления (4) приводит к возникновению в электрической цепи переменной разности потенциалов

$$u(t) = u_{am} \sin \omega t, \quad (5)$$

где $u_{am} = 4u_0 \alpha_{\rho 2} T'_m$ — амплитуда сигнала.

В дальнейшем при помощи специальной электрической цепи сигнал $u(t)$ снимается с АЭ и подается в систему обработки электрических сигналов. Амплитуда электрического сигнала линейно зависит от амплитуды падающей на поверхность АЭ звуковой волны T' .

Частотный диапазон электротермического преобразователя акустического сигнала определяется толщиной электропроводящего слоя АЭ. Толщина АЭ d выбирается из условия равномерного разогрева слоя по толщине и удовлетворяет неравенству

$$d \leq 0.50 \pi \delta_{T2}. \quad (6)$$

Из условия (6) находим предельное значение частоты, на которой оно выполняется,

$$f_d = 0.785 a_2 / d^2. \quad (7)$$

Таким образом, рабочий диапазон частот электротермического преобразователя акустического сигнала соответствует частотам $f \leq f_d$.

Используя определение чувствительности микрофонов, получаем выражение для расчета чувствительности электротермического преобразователя акустического сигнала

$$\xi_P = 4u_0 \alpha_{\rho 2} \frac{\gamma - 1}{\beta_V \rho c^2}, \quad (8)$$

где ρ — плотность газа.

Из формулы (8) видим, что чувствительность преобразователя линейно зависит от постоянной разности потенциалов u_0 , приложенной к клеммам АЭ, и температурного коэффициента электрического сопротивления вещества, из которого изготовлен АЭ.

Инерционность разработанного устройства определяется затуханием или нарастанием амплитуды температуры колебательного процесса, возбужденного в веществе АЭ. Значения временного коэффициента затухания тепловой волны (1) не зависят от физических параметров вещества среды, в которой она возбуждена, и определяются выражением $\beta_{T2} = \omega$. Таким образом, устройство имеет постоянную времени колебательного процесса

$$\tau_{T2} = 1/\beta_{T2} = 0.159T \text{ [s]}, \quad (9)$$

где T — период колебания звуковой волны T' .

Из формулы (9) следует, что тепловая волна в АЭ возбуждается и исчезает практически в реальном времени, следуя за изменениями параметров акустического поля.

Проведем численную оценку параметров устройства. Для сравнения рассмотрим два варианта устройств, полагая, что их АЭ имеют одинаковые геометрическую форму и размеры, обеспечивающие толщину АЭ $d = 3.3 \mu\text{m}$. Для формирования электропроводящего слоя используем железо и титан. Оба АЭ нанесены на плоскую термостатированную поверхность, на которой выполняется условие $T_S = 293 \text{ K}$. Акустическое поле возбуждается в воздухе при статическом давлении 1.0 atm . При применении представленных выше формул получены следующие результаты: для железа $f_d = 1.5 \text{ MHz}$, $\xi_p = 190 \mu\text{V/Pa}$; для титана $f_d = 0.6 \text{ MHz}$, $\xi_p = 102 \mu\text{V/Pa}$.

Результаты расчетов позволяют сделать следующие выводы. Устройство позволит производить преобразование акустического поля в переменный электрический ток в звуковом и в нижней части ультразвукового диапазона частот. Чувствительность всех преобразователей достаточна для последующей обработки электрических сигналов, но нужно их предварительное усиление. Выбор металла для изготовления АЭ преобразователей можно осуществлять, опираясь на технологические возможности производства и экономические показатели.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, *Теоретическая физика. Гидродинамика* (Наука, М., 1988), т. 6.
- [2] Б.П. Васильев, Ф.Ф. Легуша, К.В. Разрезова, Г.В. Чижов, *Морские интеллектуальные технологии*, № 4-1 (34), 118 (2016).
- [3] Б.П. Васильев, Ф.Ф. Легуша, С.И. Пугачев, К.В. Разрезова, И.М. Старобинец, *Морские интеллектуальные технологии*, № 2-1 (40), 104 (2018).
- [4] Ф.Ф. Легуша, *УФН*, **144** (11), 509 (1984). DOI: 10.3367/UFNr.0144.198411h.0509 [F.F. Legusha, *Sov. Phys. Usp.*, **27**, 887 (1984). DOI: 10.1070/PU1984v027n11ABEH004124].
- [5] Ф.Ф. Легуша, *ЖТФ*, **54** (4), 671 (1984).