

РАСЧЕТ И РАЗРАБОТКА ПЛЁНОЧНЫХ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ЗВУКА В ГАЗАХ И ЖИДКОСТЯХ

Данная работа носит обзорный характер по результатам проведенных исследований процессов излучения звука в газах и жидкостях плёночными термоакустическими источниками - термофонами. Целью статьи является показать особенности расчета, работы и определения основных акустических характеристик термофонов, способов повышения эффективности их излучения и направлений возможного практического применения.

Представлены основные соотношения и формулы, расчет по которым подтверждается проведенными экспериментальными результатами, анализируются способы возбуждения и повышения эффективности термофонов.

Плёночные термофоны различной формы без теплоизолирующей подложки обладают равномерными, воспроизводимыми акустическими характеристиками, которые можно прогнозировать путем расчета, зная теплофизические константы используемых материалов конструкции термофонов. В качестве активных элементов термофонов использовались тонкие плёнки, сформированные методом вакуумного напыления металлов на поверхностях несущих пластин, изготовленных из полимерных материалов. При пропускании через активный элемент переменного электрического тока с частотой f происходит излучение звуковой волны на удвоенной частоте $2f$. Плёночные термофоны являются единственными источниками звука, излучающая поверхность которых удовлетворяет определению поршневого излучателя. Термофоны работают в диапазоне частот от 1,0 до 150 кГц. Перспективным направлением исследования является использование термофонов в качестве источников излучения звука в жидкую среду. Приводятся результаты исследования излучения плёночного термофона в две жидкости (дистиллированная вода и керосин). По сравнению с излучением в воздух излучение в керосин, например, выше примерно на 20 дБ.

Ключевые слова: Термоакустический эффект; термофон; переменный электрический ток; переменная температура; тепловая волна; звуковая волна; широкополосный источник звука; поршневой источник звука; излучение в жидкости

**Б.П. Васильев,
Ф.Ф. Легуша,
К.В. Разрезова**

Санкт-Петербургский
государственный морской
технический университет
Лоцманская ул., 3,
Санкт-Петербург,
Российская Федерация
190121

bp_vas@mail.ru,
legusha@smtu.ru,
kv_neveselova@mail.ru

1 Введение

В технике встречаются устройства, при работе которых на поверхностях твёрдых тел возникают переменные во времени температурные поля. Колебания температуры на поверхности проводника возникают, например, при протекании по нему переменного электрического тока. Яркими представителями таких устройств являются термофоны. Термофоны – это нерезонансные широкополосные источники звука, в основу работы которых положен

термоакустический эффект. Согласно Л. Беранеку [1], первые эксперименты, в которых исследовался термоакустический эффект, были проведены в 1907 году русским железнодорожным инженером И. Гвоздевым. Теория термоакустических источников звука – термофонов была разработана в 1917 году Х.Д. Арнольдом и И.Б. Крендаллом [2]. Теоретические и экспериментальные исследования процесса излучения звука термофоном, помещённым в малый замкнутый объём газа, были проведены в 1922 году Э.К. Вентом [3].

Современная трактовка термоакустического эффекта получена Л.Д. Ландау [4].

В 20-30-ых годах прошлого века термофоны широко применялись в метрологических целях. Излучение звука в таких термофонах обеспечивалось за счёт протекания переменного тока через его активный элемент (АЭ). Обычно АЭ изготавливались в виде набора тонких металлических проволок или полосок фольги, натянутых между электроизоляционными стойками. Такой тип термофона мы будем называть классическим. В установках по воспроизведению единицы звукового давления классические термофоны дополнительно помещались в небольшие замкнутые камеры, имеющие звукопрозрачное окно [1, 3]. Для повышения акустической эффективности термофона объём камеры заполнялся инертным газом.

Развитие науки и техники привело к тому, что в середине прошлого века эталоны единицы звукового давления стали строить на других физических принципах. Необходимость применения классических термофонов для решения метрологических задач отпала. В последующем классические термофоны (обычно без дополнительной камеры) использовались в научных лабораториях в качестве широкополосных генераторов звука при проведении акустических измерений в газах.

В начале этого века акустические параметры классических термофонов исследовались в работах [5-9]. При этом было показано, что акустическая эффективность классического термофона может быть увеличена на 6...10 дБ, если в качестве АЭ использовать тонкие проволоки, изготовленные из современных высокоомных металлических сплавов. Основными недостатками классических термофонов являются малая механическая прочность их АЭ и высокая чувствительность к внешним механическим ударам и вибрациям.

Развитие технологии создания электропроводящих плёночных покрытий

привело к созданию плёночных термофонов [10]. У таких термофонов АЭ выполнен в виде тончайшей электропроводной плёнки (толщина порядка 30...60 нм), нанесённой на поверхность электроизоляционного твёрдого тела. При этом для изготовления АЭ могут использоваться не только металлы и их сплавы, но и другие вещества, имеющие высокое удельное электрическое сопротивление.

2 Устройство и работа плёночного термофона

Появление плёночных термофонов позволило по-новому взглянуть на термоакустический эффект и его применения в науке и технике. Результаты первых экспериментальных исследований плёночных термофонов можно найти, например, в литературе [10, 11, 12]. Согласно этим исследованиям термофоны являются широкополосными нерезонансными источниками звука, работающими в диапазоне частот от 1,0 до 150 кГц. При непрерывном возбуждении уровни генерируемого термофонами звука могут достигать 100 дБ.

Механическая прочность плёночных термофонов достаточна для практических применений и, кроме того, в отличие от классических термофонов внешние механические вибрации не влияют на их работу.

Структурная схема плёночного термофона представлена на рисунке 1. АЭ термофона – 1 нанесён на верхнюю поверхность подложки – 2, которая в свою очередь закреплена на верхней поверхности несущей пластины – 3.

Плёночный термофон работает следующим образом. При протекании по АЭ – 1 переменного электрического тока на его поверхности возникает тепловое поле, амплитуда температуры T'_m которого изменяется по гармоническому закону. Это в свою очередь приводит к появлению в верхнем полупространстве неоднородной

тепловой волны k_T , распространяющейся в направлении нормали к поверхности АЭ. Далее за счёт термоакустического эффекта формируется излучающая поверхность I - I, на которой образуется звуковая волна k . Расстояние от поверхности АЭ до излучающей поверхности равно толщине теплового пограничного слоя $\delta_T = \sqrt{2a/\omega}$, $a = \chi/\rho C_p$ – коэффициент температуропроводности, χ – коэффициент теплопроводности, ρ – плотность, C_p – удельная теплоёмкость газа.

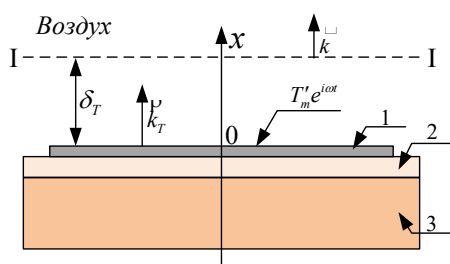


Рисунок 1. Структурная схема плёночного термофона: 1 – АЭ; 2 – подложка; 3 – несущая пластина; k_T – неоднородная тепловая волна; δ_T – толщина теплового пограничного слоя; k – звуковая волна, излучаемая термофоном; I - I – поверхность излучения звука; T'_m – амплитуда переменной температуры поверхности АЭ

Активные элементы плёночных термофонов обычно формируются в виде очень тонких электропроводящих слоёв, для изготовления которых чаще всего используются металлы и металлические сплавы. Толщина АЭ может составлять от 30 нм до 1,0 мкм.

Примеры форм излучающих поверхностей плёночных термофонов показаны на рисунке 2. Термофоны изготовлены в НИЛ кафедры физики СПбГМТУ методом напыления металла на поверхность диэлектрической пластины. Для формирования АЭ использовался титан [13-16].

Геометрические параметры АЭ плёночных термофонов, показанных на рисунок 2, представлены в таблице.

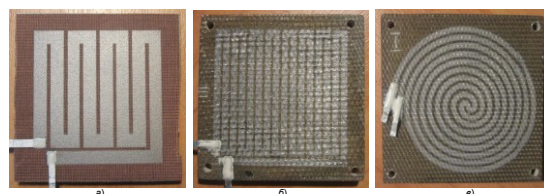


Рисунок 2. Изображения активных элементов плёночных термофонов

Для повышения акустической эффективности термофона между его АЭ и поверхностью механической основы рекомендуется вводить теплоизоляционный слой – подложку (см. рисунок 1). При изготовлении подложек чаще всего используют пористый кремний или пористые полимеры. Недостаток пористых подложек в том, что теплофизические параметры вещества различных подложек, изготовленных из одного и того же материала, могут сильно отличаться. На современном этапе развития термофонов было решено отказаться от подложек и АЭ формировать непосредственно на поверхности несущей пластины [13-16].

Таблица. Геометрические параметры АЭ плёночных термофонов, показанных на рисунке 2

Параметр	Рисунок 4а	Рисунок. 4б	Рисунок. 4в
Длина АЭ, мм	327,0	644,0	634,0
Ширина АЭ, мм	4,0	2,0	1,5
Расстояние между витками d , мм	1,0	0,5	0,8
Длина излучающей области $2A$, мм	40,0	40,0	–
Ширина излучающей области $2B$, мм	39,0	39,0	–
Эквивалентный радиус излучающей поверхности r_0 , мм	20,0	20,0	20,1

Несущая пластина плёночного термофона обеспечивает ему необходимую механическую прочность. Кроме того, пластина обеспечивает отвод излишков тепла от АЭ стабилизируя работу термофона. Площадь несущей поверхности пластины делают достаточной для формирования на ней излучающей поверхности термофона. В наших работах [13-16] для изготовления несущих пластин использовались слоистые пластики.

3 Способы возбуждения термофонов

В настоящее время можно выделить два основных способа электрического возбуждения термофонов [1-3]:

1) через АЭ термофона одновременно текут постоянный электрический ток I_0 и переменный ток с амплитудой I_m . Если $I_0 \gg I_m$, то излучаемая звуковая волна имеет частоту f , соответствующую частоте постоянного тока.

2) через АЭ термофона течёт только переменный электрический ток с амплитудой I_m и частотой f . Тогда излучаемая термофоном звуковая волна имеет частоту $2f$.

Первый способ возбуждения широко применялся в случаях генерации звуковых волн классическими термофонами, когда они использовались в установках для воспроизведения единицы звукового давления [1, 3]. Отметим, что если I_0 и I_m величины одинакового порядка, то в спектре излучения термофона имеются звуковые волны с частотами f и $2f$.

Второй способ более простой с точки зрения технической реализации широко используется в настоящее время при экспериментальных исследованиях акустических параметров плёночных термофонов. Такие испытания обычно проводят в режиме непрерывного возбуждения термофона. Очевидно, при обоих способах возбуждения возможна генерация звуковых импульсов. Например, при возбуждении термофонов радиоимпульсами.

4 Амплитуда переменной температуры поверхности активного элемента

Если плёночный термофон представить в виде системы тонких бесконечных слоёв, внешние поверхности которой контактируют с теплопроводными средами, а АЭ в виде бесконечного очень тонкого слоя с внутренним источником тепла, то можно составить одномерное уравнение теплового баланса. Решая это уравнение для случая непрерывного возбуждения, при котором через АЭ течёт только переменный ток, в работе [17] получено выражение, позволяющее рассчитать значение амплитуды переменной температуры поверхности АЭ

$$T'_m = \frac{q_e}{\sqrt{\omega(K_{H1} + K_{H3})^2 + (\omega\varepsilon)^2}} \quad (1)$$

где $q_e = p_e/S$ – удельная пиковая мощность тепловыделения АЭ; $p_e = R_e I_m^2$ – мощность, потребляемая термофоном; R_e – электрическое сопротивление АЭ; I_m – амплитуда переменного тока, S – площадь боковой поверхности АЭ; $K_{H1} = \sqrt{\chi_1 \rho_1 C_{p1}}$; $K_{H3} = \sqrt{\chi_3 \rho_3 C_{p3}}$; $\varepsilon = \rho_2 C_{p2} h$ – теплоёмкость единицы площади АЭ толщиной h ; ρ_2 , C_{p2} – соответственно плотность и удельная теплоёмкость вещества, из которого изготовлен АЭ.

Из формулы (1) хорошо видно насколько важно, чтобы толщина АЭ была минимальной. В случае излучения звука термофоном в газообразную среду, выражение (1) может быть упрощено. Например, если термофон излучает звук в воздух, а его несущая пластина изготовлена из гетинакса, то термодинамические параметры термофона $K_{H1} = 5,7 \text{ Вт/м}^2\text{Кс}^{0,5}$ и $K_{H3} = 660 \text{ Вт/м}^2\text{Кс}^{0,5}$. Таким образом, в случае, когда верхнее полупространство заполнено газом, выполняется неравенство $K_{H1} \ll K_{H3}$. Потерями тепла в верхнюю среду можно пренебречь и выражение (2) упрощается и принимает вид

$$T'_m = \frac{q_e}{\sqrt{\omega K_{H3}^2 + (\omega \varepsilon)^2}} \quad (2)$$

5 Амплитуда колебательной скорости в плоскости излучающей поверхности термофона

Следствие появления на поверхности АЭ переменной температуры $T'_m(f)$ является возбуждение в верхнем полупространстве (см. рисунок 1) неоднородной тепловой волны

$$T' = T'_m \cdot \exp\left(-\frac{x}{\delta_T}\right) \cdot \exp i\left(\omega t - \frac{x}{\delta_T}\right) \quad (3)$$

Появление тепловой волны (3) в газе приводит к периодическим изменениям его акустических параметров. Используя теоретическое описание термоакустического эффекта [4] после преобразования получим формулу для расчёта колебательной скорости звуковой волны k , зарождающейся на излучающей поверхности. Таким образом, формула для расчёта амплитуды колебательной скорости имеет вид

$$U_{01} = \sqrt{a_1 \omega} \beta_{v1} T'_m, \quad (4)$$

где a_1 – коэффициент температуропроводности газа, $\beta_{v1} = 1/273,15 \text{ К} = 3,66 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ – коэффициент теплового объёмного расширения газа.

Отметим, что величина U_{01} постоянна по всей излучающей поверхности термофона. Это позволяет отнести плёночные термофоны к классу поршневых источников звука.

Из формулы (4) можно сделать следующий вывод. Физические параметры газа, входящего в выражение (4), мало изменяются при замене воздуха каким-либо другим газом. Следовательно, увеличение акустической эффективности плёночных термофонов в первую очередь связано с мероприятиями, направленными на

увеличение амплитуды переменной температуры T'_m поверхности АЭ (см. выражение (1) и (2)).

6 Звуковое давление в свободной среде

Согласно стандартной методике измерения акустических параметров источников звука для оценки их акустической эффективности измеряется звуковое давление в заданной точке, находящейся на центральной оси источника звука. При этом предполагается, что излучатель создаёт акустическое поле в бесконечном полупространстве.

При проведении расчётов акустических параметров плёночных термофонов мы полагаем, что амплитуда колебательной скорости постоянна по всей поверхности источника звука. Это позволяет излучающую поверхность термофона рассматривать как плоский поршневой источник звука, находящийся в жёстком акустическом экране. Методика расчёта параметров таких источников звука хорошо известна [18, 19]. Это позволяет сразу записать распределение амплитуды звукового давления вдоль центральной оси термофона в следующем виде

$$p_1(x) = 2U_{01} \rho c \left| \sin\left(\frac{k\alpha_1}{2}\right) \right| \quad (5)$$

где $\alpha_1 = \sqrt{(x - \lambda_{T1})^2 + r_0^2} - x$, r_0 – радиус эквивалентной излучающей поверхности, $\lambda_{T1} = 2\pi\delta_T$ – длина тепловой волны в среде, в которую излучается звуковая волна.

Величину эквивалентного радиуса излучающей поверхности находим из следующих соображений. Будем считать, что в общем случае излучающая звук поверхность термофона, представленного на рисунке 2а, имеет прямоугольную форму. Геометрические размеры излучающей области можно записать в виде: длина $2A_1 = 2A + \lambda_{T1}$; ширина $2B_1 = 2B + \lambda_{T1}$, где λ_{T1} – длина тепловой волны в среде, в которую излучается звук. Если отношение $A_1/B_1 \leq 1,2$,

то прямоугольный поршневой источник звука может быть заменён эквивалентным ему круглым источником, имеющим эквивалентный радиус $r_0 = \sqrt{2A_1 \cdot 2B_1 / \pi}$. Нетрудно показать, что учёт в этих расчётах длины тепловой волны λ_T актуален только на низких частотах.

Для того чтобы наличие разрывов между проводниками не приводило к нарушению однородного распределения амплитуды колебательной скорости источника звука, на высоких частотах должно выполняться неравенство $d < \lambda_{T1}$, где d – расстояние между кромками параллельных проводников (см. рисунок 2).

7 Результаты измерений и расчётов параметров термофона

В процессе измерений была реализована стандартная методика контроля параметров источников звука (ГОСТ 12.1.024). Основное отличие от стандартной методики калибровки микрофонов в том, что срезы измерительных микрофонов находились на расстоянии $x_0 = 50,0$ мм от центра излучающей поверхности исследуемого термофона. Кроме того, в состав стенда дополнительно были введены электронные термометры для измерения статических значений температуры воздуха в камере T_0 и температуры поверхности АЭ термофона T_n .

Опыт экспериментальных исследований плёночных термофонов позволяет сделать вывод, что испытания плёночных термофонов необходимо начинать с измерений их «амплитудных» характеристик. Это обусловлено необходимостью уточнения значений теплофизических параметров вещества несущих пластин, на поверхностях которых нанесены АЭ. Речь здесь идет о расчётной оценке значений термодинамического параметра K_{H3} , входящего в формулу (1) и (2), которые используются для определения величины амплитуды переменной температуры поверхности T'_m АЭ.

Рассмотрим это на примере несущей пластины, изготовленной из гетинакса. В справочной литературе значения физических параметров гетинакса, входящие в расчётную формулу K_{H3} , всегда даются в некотором интервале. Если взять значения физических параметров, соответствующих средним значениям этих интервалов, то получим расчётное значение $K_{H3} = 930 \text{ Вт/м}^2\text{Кс}^{0,5}$.

Зависимость амплитуды давления на центральной оси плёночного термофона от мощности, потребляемой его АЭ, показана на рисунке 3. Несущая пластина изготовлена из гетинакса. Измерения проводились на частоте 8,5 кГц. На этой частоте для исследуемого термофона выполняется условие $\omega K_{H3}^2 \gg (\omega \varepsilon)^2$ и формула (2) принимает вид

$$T'_m = \frac{q_e}{\sqrt{\omega K_{H3}}}. \quad (6)$$

Значение T'_m получаем пересчётом формул (4) и (5), тогда из выражения (6) имеем $K_{H3} = 660 \text{ Вт/м}^2\text{Кс}^{0,5}$. Испытания других плёночных термофонов, несущие пластины которых были изготовлены на пластинах, взятых из того же листа гетинакса дают $K_{H3} = (660 \pm 20) \text{ Вт/м}^2\text{Кс}^{0,5}$.

Если теперь экспериментальное значение параметра K_{H3} использовать для расчёта амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) плёночных термофонов, то получим хорошее совпадение результатов расчёта и измерений.

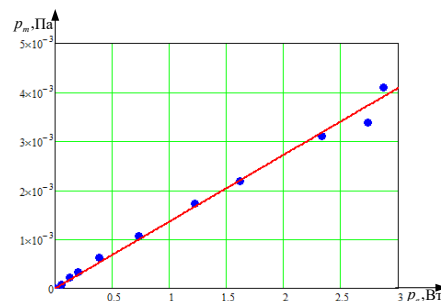


Рисунок 3. Зависимость амплитуды звукового давления от мощности, потребляемой термофоном, несущая пластина которого изготовлена из гетинакса.

Перспективным направлением исследования является использование термофонов в качестве источников излучения звука в жидкостях.

С точки зрения физики процессы распространения звуковых волн в газах и жидкостях не отличаются. Поэтому достаточно проверить формулы (1), (4) и (5) для случая излучения звука пленочного термофона в жидкость.

Для предварительной оценки акустических параметров термофонов в качестве жидкостей выбраны вода ($K_{Н1} = 1584 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{Кс}^{0,5})$) и керосин ($K_{Н1} = 456 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{Кс}^{0,5})$). Такой выбор обусловлен прежде всего отсутствием электропроводности этих жидкостей и значительным различием (в 3,5 раза) у них коэффициентов $K_{Н1}$.

АЧХ плёночного термофона, геометрия АЭ которого представлена на рисунке 2а, погружённого в керосин, воду и воздух ($K_{Н1} = 5,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{Кс}^{0,5})$), соответственно, показано на рис. 4. [21,22]. Видно, что уровни звукового излучения монотонно возрастают.

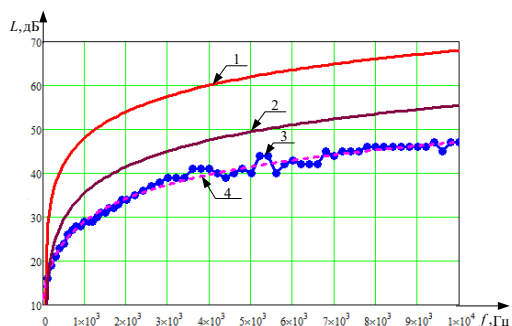


Рисунок 4. Частотные зависимости уровня звукового давления: 1 – расчёт для керосина; 2 – расчёт для воды; 3 – экспериментальные данные центрального микрофона в воздухе; 4 – усреднённые значения эксперимента в воздухе

На частотах выше 8,0 кГц уровни звука достигают значения $L = 47 \text{ дБ}$, которое при дальнейшем увеличении частоты практически не изменяется.

Следует отметить, что использование термофона в обычной воде невозможна ввиду ее электропроводности. В этом случае необходимо разрабатывать специальные термофоны, гидроизолированные от

проводящей жидкости за счёт иммерсионной жидкости. В природе существует множество жидкостей, являющихся электроизоляторами. Для этой цели могут быть использованы электроизоляционные жидкости 132-12Д и ПЭС-3Д, широко используемые при производстве электроакустических преобразователей и гидроакустической аппаратуры.

8 Заключение

1. Разработанные пленочные термофоны различной формы без теплоизолирующей подложки обладают равномерными, воспроизводимыми акустическими характеристиками, которые можно прогнозировать путем расчета, зная теплофизические константы используемых материалов конструкции термофонов.

2. Учитывая уникальные технические характеристики, плёночные термофоны могут быть использованы в качестве нерезонансных источников звука поршневого типа как для проведения научных исследований, так и для создания технических устройств различного назначения.

3. Термофоны могут успешно использоваться в качестве источников излучения звука в непроводящих жидкостях. Акустическая эффективность возбуждения звуковых волн термофонами в непроводящих жидкостях выше, чем в воздухе на 6 дБ для воды и на 20 дБ для керосина.

4. При использовании термофона для проведения гидроакустических измерений плёночный термофон должен быть изолирован от проводящей жидкости за счёт иммерсионной жидкости.

Список использованных источников

- [1] Беранек Л. Акустические измерения / Л. Беранек. – М.: ИЛ, 1952. - С. 626.
- [2] Arnold H. D. The Thermophone as a Precision Source of Sound / H. D. Arnold, I. B. Crandall // Phys. Rev. - 1917. - P. 22–38.
- [3] Wente E. C. The Thermophone / E. C. Wente // Phys. Rev. - 1922. - P. 333-345.

- [4] Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Том VI. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц – М.: Наука, 1986. – С. 736.
- [5] Легуша Ф. Ф. Излучение звука поверхностью, температура которой изменяется по гармоническому закону / Ф. Ф. Легуша, К. В. Невеселова // Тр. XXIV сессии РАО. Физическая акустика. – М.: ГЕОС, 2011. – С. 83-86.
- [6] Васильев Б. П. Излучение звука плоской проводящей поверхностью под действием переменного тока / Б. П. Васильев, Ф. Ф. Легуша, К. В. Невеселова // Тр. XXV сессии РАО. Физическая акустика. – М.: ГЕОС, 2012. – С. 74-77.
- [7] Легуша Ф. Ф. Исследование процессов излучения звука термофоном / Ф. Ф. Легуша, К. В. Невеселова // Сборник НИР студентов и аспирантов в области физических наук. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – С. 43-47.
- [8] Васильев Б. П. Термоакустические излучатели низкочастотного звука и их применение в акустике / Б. П. Васильев, Ф. Ф. Легуша, К. В. Невеселова // XXVII сессия РАО, посвящ. памяти учёных-акустиков «Крыловского ГИЦ» А. В. Смольякова и В. И. Попкова. - СПб, 2014.
- [9] Васильев Б. П. Термоакустические источники звука на основе плоских проволочных структур / Б. П. Васильев, К. В. Невеселова. - СПб.: Морские интеллектуальные технологии (МИТ). - 2015 - № 4 (30). – Т. 1. – С. 65-71.
- [10] Shinoda H. Thermally induced ultrasonic emission from porous silicon / H. Shinoda, T. Nakajima, K. Ueno, N. Koshida // Nature. – 1999. - Vol 400. – P. 853-855.
- [11] Niskanen A. O. Suspended Metal Wire Array as a Thermoacoustic Sound Source / A. O. Niskanen, J. Hassel, L. Gronberg, P. Helisto // J. Appl. Phys. Lett. – 2009. - Vol. 95. – Issue 16. – P. 163102.
- [12] Chitnis G. A thermophone on porous polymeric substrate / G. Chitnis, A. Kim, S. H. Song, A. M. Jessop, J. S. Bolton // Birck and NCN Publications. - 2012. – P. 1160.
- [13] Легуша Ф. Ф. Широкополосные термоакустические источники звука – термофоны / Ф. Ф. Легуша, К. В. Невеселова - СПб.: МИТ. – 2014. - № 3 (25). - Т. 1. - С. 71-77.
- [14] Легуша Ф. Ф. Экспериментальные исследования современных термофонов / Ф. Ф. Легуша, К. В. Невеселова. - СПб.: МИТ. - 2015- № 4(30). – Т. 1. – С. 60-65.
- [15] Васильев Б. П. Экспериментальные исследования плёночных термофонов / Б. П. Васильев, Ф. Ф. Легуша, К. В. Разрезова, Г. В. Чижов. - СПб.: МИТ. – 2016. - № 4 (34). - Т. 1. - С. 118-123.
- [16] Vasiliev B. P. Active elements of film sources of sound-thermophones / B. P. Vasiliev, F. F. Legusha, K. V. Razrezova, G. V. Chizhov // 13th International Conference on Films and Coatings. J. Phys. - 2017. - Conf. Ser. 857 012051.
- [17] Невеселова К. В. Расчёт амплитуды переменной температуры активного элемента термофона / К. В. Невеселова - СПб.: МИТ. – 2014. - № 4 (26). - Т. 1. С. 110-115.
- [18] Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука / С. Н. Ржевкин – М.: Изд. МГУ, 1960. – 338 с.
- [19] Скучик Е. Основы акустики / Е. Скучик. – М.: Мир, 1976 - Т. 2. – 548 с.
- [20] Aliev A. E. Vaughman R.H. Underwater Sound Generation Using Carbon Nanotube Projectors / A. E. Aliev, M. D. Lima, S. Fang // Nano Lett. - 2010. – Vol. 10. - № 7. – P. 2374-2380.
- [21] Легуша Ф. Ф. Термоакустический эффект в жидкой среде / Ф. Ф. Легуша, С. И. Пугачёв, К. В. Разрезова, И. М. Старобинец // Тр. XIV ВНИК «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». - СПб.: Нестор-История, 2018.
- [22] Васильев Б. П. Генерация звуковых волн плёночным термофоном в жидкость / Б. П. Васильев, Ф. Ф. Легуша, С. И. Пугачёв, К. В. Разрезова, И. М. Старобинец. - СПб.: МИТ. – 2018. - № 2 (40). - Т. 1. - С. 104-108.

RESEARCHES OF PROCESSES OF GENERATION OF SOUND WAVES BY FILM THERMOPHONES

**Boris P. Vasiliev,
Fedor F. Legusha,
Kseniya V. Razrezova**

State marine technical university of
Saint-Petersburg
3, Lotsmanskaya Str.,
St. Petersburg, Russian Federation
190121
bp_vas@mail.ru,
legusha@smtu.ru,
kv_neveselova@mail.ru

This work is of a survey nature based on the results of studies of the processes of sound emission in gases and liquids by thermo-acoustic film sources - thermophones. The purpose of the article is to show the features of the calculation, operation and determination of the main acoustic characteristics of thermophones, ways to increase the efficiency of their radiation and directions of possible practical application.

The basic relations and formulas are presented, the calculation of which is confirmed by the experimental results carried out, analyzed ways to excite and improve the effectiveness of thermophones.

Film thermophones of various shapes without a thermally insulating substrate have uniform, reproducible acoustic characteristics, which can be predicted by calculation, knowing the thermal-physical constants of the materials used for the construction of thermophones. As the active elements of guns are used for a thin film formed by the vacuum deposition of metals on surfaces of bearing plates made of polymer materials. When passing through the active element of an alternating electric current with a frequency f , an acoustic wave is emitted at a doubled frequency of $2f$. Film thermophone are the only sources of sound emitting surface which meets the definition of a piston radiator. Thermophone work in the frequency range from 1.0 to 150 kHz.

A promising direction of research is the use of thermophones as sources of radiation of sound in a liquid medium. The results of a study of the radiation of a film thermophone in two liquids (distilled water and kerosene) are presented. Compared to radiation to air, radiation to kerosene, for example, is about 20 dB higher.

Key words: *Thermoacoustic effect; thermophone; alternating electric current; alternating temperature; heat wave; sound wave; broadband sound source; piston sound source; radiation in a liquid*

References

- [1] Beranek, L. (1952), *Acoustic measurements*, IL, Moscow, Russia, pp. 626
- [2] Arnold H.D. and Crandall, I.B. (1917), *The Thermophone as a Precision Source of Sound*, Phys. Rev., pp. 22–38.
- [3] Wentz, E. C. (1922), *The thermophone*, Phys. Rev., pp. 333-345.
- [4] Landau L. D. and Lifshits, E. M. (1986), “Theoretical physics. Hydrodynamics”, *Nauka*, vol. 6, pp. 736.
- [5] Legusha, F. F. and Neveselova, K. V. “Radiation of sound by a surface whose temperature varies according to a harmonic law”, *Proceedings of the XXV session of RAO. Physical acoustics*. M.: GEOS, 2011, pp. 83-86.
- [6] Vasiliev B. P., Legusha F.F., Neveselova K.V. Radiation of sound by a plane conducting surface under the influence of alternating current, *Proceedings of the XXV session of RAO. Physical acoustics*, GEOS, 2012, Moscow, Russia, pp. 74-77.
- [7] Legusha, F. F. and Neveselova, K. V. (2012), *Investigation of sound radiation processes by a thermophone* Investigation radiation processes by a thermophone of sound, MSTU N.E. Bauman, Moscow, Russia, pp. 43-47.
- [8] Vasiliev, B. P., Legusha, F. F. and Neveselova K. V. “Thermoacoustic emitters of low-frequency sound and their application in acoustics”, *Proceedings of the XXVII session of RAO, ded. memory of scientists-acousticians "Krylovsky SSC" A.V. Smolyakova and V.I. Popkov*, 2014, St. Petersburg, Russia.
- [9] Vasiliev, B. P. and Neveselova, K. V. (2015), “Thermoacoustic sources of a sound on the basis of flat wire structures”, *Marin intellectual technologies*, vol. 1, no. 4, issue 30, pp. 65-71.
- [10] Shinoda, H., Nakajima, T., Ueno, K. and Koshida, N. (1999), “Thermally induced ultrasonic emission from porous silicon”, *Nature*, vol. 400, pp. 853-855.
- [11] Niskanen, A. O., Hassel, J., Gronberg, L. and Helisto, P. (2009), “Suspended metal wire array as a thermoacoustic sound source”. *J. Appl. Phys. Lett.*, vol. 95, Issue 16, p. 163102-1-163102-3.

- [12] Chitnis, G., Kim, A., Song, S.H., Jessop, A.M. and Bolton, J.S. (2012), *A thermophone on porous polymeric substrate*, Birck and NCN Publications, P. 1160.
- [13] Legusha F.F. and Neveselova, K.V. (2014), "Broadband thermoacoustic sources of a sound – thermophone", *Marin intellectual technologies*, vol. 1, no. 3, issue 25, pp. 71-77.
- [14] Legusha, F.F. and Neveselova, K.V. (2015), "Experimental investigations on modern thermophones", *Marin intellectual technologies*, vol. 1, no. 4, issue 30, pp. 60-65.
- [15] Vasiliev, B.P., Legusha, F.F. and Razrezova, K.V. (2016), "Experimental investigations on film thermophones", *Marin intellectual technologies*, vol. 1, no. 4, issue 34, pp. 118-123.
- [16] Vasiliev, B.P., Legusha, F.F., Razrezova, K.V. and Chizhov, G.V. (2017), "Active elements of film sources of sound-thermophones", *13th International Conference on Films and Coatings*, J. Phys.: Conf. Ser. 857 012051, vol. 857, St. Petersburg, Russia, 18-20 April, 2017.
- [17] Neveselova, K.V. (2014), "Calculation of time dependent temperature amplitude of the thermophone active element", *Marin intellectual technologies*, vol. 1, no. 4 issue 26, pp. 110-115.
- [18] Rzhavkin, S.N. (1960), *Course of lectures on the theory of sound*, Publ. MSU, Moscow, Russia, 338 p.
- [19] Skudrzyk, E. (1976), "The foundation of acoustics", *World*, Moscow, Russia, vol. 2, 548 p.
- [20] Aliev, A.E., Lima, M.D., Fang, S. and Baughman, R.H. (2010), "Underwater Sound Generation Using Carbon Nanotube Projectors", *Nano Lett.*, no. 10, issue 7, pp. 2374-2380.
- [21] Legusha, F.F., Pugachev, S.I., Razrezova, K.V. and Starobinec, I.M. (2018), *Thermoacoustic effect in the liquid medium*, Nestor-History, St. Petersburg, Russia.
- [22] Vasiliev, B.P., Legusha, F.F., Pugachev, S.I., Razrezova, K.V., and Starobinets, I.M. (2018), "Generation of sound waves by film thermophone into a liquid", *MIT*, St. Petersburg, Russia, vol. 1, no. 2, issue 40, p. 104-108.