

УДК 534.232

О.І. Дрозденко, канд.техн.наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
вул. Політехнічна, 16, Київ-56, 03056, Україна.

Метод розрахунку температур розігріву конструкцій циліндричних електроакустичних перетворювачів компенсованого типу, герметизованих метало-полімерними шарами

На основі розв'язання диференціального рівняння теплопровідності Фур'є розроблено методику для розрахунку температури розігріву конструкцій циліндричних електроакустичних перетворювачів. Методика враховує особливості конструкторської реалізації поширеного метода герметизації перетворювачів метало-полімерними шарами та може бути застосована до конструкцій перетворювачів компенсованого типу. За розрахункову модель взято систему з п'яти нескінченних по висоті шарів, середній з яких є п'єзокерамікою, а з обох боків знаходиться шари полімерних матеріалів та металу. Знайдено розв'язок рівняння теплопровідності за яким можливо визначити температури в різних точках шарів перетворювача. На основі отриманих співвідношень встановлено, що в полімерних оболонках конструкції перетворювача існує значний перепад температур, який може призвести до їх руйнування внаслідок виникнення температурних механічних напружень. Бібл. 13, рис. 3.

Ключові слова: електроакустичний перетворювач, компенсована конструкція, герметизація, рівняння теплопровідності, температурне поле.

Вступ

Електроакустичні перетворювачі (ЕАП) відносяться до тієї групи приладів, конструкції яких мають у своєму складі енергетичні елементи, виконані з п'єзокераміки, які в процесі експлуатації виділяють теплову енергію [1, 3, 4, 8, 9, 11, 12]. Тому однією з важливих задач, які потрібно вирішувати при конструюванні таких перетворювачів, є визначення температури розігріву їх конструкцій.

Єдиної методики для розрахунку температури розігріву конструкцій ЕАП не існує. Дослідження, що проводились в даному напрямку стосуються залежностей параметрів п'єзокерамічних матеріалів, які є теплоутворюючими елементами в конструкціях

ЕАП, від різних зовнішніх факторів. Так, в [1, 3, 4, 8, 9, 12] досліджено залежність характеристик деяких п'єзокерамічних матеріалів від механічних напружень, в [1, 4, 8, 12] – від величини зовнішнього електричного поля, в [1, 3, 9, 11] – від температури.

Точно оцінити, як в реальних умовах експлуатації буде відбуватись розігрів тієї чи іншої конструкції ЕАП, дуже важко, оскільки на перетворювач діє багато випадкових факторів, як то, температура оточуючого середовища, ефективність тепловідводу, зовнішній тиск, термін експлуатації приладу та ін. Тому при створенні аналітичних підходів до розробки розрахункового забезпечення конструювання ЕАП в частині їх теплової міцності слід виходити з найпростіших моделей. Для цього пропонується [2] застосовувати енергетичні міркування, визначаючи реальні теплові навантаження перетворювача в даних умовах експлуатації.

Конструкції ЕАП саме компенсованого типу, елементи яких в умовах експлуатації знаходяться під рівномірним навантаженням, є перспективними та широко використовуються [4, 8].

Існує метод розрахунку температури розігріву конструкцій циліндричних ЕАП, які містять по одному шару матеріалу з кожного боку п'єзокераміки [8]. Однак, в реальних конструкціях перетворювачів кількість шарів конструкційних матеріалів, які не мають джерел виділення тепла, з кожної сторони активного шару, зазвичай перевищує одиницю. Тому метою роботи є розробка методу розрахунку температурного поля саме для таких ЕАП.

1. Постановка задачі

Циліндричний п'єзокерамічний перетворювач компенсованої конструкції (рис. 1), герметизований метало-полімерними оболонками, які містять між активним елементом 1 та металом 3 шар ізолюючого полімерного матеріалу 2.

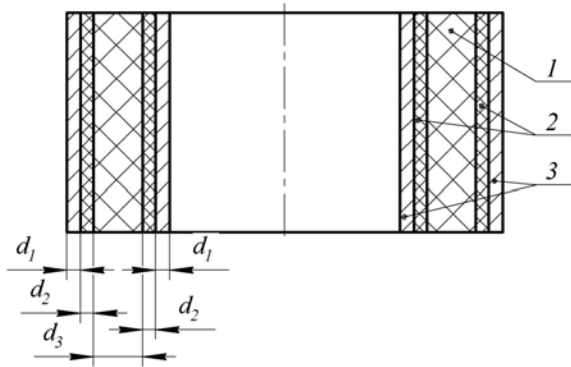


Рис. 1. Схематичне зображення конструкції досліджуваного електроакустичного перетворювача

Проведемо розрахунок розподілу температур в такому перетворювачі. Вважатимемо, що температурне поле симетричне відносно середнього радіуса перетворювача, оскільки товщини шарів металу та підбандажного полімерного матеріалу на внутрішній та зовнішній поверхнях однакові (рис. 2).

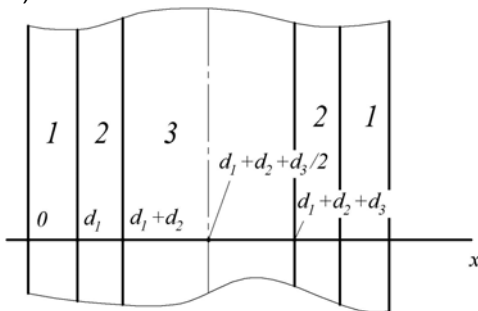


Рис. 2. Розрахункова модель конструкції перетворювача

Як відомо [7, 13], перебіг теплового процесу в будь-якій точці твердого ізотропного тіла з теплопровідністю, яка є постійною в досліджуваному діапазоні температур, в будь-який момент часу при заданих граничних і початкових умовах описується диференціальним рівнянням теплопровідності Фур'є:

$$\lambda_T \nabla^2 T + q_V = c_T \rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

де λ_T – коефіцієнт теплопровідності тіла; ∇^2 – оператор Лапласа; T – температура розігріву тіла; q_V – об'ємна потужність джерел тепловиділення або потужність, яка виділяється одиницею об'єму; c_T – питома теплоємність тіла; ρ – густина тіла; t – час.

У випадку одновимірної задачі для стаціонарного температурного поля та багатшарової конструкції (з числом шарів i) рівняння (1) приймає наступний вигляд:

$$\lambda_{T,i} \frac{d^2 T_{\infty,i}(x)}{dx^2} + q_{V,i} = 0, \quad (2)$$

де $T_{\infty,i}(x)$ – розподіл температури в i -му шарі в стаціонарному режимі.

Температурне поле конструкції перетворювача знайдемо як розв'язок рівняння теплопровідності (2), вважаючи, що джерела тепловиділення $q_{V,i}(x)$ знаходяться лише в матеріалі активного елемента, рівномірно розподілені в його об'ємі і дорівнюють q_{V3} . Врахуємо, що температурне поле є симетричним відносно середини п'єзокерамічного елемента (точки з координатою $d_1 + d_2 + d_3 / 2$).

Матеріали характеризуються коефіцієнтами теплопровідності $\lambda_{T1}, \lambda_{T2}, \lambda_{T3}$, де індекси 1, 2, 3 відносяться відповідно до металу, полімерного матеріалу та п'єзокераміки (рис. 2). Температуру на поверхні перетворювача, яка межує з оточуючим середовищем позначимо T_S , а температуру самого середовища – T_C . Коефіцієнт тепловіддачі поверхні перетворювача – α_T .

Граничні умови:

теплові потоки на границях шарів рівні:

$$\lambda_{T1} \frac{dT_{\infty,1}(x)}{dx} \Big|_{x=d_1-0} = \lambda_{T2} \frac{dT_{\infty,2}(x)}{dx} \Big|_{x=d_1+0};$$

$$\lambda_{T2} \frac{dT_{\infty,2}(x)}{dx} \Big|_{x=d_1+d_2-0} = \lambda_{T3} \frac{dT_{\infty,3}(x)}{dx} \Big|_{x=d_1+d_2+0};$$

теплові потоки на границі тіла з середовищем

$$\text{рівні: } \lambda_{T1} \frac{dT_{\infty,1}(x)}{dx} \Big|_{x=0} = \alpha_T (T_S - T_C) \Big|_{x=0};$$

температури в точках контакту шарів рівні:

$$T_{\infty,1}(x) \Big|_{x=d_1-0} = T_{\infty,2}(x) \Big|_{x=d_1+0};$$

$$T_{\infty,2}(x) \Big|_{x=d_1+d_2-0} = T_{\infty,3}(x) \Big|_{x=d_1+d_2+0};$$

температурне поле симетричне відносно середини активного елемента:

$$\frac{dT_{\infty,3}(x)}{dx} \Big|_{x=d_1+d_2+d_3/2} = 0;$$

температура на поверхні перетворювача

$$T_{\infty,1}(x) \Big|_{x=0} = T_S.$$

2. Об'ємна потужність джерел тепловиділення

Однозначно не вирішене питання визначення об'ємної потужності джерел тепловиділення (продуктивності внутрішніх джерел теплової енергії) q_V .

Вважаючи, що майже вся енергія втрат, яка виділяється під час випромінювання акустичних коливань, переходить в тепло запишемо $q_V = \frac{W_{MB} + W_{EB}}{V\theta}$, де W_{MB} та W_{EB} – відповідно

потужності механічних та електричних втрат; V – об'єм, в якому відбувається тепловиділення; θ – шпаруватість імпульсів. При цьому потужність механічних втрат визначається залежністю $W_{MB} = \dot{w}_0^2 Z_{MB}(\omega)$, де \dot{w}_0 – коливальна швидкість точки приведення, $Z_{MB}(\omega)$ – опір механічних втрат, що в загальному випадку залежить від частоти ω . Для конструкцій ЕАП в реальних умовах експлуатації результуючий опір механічних втрат складається з суми таких опорів механічних втрат:

- неармованого активного елемента;
- підбандажного шару;
- бандажу;
- кріплення перетворювача;
- елементів екранування.

Розрахувати всі ці складові неможливо, тому для практичної оцінки пропонується реальні втрати перетворювача в даних умовах

експлуатації визначати так: $W_{MB} = w_0^2 \frac{\eta(\omega)}{\omega c_e^E}$, де

$\eta(\omega)$ – коефіцієнт втрат, що дорівнює $\eta(\omega) = 1/Q_p$; Q_p – механічна добротність перетворювача в повітрі (вакуумі); c_e^E – еквівалентна гнучкість короткозамкнутого елемента. Механічна добротність може бути або експериментально виміряна, або взяті її значення, одержані для аналогічних конструкцій [2, 5].

Потужність електричних втрат вважається рівномірно розподіленою всередині активного елемента перетворювача і дорівнює $W_{EB} = U^2 \omega C_{el}^E \operatorname{tg} \delta^E$, де U – електрична напруга, що подається на перетворювач; C_{el}^E та $\operatorname{tg} \delta^E$ – електрична ємність та тангенс кута діелектричних втрат затиснутого п'єзоелемента.

Існують і інші способи обчислення об'ємної потужності джерел тепловиділення. Наприклад, в [8] пропонується використовувати співвідношення $q_V = 0,24 \frac{W_{MB} + W_{EB}}{V\theta}$, при чому походження коефіцієнта 0,24 не розкривається.

3. Температурне поле циліндричного електроакустичного перетворювача компенсованої конструкції, герметизованого метало-полімерними оболонками

Знайдемо розв'язок рівняння теплопровідності (2) для кожного з трьох шарів.

Так, для інтервалу $0 < x < d_1$ маємо $T_1(x) = C_1 x + C_2$; для інтервалу $d_1 < x < d_1 + d_2$ – $T_2(x) = C_3(x - d_1) + C_4$; а для інтервалу $d_1 + d_2 < x < d_1 + d_2 + d_3/2$ –

$$T_3(x) = -\frac{q_{V3}}{2\lambda_{T3}}(x - (d_1 + d_2))^2 + C_5(x - (d_1 + d_2)) + C_6,$$

де $C_1 - C_6$ – невідомі константи, які разом із температурою поверхні T_S знаходяться з граничних умов.

З умови 1 маємо, що $C_3 = C_1 \frac{\lambda_{T1}}{\lambda_{T2}}$ та

$$C_5 = C_3 \frac{\lambda_{T2}}{\lambda_{T3}}. \quad \text{З умови 2} \quad C_1 = \frac{\alpha_T}{\lambda_{T1}}(T_S - T_c). \quad \text{З}$$

умови 3 $C_4 = C_1 d_1 + C_2$ та $C_6 = C_3 d_2 + C_4$. З

$$\text{умови 4} \quad C_5 = \frac{d_3 q_{V3}}{2\lambda_{T3}}. \quad \text{З умови 5} \quad C_2 = T_S.$$

Отримали 7 рівнянь та 7 невідомих, з яких виразимо:

$$C_1 = \frac{q_{V3} d_3}{2\lambda_{T1}}; \quad T_S = C_2 = \frac{q_{V3} d_3}{2\alpha_T} + T_c;$$

$$C_3 = \frac{q_{V3} d_3}{2\lambda_{T2}}; \quad C_4 = \frac{q_{V3} d_1 d_3}{2\lambda_{T1}} + \frac{q_{V3} d_3}{2\alpha_T} + T_c;$$

$$C_6 = \frac{q_{V3} d_2 d_3}{2\lambda_{T2}} + \frac{q_{V3} d_1 d_3}{2\lambda_{T1}} + \frac{q_{V3} d_3}{2\alpha_T} + T_c.$$

Таким чином, температури в різних точках шарів перетворювача можна визначити за наступними співвідношеннями:

$$\text{для } 0 < x < d_1, \quad T_{\infty,1}(x) = \frac{q_{V3} d_3}{2\lambda_{T1}} x + \frac{q_{V3} d_3}{2\alpha_T} + T_c; \quad (3)$$

для $d_1 < x < d_1 + d_2$,

$$T_{\infty,2}(x) = \frac{q_{V3} d_3}{2\lambda_{T2}}(x - d_1) + \frac{q_{V3} d_1 d_3}{2\lambda_{T1}} + \frac{q_{V3} d_3}{2\alpha_T} + T_c; \quad (4)$$

для $d_1 + d_2 < x < d_1 + d_2 + d_3/2$,

$$T_{\infty,3}(x) = -\frac{q_{V3}}{2\lambda_{T3}}(x - (d_1 + d_2))^2 + \frac{d_3 q_{V3}}{2\lambda_{T3}} \times (5) \\ \times (x - (d_1 + d_2)) + \frac{q_{V3} d_2 d_3}{2\lambda_{T2}} + \frac{q_{V3} d_1 d_3}{2\lambda_{T1}} + \frac{q_{V3} d_3}{2\alpha_T} + T_c$$

Для прикладу виконаємо за отриманими виразами (3) – (5) розрахунок температурного поля перетворювача при таких значеннях параметрів: [8, 10]

- шар 1 – титан ВТ1-0, $d_1 = 1,5$ мм, $\lambda_{T1} = 16$ Вт/(м·К);
- шар 2 – матеріал АГ-4С, $d_2 = 1$ мм, $\lambda_{T2} = 0,315$ Вт/(м·К);

- шар 3 – п'єзокераміка ЦТБС-3, $d_3 = 8$ мм, $\lambda_{T3} = 1,9$ Вт/(м·К),
 - $q_{V3} = 330 \cdot 10^3$ Вт/м³;
 - температура оточуючого середовища $T_c = 20$ °С;
 - коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_T = 350$ Вт/(м²·К) (взяте середнє значення для тепловіддачі метал – спокійна вода [6]);
- Результат проведеного розрахунку наведено на рис. 3.

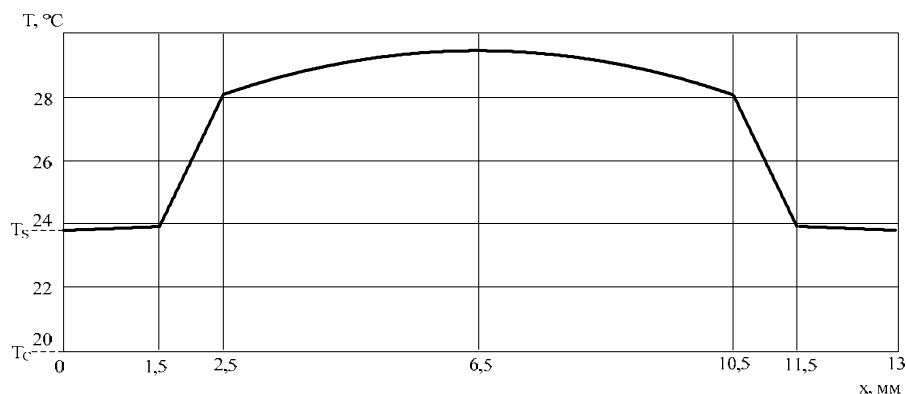


Рис. 3. Графік розподілу температур в конструкції циліндричного п'єзокерамічного перетворювача компенсованого типу, герметизованого метало-полімерними шарами

Як бачимо, всередині перетворювача є ділянка, де існує значний перепад температур, і де можуть виникати значні температурні напруження. Ця ділянка відповідає ізоляційному шару, виготовленому з полімерних матеріалів, які до того ж мають малу механічну міцність. Виявити такі ділянки не дозволяє підхід до розрахунку багат шарових конструкцій, запропонований в [8], де допускається здійснювати заміну кількох шарів матеріалу, які розміщені з однієї сторони п'єзокераміки, одним шаром з тепловим опором R_T , який становить суму теплових опорів шарів, що замінюються

$$R_T = \frac{d_{\text{екв}}}{\lambda_{T,\text{екв}} S} = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_{T,i} S}, \quad \text{де } d_i, \lambda_{T,i}, S -$$

відповідно товщини, теплопровідності і площі поперечних перерізів відповідних шарів матеріалів; $d_{\text{екв}}$, $\lambda_{T,\text{екв}}$ – еквівалентні товщина і теплопровідність.

Наведений підхід до розрахунку температури нагріву багат шарових конструкцій можливо застосувати лише для деяких простих моделей циліндричних електроакустичних приладів. Для інших конструкцій

перетворювачів, наприклад, стержньових, даний метод застосувати не вбачається можливим, оскільки не можливо замінити реальні елементи конструкції на нескінченні шари з однаковими властивостями.

Висновки

1. Встановлено, що всередині конструкції перетворювача є ділянка, де існує значний перепад температур. Ця ділянка відповідає ізоляційному шару, виготовленому зазвичай з полімерних матеріалів, які мають малу механічну міцність. Температурні механічні напруження, що виникають при цьому можуть порушити цілісність конструкції перетворювача.

2. Показано, що виявити ці слабкі ділянки не дозволяв підхід до розрахунку температур розігріву багат шарових конструкцій електроакустичних перетворювачів, який застосовувався раніше.

Список використаних джерел

1. Д. Берлинкур, Д. Керран, Г. Жаффе. Пьезоэлектрические и пьезомагнитные материалы их применение в преобразователях. Физ. акустика: принципы

- и методы. - Пер. с англ., 1966, 1А. - С. 205 – 326.
2. Богородский В.В., Корепин Е.А., Ручьев М.В. Оценка потерь в электромеханических преобразователях // Акустический журнал. – Т.23, вып. 4, 1977. С. 539 – 543.
 3. Болкисев А.М., Карлаш В.Л., Шульга Н.А. О зависимости свойств пьезокерамических материалов от температуры // Прикладная механика. – 1984. – Т. 20, № 7. – С. 70–74.
 4. Дідковський В.С., Лейко О.Г., Савін В.Г. Електроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі (розрахунок, проектування, конструювання): Навчальний посібник. – Кіровоград: Імекс-ЛТД, 2006. – 448 с.
 5. Дідковський В.С. та ін. Практикум з технічної акустики: Навчальний посібник / за ред. В.С. Дідковського. – Київ: 2003. – 191 с.
 6. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. 2-е изд. – М.: Мир, 1985. – 520 с.
 7. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-ое. – М.: Энергия, 1977. – 343с.
 8. Подводные электроакустические преобразователи. (Расчет и проектирование): Справочник / В.В. Богородский, Л.А. Зубарев, Е.А. Корепин, В.И. Якушев. – Л.: Судостроение, 1983. – 248 с.
 9. Пьезоэлектрическая керамика / Е.Г. Смажевская, Н.Б. Фельдман; под ред. Л.В. Голованова. – М.: Советское радио, 1971. – 200 с.
 10. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
 11. Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н. Ультразвуковая размерная обработка материалов: Научная монография/ Алт. гос. Техн. Ун-т. им. И.И. Ползунова. - Барнаул: изд. АлтГТУ, 1997. – 120 с.
 12. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики / Под ред. В.М. Шарапова. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
 13. Шнейдер П. Инженерные проблемы теплопроводности. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 478 с.

Поступила в редакцию 16 мая 2014 г.

УДК 534.232

А.И. Дрозденко, канд.техн.наук

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", ул. Политехническая, 16, Київ- 56, 03056, Украина.

Метод расчета температур разогрева конструкций цилиндрических электроакустических преобразователей компенсированного типа, герметизированных металло-полимерными слоями

На основе решения дифференциального уравнения теплопроводности Фурье разработана методика для расчета температуры разогрева конструкций цилиндрических электроакустических преобразователей. Методика учитывает особенности конструкторской реализации распространенного метода герметизации преобразователей металло-полимерными слоями и может быть применена к конструкциям преобразователей компенсированного типа. В качестве расчетной модели взята система из пяти бесконечных по высоте слоев, средний из которых – пьезокерамика, а с обеих сторон находятся слои полимерных материалов и металла. Найдено решение уравнения теплопроводности с помощью которого возможно определить температуры в разных точках слоев преобразователя. На основе полученных соотношений установлено, что в полимерных оболочках конструкции преобразователя существует значительный перепад температур, который может привести к их разрушению в результате возникновения температурных механических напряжений. Библ. 13, рис. 3.

Ключевые слова: электроакустический преобразователь, компенсированная конструкция, герметизация, уравнение теплопроводности, температурное поле.

UDC 534.232

O.I. Drozdenko, Ph.D.

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",

st. Polytechnique, 16, Kyiv - 56, 03056, Ukraine.

Method of calculation of temperatures of warming-up of constructions of cylindrical electro-acoustic transducer of the compensated type, pressurized by the metal-polymer layers

The technique for the calculation of cylindrical electro-acoustic transformers constructions warming-up temperature on the basis of Fourier heat-conducting differential equation decision are worked out. The technique considers features of transformers pressurizing by metal-polymer layers widespread method designer realization and can be applied to the constructions of compensated type transformers. The system of five endless on a height layers in which piezoceramics is in the middle, and layers of polymeric materials and metal there are on either side is taken as a calculation model. The heat-conducting equation decision by means of which it is possible to define temperatures in the different points of transformer layers is found. On the basis of the got correlations it was set, that in the transformer construction polymeric shells there is a considerable overfall of temperatures, which can lead to their destruction because of temperature mechanical tensions origin. Reference 13, figures 3.

Keywords: electro-acoustic transducer, compensated construction, pressurizing, equalization of heat conductivity, temperature field.

References

1. D. Berlinkur, D. Kerran, G. Zhaffe. (1966), "Piezoelectric and piezomagnetic materials their application in transformers". 1A. pp. 205 – 326. (Rus.)
2. Bogorodskiy V.V., Korepin E.A., Ruchev M.V. (1977), "Estimation of losses in electromechanics transducers". Akusticheskiy zhurnal. Vol.23, No4, pp. 539 – 543. (Rus.)
3. Bolkisev A.M., Karlash V.L., Shulga N.A. (1984), "About dependence of properties of piezoceramic materials on a temperature". Prikladnaya mehanika. Vol. 20, No7. P.. 70–74. (Rus.)
4. Dldkovskiy V.S., Leyko O.G., Savln V.G. (2006), "Electroacoustic piezoceramic transducers (calculation, design, construction)". Kirovograd: Imeks-LTD, p. 448. (Ukr.)
5. Dldkovskiy V.S. and others. (2003), "Workshop on technical acoustics: Tutorial". Kiyiv: P. 191. (Ukr.)
6. Kuhling H. (1985), "Handbook on the Physics". M. Mir. P. 520. (Rus.)
7. Miheev M.A., Miheeva I.M. (1977), "Bases of heat transfer". M.: Energiya. P. 343. (Rus.)
8. V.V. Bogorodskiy, L.A. Zubarev, E.A. Korepin, V.I. Yakushev. (1983), "Underwater electroacoustic transducers. (Calculation and Design)". Handbook. Sudostroenie. P. 248 P. (Rus.)
9. E.G. Smazhevskaya, N.B. Feldman, L.V. Golovanov (1971), "Piezoelectric ceramics". M. Sovetskoe radio. P. 200. (Rus.)
10. A.P. Babichev, N.A. Babushkina, A.M. Bratkovskiy I.S. Grigorev and others. (1991), "Physical values: reference book". M.: Energoatomizdat. P. 1232. (Rus.)
11. Hmelev V.N., Barsukov R.V., Tsyiganok S.N. (1997), "Ultrasonic size treatment of materials: the scientific monograph". Barnaul: izd. AltGTU. P. 120. (Rus.)
12. Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V. (2006), "Piezoelectric sensors". M.: Tehnosfera, P. 632. (Rus.)
13. Shneyder P. (1960), "Engineering problems of heat conductivity". M.: Izdatelstvo inostrannoy literaturyi. P. 478.(Rus.)