

S.K. Nysanbaeva<sup>1</sup>, G.K. Turlybekova<sup>1</sup>, Kh.R. Maylina<sup>1</sup>, N.K. Manabaev<sup>1</sup>,  
T.K. Omarov<sup>2</sup>, F.T. Myrzacheva

<sup>1</sup>Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpaev, Almaty

<sup>2</sup>Kazakh National Academy of arts named after T. Zhurgenov, Almaty

## RESEARCH OF THE ULTRASONIC ABSORPTION COEFFICIENT IN CONDENSED STATES ON ACOUSTIC INTERFEROMETER

**Abstract.** All acoustic interferometers, known from numerous publications, allowed to measure the sound absorption coefficient in the sound frequency range. However, the development of further researches, for example, for thin-film nanocomposite materials, required measurements in the ultrasonic frequency range. In the given work it was considered a measuring method of sound absorption coefficient, which allows to research the sound absorption coefficient in ultrasonic frequency range. The acoustic interferometer made for these studies corresponds with the International Standard ISO 10534-2: 1998. (American Society for Testing of Materials in the Association ASTM E1050-12). The results of measurement the ultrasonic absorption coefficient in condensed states in comparison with calculated data showed good agreement. This interferometer allows to measure sound and ultrasonic absorption in thin-film nanocomposite materials.

**Key words:** acoustic interferometer, sound absorption coefficient, acoustic impedance, thin-film nanocomposite material.

УДК 538.953

С.К. Нысанбаева<sup>1</sup>, Г.К. Турлыбекова<sup>1</sup>, Х.Р. Майлина<sup>1</sup>,  
Н.К. Манабаев<sup>1</sup>, Т.К. Омаров, Ф.Т. Мырзашева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НАО КазННТУ им. К.И. Сатпаева, г. Алматы;

<sup>2</sup>КазНАИ им. Т. Жургенова

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ НА АКУСТИЧЕСКОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

**Аннотация.** Все акустические интерферометры, известные по многочисленным публикациям, позволяли измерять коэффициент звукопоглощения в звуковом диапазоне частот. Однако развитие дальнейших исследований, например, для тонкопленочных нанокompозитных материалов, потребовало измерений в ультразвуковом диапазоне частот. В данной работе рассматриваются методика измерения коэффициента звукопоглощения, позволяющая исследовать КЗП (коэффициент звукопоглощения) в ультразвуковом диапазоне частот. Акустический интерферометр, выполненный для данных исследований, соответствует Международному стандарту ISO 10534-2: 1998г. (Американское общество по испытанию материалов в Ассоциации ASTM E1050-12). Результаты измерения коэффициента ультразвукового поглощения в конденсированных средах, сравниваемые с расчетными данными, показали достаточное их согласие. Данный интерферометр позволяет проводить измерения звукового и ультразвукового поглощения в тонкопленочных нанокompозитных материалах.

**Ключевые слова:** акустический интерферометр, коэффициент звукопоглощения, акустический импеданс, тонкопленочный нанокompозитный материал.

*Общие понятия и описание акустического интерферометра*

При попадании звуковой волны на звукопоглощающую часть ее энергии поглощается, а часть отражается.

В этом случае коэффициент звукопоглощения имеет вид,

$$\alpha = \frac{E_{\text{пад.}}}{E_{\text{нагл.}}},$$

где  $E_{\text{нагл.}}$  — доля энергии, поглощенной данным материалом,  $E_{\text{пад.}}$  — энергия падающей звуковой волны,  $\alpha$  — коэффициент звукопоглощения. Результаты оценки коэффициента звукопоглощения изложены в работах [1-5].

Поведение звуковой волны может быть характеризовано акустическим импедансом образца  $Z_n$ . Акустический импеданс образца определяется как отношение звукового давления, действующего на поверхность образца к соответствующей скорости частицы, перпендикулярной к поверхности. Так как звуковое давление и скорость частицы не всегда перпендикулярны к поверхности образца, то нормальный акустический импеданс может быть комплексным и может быть записан как сумма действительных и мнимых частей, то есть:  $Z_n =$  (компонент имеющий сопротивление) +  $j$  (реактивный компонент). Поэтому для трубы постоянной волны мы имеем:

$$Z_n = \frac{P_i + P_r}{V_i + V_r}, \quad (1)$$

где  $P_i$  и  $P_r$  — звуковое давление падающей и отраженной волн,  $V_i$  и  $V_r$  — их соответствующие скорости частиц. Теперь  $p$  и  $V$  связаны с характерным импедансом воздуха,  $\rho c$  в пределах трубы. Эту величину иногда называют удельным акустическим импедансом воздуха. Для температуры воздуха 20°C и стандартного атмосферного давления 101,3 кПа, плотности воздуха  $\rho = 1,21 \text{ кг} / \text{м}^3$  и скорости звука - 343 м/с, стандартный акустический импеданс воздуха равен  $415 \text{ кг} / \text{м}^2 \cdot \text{с}$ . Поэтому,

$$p_i = \rho \cdot c \cdot V_i \quad (2)$$

$$p_r = \rho \cdot c \cdot (-V_r) \quad (3)$$

Следовательно,

$$Z_n = \left( \frac{p_i + p_r}{p_i - p_r} \right) \cdot \rho \cdot c \quad (4)$$

$$Z_n = \left( \frac{1 + \frac{p_r}{p_i}}{1 - \frac{p_r}{p_i}} \right) \cdot \rho \cdot c \quad (5)$$

Теперь  $P_i$  и  $P_r$  связаны следующим выражением:

$$p_r = p_i \cdot R \cdot \exp(j\Delta) \quad (6)$$

где  $R$  — модуль коэффициента отражения,  $\Delta$  — фаза коэффициента отражения. Поэтому,

$$Z_n = \left( \frac{1 + R \cdot \exp(j\Delta)}{1 - R \cdot \exp(j\Delta)} \right) \cdot \rho \cdot c \quad (7)$$

Это уравнение может быть написано, как

$$Z_n = (\text{Re}(Z_n) + j \text{Im}(Z_n)) \cdot \rho \cdot c \quad (8)$$

Откуда можно показать, что,

$$\text{Re}(Z_n) = \frac{1 - R^2}{1 + R^2 - 2R \cos \Delta} \quad (9)$$

$$\operatorname{Re}(Z_n) = \frac{2R \sin \Delta}{1 + R^2 - 2R \cos \Delta} \quad (10)$$

Акустический импеданс может быть определен, если известен коэффициент отражения  $R$  и угол фазы  $\Delta$ . Коэффициент отражения может быть определен:

$$R = \frac{n-1}{n+1}$$

Чтобы определить угол фазы, необходимо рассмотреть величины  $P_r$  и  $P_i$  как векторы, вращающиеся в направлениях, обозначенных на рисунке 1 угол фазы между векторами,  $\Delta$ .

Запишем  $P_r$  и  $P_i$  соответственно, как:

$$p_r = A \exp(j2\pi ft) \quad (11)$$

$$p_r = B \exp \left[ j \left( 2\pi ft - 2\pi f \frac{2y}{c} \Delta \right) \right] \quad (12)$$

где,  $c = f\lambda$ .

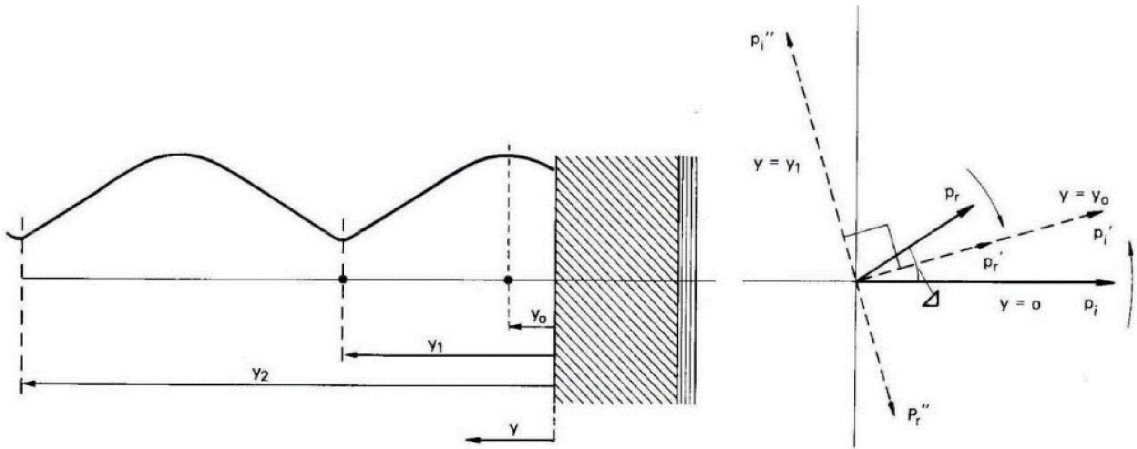


Рисунок 1 - Векторная диаграмма, показывающая отношения фазы между прямым  $P_i$  и отраженным

$P_r$  давлениями волны

Тогда, поделив уравнение (12) на уравнение (11), получим:

$$p_r = \frac{B}{A} p_i \exp \left[ -j \left( 4\pi \frac{y}{c} - \Delta \right) \right] \quad (13)$$

$p_r$  это минимум для

$$\frac{4\pi y_i}{\lambda} - \Delta = \pi \quad (14)$$

$$\Delta = \left( \frac{4y_i}{\lambda} - 1 \right) \pi \quad (15)$$

На расстоянии  $Y_o$ , перед образцом угол фазы между прямой и отраженной волной равен нулю. Как показано на рисунке 1,  $Y_o$  – положительная величина для положительного и отрицательного  $\Delta$ . В этой точке давление максимальное. Отрицательное значение  $Y_o$  означает, что максимум давления расположен в пределах образца, между поверхностью образца и твердого металлического конца трубы. Максимальное звуковое давления происходит на расстоянии  $Y_1$ , где эти два вектора на рисунке 1 составляют  $180^\circ$  или  $\pi$  радиан в фазе.

Длину волны  $\lambda$  можно измерить с помощью осциллятора. В случаях, где второй минимум может быть измерен на расстоянии  $Y_2$ , расстояние  $Y_2 - Y_1$  приводит к половине длины волны так, чтобы уравнение (15) стало:

$$\Delta = \left( \frac{2y_i}{Y_2 - Y_1} - 1 \right) \pi \quad (16)$$

Зная  $\Delta$  и коэффициент поглощения  $\alpha$ , реактивные части, имеющие сопротивление нормального акустического импеданса, могут быть найдены из рисунка 1, или вычисляя реальные и мнимые части в уравнениях (11) и (12).

Акустический интерферометр соответствовал Международному стандарту ISO 10534-2: 1998г. (Американское общество по испытанию материалов в Ассоциации ASTM E1050-12) [6,7] рис. 2.



Рисунок 2 – Акустический интерферометр

Акустический интерферометр состоит из:

- 2 микрофона PCB 377B02;
- Динамик JBL 2426J;
- Импедансная труба.

Акустический материал нужно вырезать так, чтобы твердая пластина соответствовала внешнему диаметру держателя, и мягкая поддержка соответствовала внутреннему диаметру держателя как показано на рисунке 3.

Устанавливая материал таким образом, фронтальная пластина твердо закрепляется. Зажим закрепления, должен быть сильно ввернут, чтобы предотвратить появление колебаний.

В таблице 1 представлено сравнение экспериментальных и расчетных данных по определению коэффициента звукопоглощения.

Для проверки акустического интерферометра было проведено сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными (рис 4) [10,11].

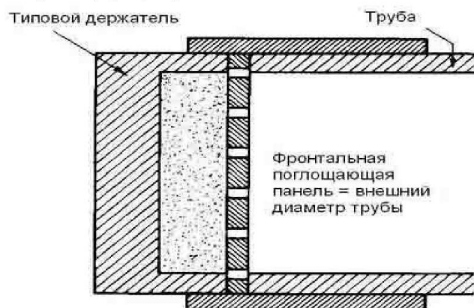


Рисунок 3 - Установка поглощающего материала в трубе

Таблица 1 - Сравнительная таблица коэффициента звукопоглощения железа

Частота (Гц)	Коэффициент звукопоглощения на интерферометре	Коэффициент звукопоглощения теоретические расчеты	погрешность
350	0.242	0.223	0.019
500	0.1911	0.181	0.0101
620	0.173	0.165	0.008
800	0.162	0.153	0.009
1000	0.107	0.115	-0.008
1400	0.0749	0.084	-0.0091
1800	0.091	0.085	0.006
2000	0.075	0.069	0.006
2300	0.075	0.072	0.003

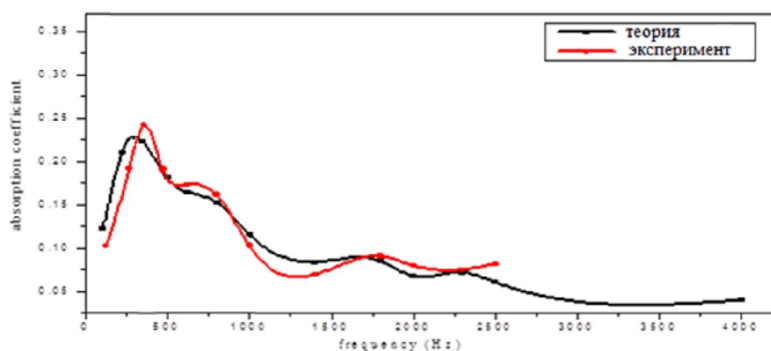


Рисунок 4 - Экспериментальные и расчетные данные по коэффициенту звукопоглощения

*Метод определения акустических характеристик в акустическом интерферометре*

Труба предназначена для измерений коэффициентов поглощения звука и удельного акустического импеданса образцов звукопоглощающих материалов с круглым сечением. Прибор работает в частотном диапазоне от 800 до 4000 Гц.

Прибор используется вместе с генератором синусоидального сигнала и частотным анализатором или измерительным усилителем и фильтром.

Измерения проводятся методом стоячей волны, в котором громкоговоритель устанавливает звуковое поле в трубе, с образцом на конце.

который будет исследован. Из-за отражения от образца в трубе образуются интерференционная картина. Измеряя отношение между максимальным и минимальным звуковым давлением, может быть рассчитан коэффициент поглощения образца. Измеряя расстояние между поверхностью образца и минимумом и максимумом давления, легко рассчитывается акустический импеданс образца. Поскольку метод измерения требует плоских звуковых волн в трубе диаметр образца не должен быть больше, чем половина длины звуковой волны.

*Измерение коэффициента звукопоглощения*

Труба, с идеальным отражателем, на концах которого расположен звукопоглощающий материал, представлен на рисунке 5.

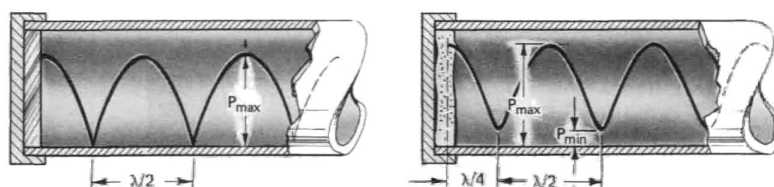


Рисунок 5 - Труба постоянной волны

Всю работу можно разделить на два этапа:

- -генерирование широкополосного шума и получения сигнала с двух микрофонов;
- математические вычисления;

На первом этапе выбирается необходимый частотный диапазон от 800 Гц до 4000 Гц. Этот выбор позволяет пользователю изменить частоту дискретизации в зависимости от его требований. В следствие широкополосный спектр шума создается для возбуждения во всем спектре частот.

Первый раздел включает в себя также получение сигнала с двух микрофонов, важно правильно откалибровать микрофоны.

Второй раздел посвящен математической обработке в MATLAB. Теоретические основы в данном приложении могут быть легко обобщены: стационарные плоские волны, создаваемые внутри трубы, измеряются внутри импедансной трубы, измеряются микрофонами в двух точках, расположенными между собой на расстояние  $S$  и на расстояние  $L$  от тестируемого материала (рисунок 6)

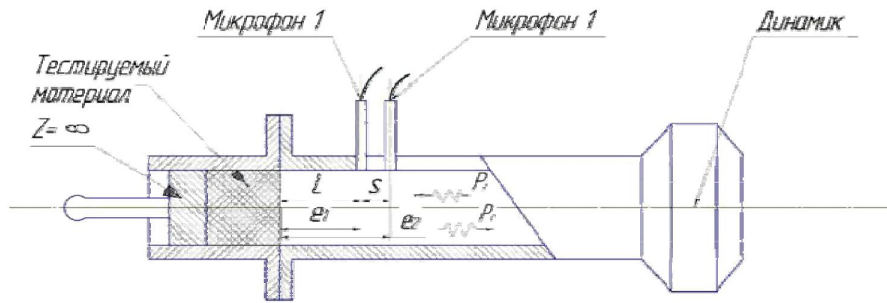


Рисунок 6 – Импедансная труба

Переменное избыточное давление, возникающее в упругой среде при прохождении через неё звуковой волны:

$$p_1(f) = A(f) \cdot e^{ike_1} + B(f) \cdot e^{-ike_1} \quad (17)$$

$$p_2(f) = A(f) \cdot e^{ike_2} + B(f) \cdot e^{-ike_2} \quad (17a)$$

$$k = \frac{2\pi f}{c_0} \quad (18)$$

где  $A$  и  $B$  зависят от частоты прямой и обратной волны,  $k$  волновое число, и  $j = \sqrt{-1}$ .  $p_1(f)$ ,  $p_2(f)$  сигнал улавливаемый из двух микрофонов. Коэффициент отражения можно вычислить из измеренной передаточной функции между двумя микрофонами. То есть, разделив давления, полученные от двух микрофонов, вычисляем функцию,  $H_{12}(f)$  [8,9].

$$H_{12}(f) = \frac{e^{ike_2} + R(f)e^{-ike_2}}{e^{ike_1} + R(f)e^{-ike_1}} \quad (19)$$

В дальнейшем из передаточной функции легко получить коэффициент отражения  $H_{12}(f)$ .

$$R(f) = \frac{H_{12} - e^{-iks}}{e^{iks} - H_{12}} e^{i2k(L+S)} \quad (20)$$

Из коэффициента отражения мы можем получить коэффициент звукопоглощения:

$$\alpha(f) = 1 - |R(f)|^2 \quad (21)$$

В вышеупомянутых выражениях  $\rho_0$  плотность воздуха,  $c_0$  скорость звука в воздухе. Следует отметить, что коэффициент поглощения, который мы нашли выше, является вещественной частью. Следующая схема показывает последовательность, сопровождаемую, чтобы вычислить акустические свойства материалов (рисунок 7)



Рисунок 7 – Последовательность расчетов

**Выводы:** Выполненный в данной работе акустический интерферометр, позволяет выполнять измерения ультразвуковых характеристик в конденсированных средах, в том числе и в тонкопленочных нанокompозитных материалах. Полученные результаты измерений показали хорошее согласие с теоретическими расчетами.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Омаров С.С. Инженерная акустика. Учебник. //КазГАСА./ МОН. –2002.
- [2] Тукибаева М.А., Нысанбаева С.К., Коноваленко Е. Расчет скорости звука в бетонах. //Труды I Международной научной конференции «Инновационные технологии и передовые решения» I том. – Бишкек, 2013, май 16-17. – С. 306-309.
- [3] Омаров С.С., Бегимов Т.Б., Тукибаева Р.М., Рахматуллаев Р.М. Оценка коэффициента звукопоглощения при взаимодействии ультразвуковых колебаний с твердыми кристаллическими веществами. // «Вестник КазНТУ им. К.И. Сатпаева» . – 2013.– № 1 (95). – С. 172-175.
- [4] Омаров С.С., Тукибаева М.А., Нысанбаева С.К., Аманжолова А.А. Оценка амплитудного пространственного коэффициента звукопоглощения в кристаллических структурах. // Труды международной научно-практической конференции «Сатпаевские чтения». – Алматы, 2013. – С.538-541.
- [5] Боголепов И.И. Архитектурная акустика. Учебник-справочник. – Судостроение, СПб, 2001.
- [6] Daniel Castro. Application for measuring material acoustic properties in an impedance tube, 2010.
- [7] ASTM E1050, Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones, and a digital frequency analysis system.
- [8] Seybert, A. F., and Ross, D. F., Experimental Determination of Acoustic Properties Using a Two-Microphone Random-Excitation Technique, J. Acoust. Soc. Am., Vol.61, No.5, pp.1362-1370, 1977.
- [9] Chung, J. Y., and Blaser, D. A., Transfer Function Method of Measuring In-Duct. Acoustic Properties I. Theory and II. Experiment, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 68, No.3, pp. 907-921, 1980.
- [10] С.С. Омаров, С.К. Бейсен, С.К. Нысанбаева, М.А. Тукибаева, Г.К. Турлыбекова, Ультразвуковое поглощение в тонкопленочных нанокompозитных материалах  $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{SiO}_2\text{NiFe}$  (d) Ta,  $\text{SiO}_2\text{NiFe}$  (d) Ru. Известия НАН РК, серия физико-математическая, №3 (307), С.99-106., 2016г.
- [11] Nyssanbayeva S. K., Omarov S. Acoustic Studies of Thin Film Composite Materials, International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Vol.11, Number 5 (2016) pp 3438-3441.

## REFERENCES

- [1] Omarov S. S. Engineering acoustics. Textbook. //KazGASA./ MES. –2002.
- [2] Tukibaeva M.A., Nysanbaeva S.K., Konovalenko E. Calculation of the speed of sound in concretes. // Proceedings of the First International Scientific Conference. «Innovative technologies and advanced solutions», volume I. – Bishkek, 2013, may 16-17. – P. 306-309.
- [3] S. Omarov, T. Begimov, M. Tukibaeva, R. Rahmatullaev. Estimation of absorption coefficient in the interaction of ultrasound with crystalline substances. ISSN 1680-9211. «KazNTU Bulletin», №1(95) 2013, p. 172-175.
- [4] Omarov S.S., Tukibaeva M.A., Nysanbaeva S.K., Amanzholova A.A. Estimation of the amplitude spatial coefficient of sound absorption in crystalline structures. // Proceedings of the international scientific-practical conference "Satpaev Readings" . – Almaty, 2013. – P.538-541.
- [5] Bogolepov I.I. Architectural acoustics. Textbook-reference. – Sudostroenie, SPb, 2001.
- [6] Daniel Castro. Application for measuring material acoustic properties in an impedance tube, 2010.
- [7] ASTM E1050, Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones, and a digital frequency analysis system.
- [8] Seybert, A. F., and Ross, D. F., Experimental Determination of Acoustic Properties Using a Two-Microphone Random-Excitation Technique, J. Acoust. Soc. Am., Vol.61, No.5, pp.1362-1370, 1977.
- [9] Chung, J. Y., and Blaser, D. A., Transfer Function Method of Measuring In-Duct. Acoustic Properties I. Theory and II. Experiment, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 68, No.3, pp. 907-921, 1980.
- [10] S.Omarov, S. Baishan, S. Nysanbaeva, M. Tukibaeva, G. Turlybekova, Ultrasonic absorption in  $\text{Co}_x\text{Ni}_1-x$ .

$x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{SiO}_2/\text{NiFe}$  (d) Ta,  $\text{SiO}_2/\text{NiFe}$  (d) Ru thin-film nano-composite materials. News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan physic-mathematical series, Volume 3, number 307, P.99-106., 2016.

[11] Nysanbayeva S. K., Omarov S. Acoustic Studies of Thin Film Composite Materials, International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Vol.11, Number 5 (2016) p. 3438-3441.

ӘОЖ: 538.953

**С.Қ. Нысанбаева<sup>1</sup>, Г.Қ. Тұрлыбекова<sup>1</sup>, Х.Р. Майлина<sup>1</sup>,  
Н.К. Манабаев<sup>1</sup>, Т.К. Омаров, Ф.Т. Мырзашева<sup>2</sup>**

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан;  
Т. Жүргенов атындағы Қазақ ұлттық өнер академиясы, Алматы қ., Қазақстан

### **АКУСТИКАЛЫҚ ИНТЕРФЕРОМЕТРДЕ КОНДЕНСИРЛЕНГЕН ОРТАЛАРДАҒЫ УЛЬТРАДЫБЫСТЫҚ ЖҰТЫЛУ КОЭФФИЦИЕНТІН ЗЕРТТЕУ**

**Аннотация.** Көптеген жарияланымдар арқылы белгілі акустикалық интерферометрлер дыбыс жиілігі диапазонындағы ғана дыбыс жұтқыштық коэффициентін өлшеуге мүмкіндік берді. Бірақ, ары қарай зерттеулер, мысалы, жұқа қабыршықты нанокөпозитті материалдарды зерттеу үшін, жиіліктің ультрадыбыстық диапазонындағы өлшеулер қажет болды. Аталған жұмыста дыбыс жұтқыштық коэффициентін жиіліктің ультрадыбыстық диапазонында зерттеуге мүмкіндік беретін әдіс қарастырылады. Осы зерттеулерге байланысты жасалған акустикалық интерферометр ISO 10534-2: 1998 ж. Халықаралық стандартына сай (ASTME1050-12 Ассоциациясындағы материалдарды зерттеу бойынша Америкалық қоғамдастық). Конденсирленген орталардағы ультрадыбыстық жұту коэффициентін өлшеу нәтижелерін теориялық есептеулерімен салыстыру, олардың жеткілікті түрде сәйкес келетіндігін көрсетті. Берілген акустикалық интерферометрде жұқа қабыршықты нанокөпозитті материалдардың дыбыстық және ультрадыбыстық диапазонындағы дыбыс жұтқыштық коэффициентін өлшеуге мүмкіндік береді.

**Түйін сөздер:** акустикалық интерферометр, дыбыс жұтқыштық коэффициенті, акустикалық импеданс, жұқа қабыршықты нанокөпозитті материал.