

О.Ш. Хакимов<sup>1</sup>, А.А. Даминов<sup>2</sup>, Н.А. Курбанов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИИ стандартизации, метрологии и сертификации Агентства “Узстандарт”, Ташкент

<sup>2</sup> ГП “Узбекский национальный институт метрологии”, Ташкент

## НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРОВ, ОЦЕНЕННЫХ В НЕРАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ

Описаны математические модели измерения коэффициента затухания и скорости распространения ультразвука (УЗ) в движущихся относительно преобразователей УЗ волокнах и плёнках, оценены неопределённости результатов их измерений в полипропиленовом волокне. Описаны иммерсионные ультразвуковые преобразователи для возбуждения и приема УЗ в движущихся материалах, разработанные авторами в трех вариантах. Отмечено, что преобразователи с регулируемым углом (варианты «b» и «c») более эффективны по сравнению с преобразователями, где угол остается неизменным (вариант «a»). С целью эффективной передачи ультразвука от пьезоэлемента к контролируемому материалу, предложено корпус изготавливать из материала с акустическим импедансом близким к акустическому импедансу контролируемого материала. Для использования пьезоэлемента на высоких температурах (от 20 °С до 200 °С), он снабжен специальным термоизоляционным кожухом и “рубашкой” из охлаждающей иммерсионной жидкости.

**Ключевые слова:** модель, акустика, ультразвук, импульсный, ориентированный полимер, неравновесное состояние, погрешность, неопределенность, вариация.

### Введение

**Постановка проблемы.** Акустические характеристики, такие как скорость распространения  $c$  и коэффициент затухания  $\alpha$  ультразвука (УЗ) ориентированных полимеров (полимерные волокна, нити, пленок), как известно, определяются в основном их молекулярной структурой и термодинамическим состоянием [1–2], и в большинстве случаев не могут быть вычислены теоретически. Поэтому большое внимание уделяется экспериментальному определению этих величин. Для этих целей используются различные методы измерения, в том числе импульсные ультразвуковые [1; 3] (далее – импульсные).

**Анализ последних достижений, публикаций и формулирование цели статьи.** Разработке ультразвуковых методов и приборов для контроля и исследования материалов, веществ и изделий уделяется достаточно большое внимание. Существующие конструкции ультразвуковых преобразователей не позволяют с достаточной надежностью, точностью и достоверностью оценить возбуждение и прием ультразвука в волокнах и плёнках при их движении относительно преобразователей. Решению этих проблем и оцениванию неопределённости акустических характеристик ориентированных полимеров в неравновесном состоянии посвящена излагаемая ниже работа.

### Изложение основного материала

Преобразователи, применяемые для излучения и приема ультразвука в неподвижном материале,

непригодны для движущихся материалов. Основная причина этого – возбуждение шумового сигнала в приемном преобразователе, уровень которого в несколько раз превышает уровень полезного сигнала. Имеющиеся [3] преобразователи для контроля движущихся материалов по определенным причинам не нашли широкого применения. Для этой цели нами разработан ряд преобразователей ультразвука [4].

Иммерсионные ультразвуковые преобразователи для возбуждения и приема упругих колебаний в движущихся материалах были разработаны в трех вариантах:

- а) с постоянным углом ввода (приема) ультразвуковых сигналов в контролируемый объект;
- б) с регулируемым углом при нормальных (не высоких) температурах;
- в) с регулируемым углом при высоких температурах (рис. 1).

Преобразователи с регулируемым углом более эффективны по сравнению с преобразователями, где угол остается неизменным, в связи с чем в акустической установке для непрерывного контроля движущихся волокон и пленок в неравновесном состоянии нами использован именно этот преобразователь.

Изменение угла ввода ультразвука достигается путем изменения положения фокусирующего пьезоэлемента 5 (рис. 1) посредством изменения положения держателя 6 пьезоэлемента на дугообразной направляющей 4 механизма поворота и перемещения. Фокусирующий пьезоэлемент 5, совместно с механизмом перемещения его вдоль собственной

акустической оси, позволяют концентрировать ультразвуковые колебания на поверхности или внутри контролируемого объекта 1 как в виде точки (для нитей и волокон), так и в виде поперечной линии (для пленок).

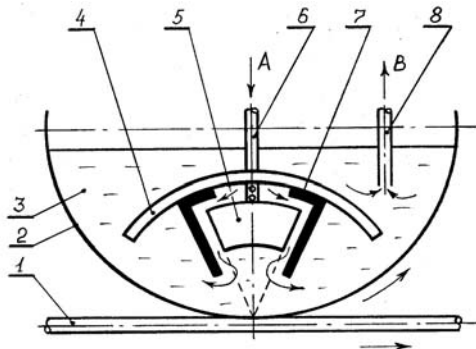


Рис. 1. Иммерсионный ультразвуковой преобразователь с регулируемым углом для использования при высоких температурах:

1 – контролируемый объект; 2 – вращающийся цилиндрический корпус; 3 – иммерсионная жидкость; 4 – направляющая для регулировки угла ввода (приема) зондирующих сигналов; 5 – фокусирующий пьезоэлемент; 6 – держатель пьезоэлемента; 7 – термоизоляционный кожух пьезоэлемента; 8 – патрубок забора иммерсионной жидкости для ее охлаждения; А – подвод, В – отвод охлаждающей иммерсионной жидкости

При контроле материала вал вращающегося цилиндрического преобразователя, как и установленный на нем пьезоэлемент, остаются неподвижными, чем достигается стабильная амплитуда волны, возбуждаемой в контролируемом объекте. С целью эффективной передачи ультразвука от фокусирующего пьезоэлемента 5 через слой иммерсионной жидкости 3 и цилиндрический корпус 2 к контролируемому материалу 1, корпус 2 желательно изготовить из материала с акустическим импедансом близким к акустическому импедансу контролируемого материала.

Специально для получения возможности контроля акустических характеристик движущихся материалов при высоких температурах была разработана иная конструкция иммерсионного преобразователя (рис. 1), в котором работоспособность пьезоэлемента 5 от воздействия высоких температур защищена специальным термоизоляционным кожухом 7 и “рубашкой” из охлаждающей иммерсионной жидкости. Оптимальным, с точки зрения работоспособности такого преобразователя, будет режим, когда температура пьезоэлемента 5 находится в рабочем диапазоне (например, 20 °С), рабочая температура контролируемого объекта 1 и цилиндрического корпуса 2 преобразователя равны (например,

200 °С), а изменение температуры слоя иммерсионной жидкости 3 по пути прохождения зондирующих сигналов от пьезоэлемента 5 до корпуса 2 поддерживается в диапазоне соответствующих им температур (от 20 °С до 200 °С).

Оптимальный температурный режим поддерживается путем частичного забора (поток В) иммерсионной жидкости 3 и последующим ее возвратом (поток А) через держатель 6 в корпус 2 преобразователя после ее охлаждения (термостатирования).

Скорость  $c$  распространения и коэффициент  $\alpha$  затухания ультразвука в контролируемом объекте рассчитывают по формулам

$$c = \frac{\Delta L}{\Delta t}, \quad \alpha = \frac{1}{\Delta L} \ln \left( \frac{U_2}{U_1} \right), \quad (1)$$

где  $\Delta L = L_1 - L_2$ ;  $\Delta t = t_1 - t_2$ ;

$$U_1 = U_0 \cdot e^{-(\alpha \cdot L_1 + \gamma_1)}, \quad (2)$$

$$U_2 = U_0 \cdot e^{-(\alpha \cdot L_2 + \gamma_2)}, \quad (3)$$

$$t_1 = t_0 + \frac{L_1}{c}, \quad t_2 = t_0 + \frac{L_2}{c}, \quad (4)$$

$t_1$ ,  $U_1$  и  $t_2$ ,  $U_2$  – время задержки и амплитуда сигнала при базах прозвучивания  $L_1$  и  $L_2$  соответственно;

$L_1$  и  $L_2$  – расстояние между точками приема и излучения;

$\gamma_1$  и  $\gamma_2$  – затухания волны на границах раздела первого и второго приемника с образцом. Экспериментально можно достичь равенства  $\gamma_1 = \gamma_2$  и для расчета  $\alpha$  и  $c$ , получить формулы

$$\alpha = \frac{1}{\Delta L(1 + \varepsilon)} \ln \left( \frac{U_2}{U_1} \right), \quad (5)$$

$$c = \Delta L(1 + \varepsilon) / \Delta t, \quad (6)$$

где

$$\Delta L = L_1 - L_2, \quad \Delta t = t_1 - t_2.$$

Таким образом, возбуждая в образце УЗ импульсы излучателем и синхронно регистрируя в точках приема  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  значения величин  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  и относительной деформации  $\varepsilon$  исследуемого объекта, по формулам (1–6) можно определить акустические характеристики материала.

Используя описанную методику измерения и предложенную установку, определены акустические характеристики поликапроамидного волокна непосредственно в процессе его нагружения и ползучести, т.е. при неравновесном состоянии, и оценены их неопределенности в соответствии с [5].

Суммарная стандартная неопределенность измерения: разности  $\Delta t = t_1 - t_2$  времен распространения УЗВ от излучателя к первому и второму приемникам сигналов, оцененная по формуле (12), составила 1,4 мкс; а разность  $\Delta L = L_1 - L_2$  расстояний между

излучателем и первым и вторым приемниками, рассчитанная по (11), – не более 2,8 мм.

$$u_c(\Delta t) = \sqrt{u^2(t_1) + u^2(t_2)}; \quad (7)$$

$$u_c(\Delta L) = \sqrt{u^2(L_1) + u^2(L_2)}. \quad (8)$$

Относительные суммарные стандартные неопределенности измерения скорости  $u_0(c)$  распространения и коэффициента затухания  $u_0(\alpha)$  ультразвука в движущихся волокнах и пленках оценены по формулам (9–12), и получены следующие значения:  $u(c)=1\%$ ,  $u(\alpha)=10\%$ .

$$u_0(c) = \sqrt{u_0^2(\Delta L) + u_0^2(\Delta t)}, \quad (9)$$

$$u_0(\alpha) = \sqrt{u_0^2(\Delta L) + u_0^2(U_1) + u_0^2(U_2)}, \quad (10)$$

где 
$$u_0(\Delta L) = \frac{u_c(\Delta L)}{\Delta L}, \quad u_0(\Delta t) = \frac{u_c(\Delta t)}{\Delta t}, \quad (11)$$

$$u_0(U_1) = \frac{u(U_1)}{U_1}, \quad u_0(U_2) = \frac{u(U_2)}{U_2}. \quad (12)$$

Стандартная неопределенность измерения затухания УЗ частоты  $5.10^4$  Гц в полипроамидном волокне при нагружении со скоростью 0,4 м/с, и нагрузке 18 Н составила не более 0,1 Нп/м, а коэффициент вариации 3–8 %.

## Выводы

Из данного исследования следует, что стандартные неопределенности измерения затухания УЗ этим методом и предложенной установкой, не более 0,1 Нп/м, а коэффициент вариации 3–8 %. Для измерения затухания УЗ в процессе деформирования, ползучести и релаксации напряжения, а также при контроле непрерывно движущего образца целесообразно использовать иммерсионные ультразвуковые преобразователи с регулируемым углом, защищенные специальным термоизоляционным кожухом и “рубашкой” из охлаждающей иммерсионной жидкости.

## Список литературы

1. Михайлов И.Г. Основы молекулярной акустики / И.Г. Михайлов, В.А. Соловьев, Ю.П. Сырников. – М.: Наука, 1964. – 516 с.
2. Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров / Дж. Ферри. – М.: Изд-во иностр. литературы, 1963.
3. Мэзон У. Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультразвуковой акустике / У. Мэзон. – М.: Изд-во иностр. литературы, 1952. – 448 с.
4. А.с. 1670580 СССР, МКИ, G 01 N 29/00. Ультразвуковой преобразователь для контроля движущихся протяженных объектов / Хахимов О.Ш., Бурнаев А.Л., Орехов И.Е. – 3 с. Опубл. 1991. Бюл. № 31.
5. Руководство по выражению неопределенности измерения: Перевод с англ. под науч. ред. проф. В.А. Слаева. – ГП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». – С.-Петербург, 1999. – 134 с.

## References

1. Mikhailov, I.G., Soloviev, V.A. and Syrnikov, Yu.P. (1964), “*Osnovy molekulyarnoj akustyky*” [Basics of Molecular Acoustics], Nauka, Moscow, 516 p.
2. Ferry, J. (1963), “*Vjazkoupругhye svojstva polymerov*” [Viscoelastic properties of polymers], Publishing House of Foreign Literature, Moscow, 535 p.
3. Mason, U. (1952), “*P'ezoelektrycheskye krystally y ykh prymerenye v uljtraakustyke*” [Piezoelectric crystals and their use in ultrasonics], Publishing House of Foreign Literature, Moscow, 448 p.
4. Khakimov, O.Sh., Burnaev, A.L. and Orekhov, I.E. (1991), “*Uljtrazvukovoj preobrazovatelj dlja kontrolja dvyzhushykhhsja protjazhennykh ob'ektov*” [Ultrasonic Transducer for Monitoring Extended Objects], Byul. No. 31, G01 N29/00, USSR, Pat. No. 1670580.
5. Slaev, V.A. (1999), “*Rukovodstvo po vyrazheniju neopredelennosti yzmerenija*” [Guidance on the expression of measurement uncertainty], St. Petersburg, 134 p.

Поступила в редколлегию 18.10.2018  
Одобрена к печати 11.12.2018

### Відомості про авторів:

**Хахимов Ортаголі Шаріповіч**  
доктор технічних наук професор  
провідний науковий співробітник НДІ стандартизації,  
метрології та сертифікації Агентства “Узстандарт”,  
Ташкент, Узбекистан  
<https://orcid.org/orcid.org/0000-0001-8297-9213>

### Information about the authors:

**Ortagoli Khakimov**  
Doctor of Technical Sciences Professor  
Lead Researcher of the Research Institute  
of Standardization, Metrology and Certification  
of Uzstandart Agency,  
Tashkent, Uzbekistan  
<https://orcid.org/orcid.org/0000-0001-8297-9213>

**Дамінов Акбаржон Аліжоновіч**  
директор ДП “Узбецький національний  
інститут метрології”,  
Ташкент, Узбекистан

**Akbarzhon Daminov**  
Director of the State Enterprise “Uzbek National  
Institute of Metrology”,  
Tashkent, Uzbekistan

**Курбанов Не'матжон Абдурасулович**  
науковий співробітник ДП “Узбецький  
національний інститут метрології”,  
Ташкент, Узбекистан

**Nematzhon Kurbanov**  
Research Associate of the State Enterprise  
“Uzbek National Institute of Metrology”,  
Tashkent, Uzbekistan

### НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ АКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРІЄНТОВАНИХ ПОЛІМЕРІВ, ОЦІНЕНИХ У НЕРІВНОВАЖНОМУ СТАНІ

О.Ш. Хакимов, А.А. Дамінов, Н.А. Курбанов

*Описано математичні моделі вимірювання коефіцієнта загасання і швидкості поширення ультразвуку (УЗ) в рухомих щодо перетворювачів УЗ волокнах і плівках, оцінені невизначеності результатів їх вимірювань в поліпроамідному волокні. Описано іммерсійні ультразвукові перетворювачі для збудження і прийому УЗ в рухомих матеріалах, розроблені авторами в трьох варіантах. Відзначено, що перетворювачі з регульованим кутом (варіанти “b” і “c”) більш ефективні в порівнянні з перетворювачами, де кут залишається незмінним (варіант “a”). З метою ефективною передачі ультразвуку від п'єзоелемента до контрольованого матеріалу, запропоновано корпус виготовляти з матеріалу з акустичним імпедансом близьким до акустичного імпедансу контрольованого матеріалу. Для використання п'єзоелемента на високих температурах (від 20 °C до 200 °C), він забезпечений спеціальним термоізоляційним кожухом і “сорочкою” з охолоджуючої іммерсійної рідини.*

**Ключові слова:** модель, акустика, ультразвук, імпульсний, орієнтований полімер, нерівноважний стан, похибка, невизначеність, варіація.

### THE UNCERTAINTY OF ACOUSTIC CHARACTERISTICS ORIENTED POLYMERS, ESTIMATED IN A NON-EQUAL CONDITION

O. Khakimov, A. Daminov, N. Kurbanov

*Mathematical models for measuring the attenuation coefficient and ultrasonic propagation velocity (US) in ultrasonic fibers and films moving relative to the transducer are described, and the uncertainties of the results of their measurements are estimated. The principles of operation and the design of ultrasonic transducers developed by the authors, which allow, with sufficient reliability, accuracy and reliability, the excitation and reception of ultrasound during their movement relative to the transducers are considered. The main disadvantages of existing ultrasonic transducers are shown, in particular, the excitation of a noise signal in a receiving transducer, the level of which is several times higher than the level of the useful signal. The immersion ultrasonic transducers for excitation and reception of elastic vibrations in moving materials, developed by the authors in three versions, are described: a) with a constant angle of input (reception) of ultrasonic probing signals into a controlled object; b) with adjustable angle at normal (not high) temperatures; c) with adjustable angle at high temperatures. Adjustable angle transducers (options “b” and “c”) are noted to be more efficient than converters where the angle remains unchanged (option “a”), and therefore in an acoustic installation for continuous monitoring of moving fibers and films in a nonequilibrium state, we used precisely these converters. They allow you to concentrate ultrasonic vibrations on the surface or inside the object under test, both as a point (for filaments and fibers) and as a transverse line (for films). In order to efficiently transmit ultrasound from the focusing piezoelectric element through the layer of immersion liquid to the controlled material, the body is proposed to be made of a material with acoustic impedance close to the acoustic impedance of the controlled material. In order to be able to control the acoustic characteristics of moving materials at high temperatures (from 20 °C to 200 °C), the piezoelectric element is protected by a special thermo-insulating casing and “jacket” of the cooling immersion liquid. Using the described measurement technique and the proposed setup, the acoustic characteristics (propagation speed and attenuation coefficient of ultrasound) of a polyacrylamide fiber in a non-equilibrium state were determined, and their uncertainties were estimated.*

**Keywords:** model, acoustics, ultrasound, pulsed, oriented polymer, nonequilibrium state, error, uncertainty.