

DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-2-164-176

Исследование акустическим методом упругих свойств листов из закрытоячеистых пенополиолефинов при статическом растяжении

О.П. Богдан¹, О.В. Муравьева^{1,2}, А.В. Блинова¹, Л.А. Денисов¹

¹Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия

²Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук,
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия

Поступила 02.03.2026

Принята к печати 27.04.2026

Широкое использование пенополиолефинов в стратегически важных отраслях промышленности обусловлено их высокими тепло-, звуко- и виброизоляционными свойствами, при этом в процессе применения эти материалы подвергаются различным механическим воздействиям, приводящим к их деформации и изменению свойств. Целью работы являлось исследование упругих свойств листов из закрытоячеистых пенополиолефинов разной кратности вспенивания при статическом растяжении с использованием акустического теневого амплитудного метода. В работе представлена методика экспериментальных исследований коэффициента прохождения акустической волны под воздействием статической растягивающей нагрузки, основанная на использовании амплитудного теневого метода, в процессе реализации которого производится одновременная регистрация амплитуды прошедшего сквозь лист пенополиолефина и значения статического растягивающего напряжения. Исследования коэффициента прохождения акустической волны проведены на листах из закрытоячеистых пенополиолефинов марки ISOLON 500 разной кратности вспенивания и толщины. Показано, что в процессе растяжения листов пенополиолефина наблюдаются две области: область упругости, в которой изменение относительного удлинения образца и изменение коэффициента прохождения акустической волны происходит линейно, и область текучести, в которой наблюдается нелинейная зависимость. Полученные результаты использованы для определения разрушающего растягивающего напряжения, модуля упругости и структурно-чувствительного параметра акустической тензометрии – коэффициента упругоакустической связи по прохождению, при этом наблюдалась существенная зависимость от направления приложения растягивающей нагрузки (вдоль и поперёк листа). Для подтверждения этих областей деформации листов пенополиолефина исследована восстанавливаемость образцов при нагрузках 30 % и 70 % от разрушающего растягивающего напряжения. Полученные результаты подтвердили, что при 30 % от разрушающего растягивающего напряжения наблюдается область упругости, при 70 % от разрушающего растягивающего напряжения – область текучести, а также позволили оценить степень восстановления упругих свойств образцов после снятия растягивающей нагрузки.

Ключевые слова: пенополиолефин, упругие свойства, акустический теневой метод, разрушение, статическое растягивающее напряжение

Адрес для переписки:

Блинова А.В.
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: anna.tarasovaaa@mail.ru

Address for correspondence:

Blinova A.V.
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Udmurt Republic, Russia
e-mail: anna.tarasovaaa@mail.ru

Для цитирования:

О.П. Богдан, О.В.Муравьева, А.В. Блинова, Л.А. Денисов.
Исследование акустическим методом упругих свойств листов
из закрытоячеистых пенополиолефинов при статическом
растяжении.
Приборы и методы измерений.
2026. Т. 17. № 2. С. 164–176.
DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-2-164-176

For citation:

Bogdan OP, Murav'eva OV, Blinova AV, Denisov LA.
Acoustic Investigation of Elastic Properties of Closed-Cell Polyolefin
Foam Sheets under Static Tension.
Devices and Methods of Measurements.
2026;17(2):164-176. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-2-164-176

DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-2-164-176

Acoustic Investigation of Elastic Properties of Closed-Cell Polyolefin Foam Sheets under Static Tension

O.P. Bogdan¹, O.V. Murav'eva^{1,2}, A.V. Blinova¹, L.A. Denisov¹

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia

²Udmurt Federal Research Center, of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia

Received 02.03.2026

Accepted for publication 27.04.2026

Abstract

Polyolefins are widely used in strategically important industries due to their high thermal, sound and vibration insulation properties. During the process of application these materials are subjected to various mechanical influences leading to their deformation and changes in properties. Aim of the work was to study the elastic properties of closed-cell polyolefin foam sheets with different foaming multiplicities under static tension using the acoustic shadow amplitude method. The paper presents a method for experimental studies of an acoustic wave transmission coefficient a static tensile load, based on the use of an amplitude shadow method. During the method implementation amplitude of the acoustic wave passed through the polyolefin foam sheet and the value of the static tensile stress are simultaneously recorded. Studies of the acoustic wave transmission coefficient were carried out on sheets of closed-cell polyolefin foam of the ISOLON 500 brand with different foaming multiplicity and thickness. It was shown that two regions are observed during the stretching of sheets of polyolefin foam: 1) the region of elasticity, in which changes both in the relative elongation of the sample and in the transmission coefficient of the acoustic wave occur linearly, and 2) the region of fluidity, in which a nonlinear dependence is observed. Results obtained were used to determine the destructive tensile stress, the modulus of elasticity, and the structurally sensitive parameter of acoustic strain measurement, the coefficient of elastic-acoustic coupling in transmission, while a significant dependence was observed on the direction of application of the tensile load (along and across the sheet). To confirm these areas of deformation of styrofoam sheets, the recoverability of samples under loads of 30 % and 70 % of the destructive tensile stress was studied. The obtained results confirmed that at 30 % of the ultimate tensile stress, the elastic region is observed, at 70 % of the ultimate tensile stress – the yield region; the results also enabled estimation of the specimens' elastic properties recovery degree after removal of the tensile load.

Keywords: polyolefin foam, elastic properties, acoustic shadow method, unevenness, structure

Адрес для переписки:

Блинова А.В.
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: anna.tarasovaaa@mail.ru

Address for correspondence:

Blinova A.V.
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Udmurt Republic, Russia
e-mail: anna.tarasovaaa@mail.ru

Для цитирования:

О.П. Богдан, О.В.Муравьева, А.В. Блинова, Л.А. Денисов.
Исследование акустическим методом упругих свойств листов
из закрытоячеистых пенополиолефинов при статическом
растяжении.
Приборы и методы измерений.
2026. Т. 17. № 2. С. 164-176.
DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-2-164-176

For citation:

Bogdan OP, Murav'eva OV, Blinova AV, Denisov LA.
Acoustic Investigation of Elastic Properties of Closed-Cell Polyolefin
Foam Sheets under Static Tension.
Devices and Methods of Measurements.
2026;17(2):164-176. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-2-164-176

Введение

Пенополиолефины (ППЛ) представляют собой пористые вспененные полимерные материалы с упругими свойствами, лежащими в широком диапазоне и определяющими область их применения. Существует большое разнообразие ППЛ, к числу которых относятся пенополиэтилен, пенополиуретан, пенопропилен, пеносэвилен и др. [1, 2]. Благодаря своим свойствам ППЛ применяют в качестве тепло-, шумо- и гидроизоляции внутри помещения [1].

Применение ППЛ реализуется в различных климатических условиях и внешних воздействиях, поэтому важно понимать, как при этом изменяются свойства материалов. Наиболее часто применяемым внешним воздействием на ППЛ является механическая деформация (статическое растяжение и сжатие). К тому же существуют нормативные документы, устанавливающие требования к испытаниям на механическое воздействия (например, испытания на растяжение регламентируют ГОСТ Р 54553-2019, ГОСТ ISO 37-2020, ГОСТ 15873-2017), в результате которых определяют прочность при растяжении и удлинение при разрыве, при этом отсутствуют сведения об изменении других физических свойств в процессе растяжения. Учитывая, что в большинстве областей применения ППЛ испытывают нагрузки растяжения и сжатия, приводящие к негодности материалов, важно понимать, как при этом изменяются их свойства и в каких пределах они могут выдержать эти нагрузки без последствий, следовательно, проведение исследований в этой сфере является актуальным.

В настоящее время проводятся исследования по влиянию состава и кратности вспенивания на механические свойства и деформацию ячеистой структуры химически сшитого пенополиэтилена [3–6], а также восстановление остаточной деформации в пенополиэтилене после старения в нагруженном состоянии [7]. Активно разрабатываются модели распространения акустических волн в пористо-упругих двухфазных материалах основанные на теории Био [8], модель структуры пористых материалов с малой объёмной долей содержания твёрдой фазы, состоящая из хаотически ориентированных 14-гранных ячеек [9], модель деформации полиэтилена

при одноосном растяжении, основанная на уравнении Эйринга [10]. Проводятся экспериментальные исследования по влиянию растяжения пористых материалов на вязкоупругие [11, 12] и механические (нормальная упругость, предел текучести, временное сопротивление разрыву) [13–14] свойства, а также исследования по оценке долговечности вспененных полиолефинов [15, 16] и прогнозированию деформационного поведения пористых материалов [17].

Целью работы являлось исследование упругих свойств листов из закрыто-ячеистых ППЛ разной кратности вспенивания при статическом растяжении с использованием акустического теневое амплитудного метода.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования изменения акустических свойств при статическом растяжении использован гидрофобный ППЛ типа ISOLON 500, представляющий собой физически радиационно сшитый и вспененный в вертикальной печи пенополиэтилен разной кратности вспенивания [18], изготовленный по ТУ 2244-037-00203476-2012, производитель АО «Ижевский завод пластмасс». Исследуемые образцы ППЛ выполнялись в виде двухсторонней лопатки (ГОСТ Р 54553-2019) (рисунок 1а). Свойства образцов представлены в таблице 1. Для проведения исследований изготовлено три однотипных образца из одного листа для каждой марки листа ППЛ.

Установка для исследования изменения акустических свойств ППЛ при внешнем статическом растягивающем напряжении представлена на рисунке 1б. В качестве информативного параметра при исследовании изменения акустических свойств в процессе растяжения ППЛ использован коэффициент прохождения акустической волны D через лист материала из закрытоячеистого ППЛ, определяемый по формуле [19, 20]:

$$D = \frac{U_{PPL}}{U_V} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где U_{PPL} – амплитуда акустической волны, прошедшей через лист ППЛ; U_V – амплитуда акустической волны, прошедшей через воздух в отсутствии листа ППЛ.

Таблица 1 / Table 1

Свойства исследуемых листов пенополиолефинов

Properties of the studied sheets of polyolefin foams

Марка Grade	Толщина h , мм Thickness h , mm	Кратность вспенивания K Foaming multiplicity K	Кажущаяся плотность ρ , кг/м ³ Apparent density ρ , kg/m ³	Разрушающее напряжение при растяжении σ_p , МПа Destructive tension during stretching σ_p , MPa (справочное) / (reference)	
				продольное направление longitudinal direction	поперечное направление transverse direction
ISOLON 500 3004	4.00 ± 0.01	30	33.6 ± 0.4	0.3	0.2
ISOLON 500 2003	3.50 ± 0.01	20	48.0 ± 0.5	0.5	0.4
ISOLON 500 1004	3.96 ± 0.01	10	93.2 ± 1.0	1.1	0.8

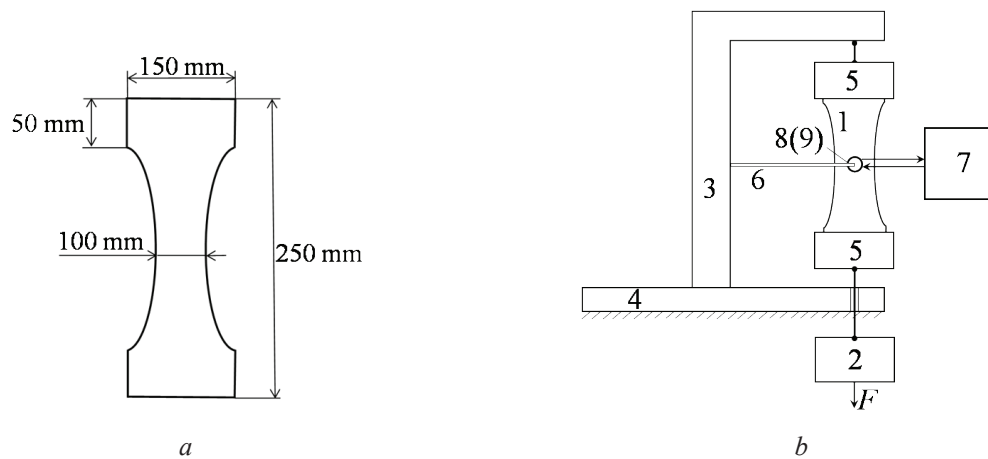


Рисунок 1 – Шаблон для подготовки образца пенополиолефина (а). Установка для измерения коэффициента прохождения акустической волны D через образец из закрытоячеистого пенополиолефина при внешнем статическом растягивающем напряжении σ (b): 1 – исследуемый образец пенополиолефина; 2 – блок, обеспечивающий растягивающее напряжение; 3 – направляющая балка; 4 – неподвижная опора; 5 – зажимные планки; 6 – рамка, обеспечивающая позиционирование излучателя и приёмника; 7 – акустический дефектоскоп для измерения коэффициента прохождения акустической волны D через образец из закрытоячеистого пенополиолефина; 8 – излучатель акустической волны; 9 – приёмник акустической волны

Figure 1 – Template for preparing a polyolefin foams sample (a). Installation for measuring the transmission coefficient D through a sheet of closed-cell polyolefin foams material under external static tensile stress σ (b): 1 – a polyolefin foams sample under study; 2 – a block providing tensile stress; 3 – a guide beam; 4 – a fixed support; 5 – clamping strips; 6 – a frame providing positioning emitter and receiver; 7 – acoustic flaw detector for measuring the transmission coefficient D through a sheet of closed-cell polyolefin foams material; 8 – acoustic wave emitter; 9 – acoustic wave receiver

Измерение коэффициента прохождения акустической волны D через лист материала из закрытоячеистого ППЛ производилось амплитудно-теневым методом с использованием акустического дефектоскопа (7) (патент

на изобретение RU 2796231) посредством бесконтактных акустических излучателей (8) и приёмника (9) [21], зафиксированных с помощью рамки (6) на направляющей балке (3), установленной на неподвижной опоре (4).

Излучатель (8) и приёмник (9) позиционируются соосно по центру листа ППЛ в области двухсторонней лопатки шириной 100 мм. Образец ППЛ (1) зажимается с противоположных сторон зажимными планками (5), верхняя планка крепится к направляющей балке (3), на нижней планке устанавливается блок, обеспечивающий растягивающее напряжение (2). Блок (2) обеспечивает силовое воздействие (F) на исследуемый образец (1), создающее статическое растягивающее напряжение σ , определяемое по формуле (ГОСТ Р 54553-2019):

$$\sigma = \frac{F}{S_0}, \quad (2)$$

где F – сила, обеспечивающая растяжение листа ППЛ; S_0 – площадь поперечного сечения листа ППЛ в месте измерения коэффициента прохождения акустической волны до начала растяжения.

Исследуемый образец ППЛ (1) фиксировался зажимными планками (5) по середине между излучателем (8) и приёмником акустической волны (9), расположенными на расстоянии 30 мм друг от друга. Производилось измерение амплитуды акустической волны, прошедшей через образец без растягивающей нагрузки, для определения начального коэффициента прохождения акустической волны D_0 через лист материала из закрытоячеистого ППЛ в соответствии с формулой (1). Для этого с акустического дефектоскопа (7) подавался электрический импульс, возбуждающий акустический излучатель, излучающий акустическую волну частотой 13 кГц, которая проходит сквозь образец ППЛ (1) и поступает на акустический приёмник (9). При этом после прохождения акустической волны через образец ППЛ наблюдается небольшое уменьшение её частоты до 11–12 кГц, в зависимости от толщины и кратности вспенивания исследуемого листа. Зарегистрированный акустическим приёмником (9) сигнал поступает на дефектоскоп (7), с помощью которого фиксируется его амплитуда [21, 22].

С использованием блока (2) прикладывается силовое воздействие, обеспечивающее растяжение образца ППЛ (1) с одновременным измерением амплитуды акустической волны, прошедшей через образец, с помощью дефектоскопа (7) и расчётом коэффициента прохождения акустической волны D

при заданном растягивающем напряжении σ . Для оценки изменения акустических свойств ППЛ при внешнем статическом растягивающем напряжении оценивалось относительное изменение коэффициента прохождения $\Delta D/D_0$ акустической волны через образец из закрытоячеистого ППЛ:

$$\frac{\Delta D}{D_0} = \frac{D - D_0}{D_0} \cdot 100\%. \quad (3)$$

В процессе растяжения образца ППЛ происходит увеличение его продольного размера в направлении приложенной нагрузки и уменьшение его толщины. При этом происходит изменение структуры образца, связанное с деформацией пор и утонением межпорных перегородок, а также возможное их разрушение и локальное изменение кратности вспенивания и плотности листа ППЛ. Все это приводит к изменению коэффициента прохождения акустической волны D через лист материала из закрытоячеистых ППЛ при статическом растягивающем воздействии на него.

Результаты и их обсуждение

Для исследования изменения упругих свойств листов из закрытоячеистых ППЛ при статическом растяжении проведена серия измерений коэффициента прохождения акустической волны D через лист материала из закрытоячеистых ППЛ в процессе растягивающего воздействия, основываясь на которых определено относительное изменение коэффициента прохождения $\Delta D/D_0$ (рисунок 2). В таблице 2 приведены значения коэффициента прохождения акустической волны D_0 через лист материала из закрытоячеистых ППЛ без нагрузки. Анализируя полученные значения коэффициента прохождения акустической волны D_0 через лист материала из закрытоячеистых ППЛ (таблица 2) без нагрузки, можно сделать вывод об его однозначной связи с кратностью вспенивания для одинаковой толщины листа ППЛ (таблица 1). Растяжение исследуемых образцов ППЛ производилось в двух направлениях: вдоль листа – продольное направление и поперек листа – поперечное направление. Одновременно с определением величины $\Delta D/D_0$ измерялись величина растягивающего напряжения σ и относительное удлинение образца $\Delta l/l_0$ (рисунок 3).

Все серии измерений проводились в одинаковых условиях с постепенным увеличением растягивающей нагрузки на образец ППЛ до его разрыва, что позволило определить разрушающее напряжение σ_p (таблица 2) и, соответственно, прочность при разрыве. Полученные экспериментально значения разрушающего напряжения σ_p (таблица 2) согласуются со справочными значениями (таблица 1). В ряде измерений разрушение образца ППЛ происходило раньше, чем растягивающая нагрузка достигала величины разрушающего напряжения σ_p (рисунок 2, продольное направление, образец 3), что связано с большой неравномерностью свойств и структуры листов ППЛ [19, 20, 23], приводящей к внутренним разрывам пор и межпорных перегородок.

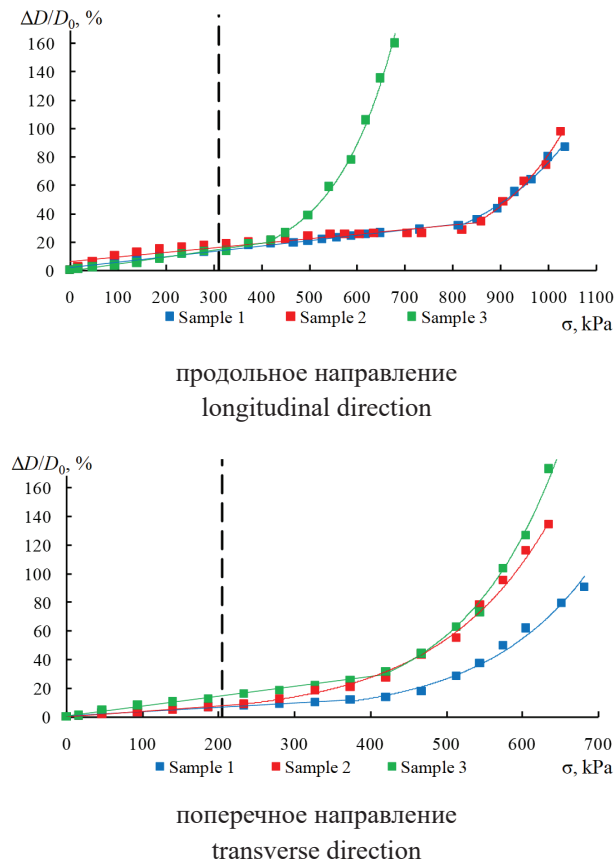


Рисунок 2 – Зависимость относительного изменения коэффициента прохождения $\Delta D/D_0$ акустической волны от величины растягивающего напряжения для ISOLON 500 1004

Figure 2 – Dependence of the relative change of an acoustic wave transmission coefficient $\Delta D/D_0$ on the magnitude of the tensile stress for ISOLON 500 1004

На рисунке 2 показана зависимость относительного изменения коэффициента прохождения $\Delta D/D_0$ акустической волны через лист материала из закрытоячеистых ППЛ от величины статического растягивающего напряжения на примере образца ISOLON 500 1004. Для других исследуемых образцов зависимости носят аналогичный характер. Увеличение растягивающего напряжения, приложенного к образцу ППЛ, приводит к росту как самого коэффициента прохождения акустической волны D через лист материала из закрытоячеистых ППЛ (рисунок 3), так и его относительного изменения $\Delta D/D_0$. При этом, как показала серия экспериментов, до тех пор, пока значение растягивающей нагрузки не превысит $\sigma_{0.3}$, что соответствует 30 % от разрушающей σ_p нагрузки ($\sigma_{0.3} = 0,3\sigma_p$) (обозначено вертикальной пунктирной линией на рисунке 2), изменение коэффициента прохождения акустической волны $\Delta D/D_0$ через лист материала из закрытоячеистых ППЛ, а также относительное удлинение образца $\Delta l/l_0$ (рисунок 4) носит линейный характер, который нарушается при дальнейшем увеличении растягивающего напряжения. Исходя из этого, можно сделать вывод, что пока растягивающее напряжение не превысит значения $\sigma_{0.3}$ (таблица 2), деформация листа ППЛ является упругой, после превышения – возникает текучесть и внутренние локальные микроразрушения.

Упругие характеристики исследуемых листов ППЛ зависят от направления приложенной нагрузки и в продольном направлении имеют большие значения. Например, для листа ISOLON 500 1004 (рисунок 2) разрушающее напряжение в продольном направлении составило $\sigma_p = 1035 \pm 5$ кПа, в поперечном $\sigma_p = 682 \pm 3$ кПа (таблица 2), что свидетельствует о разной эластичности образцов в этих направлениях, а, следовательно, при одинаковом значении растягивающего напряжения относительное изменение коэффициента прохождения акустической волны $\Delta D/D_0$ через лист материала из закрытоячеистых ППЛ также будет отличаться. При растягивающем напряжении $\sigma = 600$ кПа в продольном направлении относительное изменение коэффициента прохождения акустической волны $\Delta D/D_0$ через лист материала из закрытоячеистых ППЛ составляет примерно 30 %, поперечном направлении – около 80 % (рисунок 2).

Таблица 2 / Table 2

Значения упругих характеристик исследуемых листов пенополиолефина при статическом растяжении

Values of the elastic characteristics of the studied polyolefin foams sheets under static tension

Марка Grade	Направление растяжения Direction of stretching	D_0 , %	σ_p , kPa	$\sigma_{0.3}$, kPa	$\Delta l_{0.3}/l_0$	E , MPa	$\Delta D_{0.3}/D_0$, %	K_D , 1/MPa
ISOLON 500 3004	продольное longitudinal	22.21±0.03	374 ± 2	112 ± 0.6	0.045	2.5	3.3 ± 0.2	0.290
	поперечное transverse		187 ± 1	56 ± 0.4	0.041	1.4	1.6 ± 0.2	0.289
ISOLON 500 2003	продольное longitudinal	20.73±0.03	534 ± 5	160 ± 0.3	0.027	5.9	4.0 ± 0.2	0.250
	поперечное transverse		320 ± 2	96 ± 0.5	0.041	2.3	2.5 ± 0.2	0.260
ISOLON 500 1004	продольное longitudinal	5.89±0.03	1035 ± 5	311 ± 1.5	0.050	6.2	15.5 ± 0.9	0.498
	поперечное transverse		682 ± 3	205 ± 1	0.054	3.8	6.9 ± 0.9	0.339

На рисунке 3 приведены теоретическая и экспериментальная зависимости коэффициента прохождения акустической волны D через лист материала из закрытоячеистых ППЛ от величины растягивающего напряжения σ в поперечном направлении для листа ISOLON 500 1004 (образец 2). В основе модели, с помощью которой получена теоретическая кривая (рисунок 3), лежит теория тонких плёнок, описанная с использованием формул Л.Д. Бреховских. Отличия значений экспериментальной зависимости коэффициента прохождения акустической волны D через лист материала из закрытоячеистых ППЛ при растяжении от теоретической, рассчитанной в гармоническом режиме для плоской волны, могут быть обусловлены влиянием импульсного режима, различием в диаграммах направленности при распространении в воздухе и через промежуточный слой, а также возможным проявлением резонансных явлений в пористом слое [21]. При этом разница в теоретических и экспериментальных значениях коэффициентов прохождения акустической волны D через лист материала из закрытоячеистых ППЛ растёт с увеличением растягивающего напряжения σ , что может объясняться также возникновением очагов разрушения внутри образцов, утонением

межпорных перегородок, деформацией структурных неоднородностей листов и локальным изменением плотности в процессе растяжения, которые не учитывает модель.

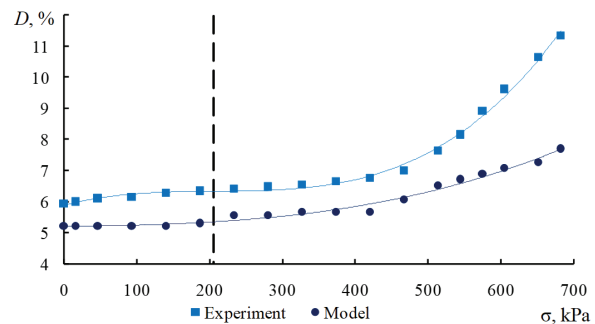


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента прохождения D акустической волны через образец пенополиолефина ISOLON 500 1004 от величины растягивающего напряжения σ в поперечном направлении

Figure 3 – Dependence of the acoustic wave transmission coefficient D through the ISOLON 500 1004 polyolefin foams sample on the magnitude of the tensile stress σ in the transverse direction

Полученные зависимости относительного изменения коэффициента прохождения акустической волны через лист материала из закрытоячеистых ППЛ от величины статического растягивающего напряжения (рисунок 2) позволили обосновать структурно-

чувствительный параметр акустической тензометрии – коэффициент упругоакустической связи K_D для образцов ППЛ (таблица 2):

$$K_D = \frac{\Delta D_{0,3}/D_0}{\sigma_{0,3}}, \quad (5)$$

где $\Delta D_{0,3}/D_0$ – относительное изменение коэффициента прохождения акустической волны через лист материала из закрытоячеистых ППЛ при растягивающем напряжении $\sigma_{0,3}$.

Зависимость относительного удлинения $\Delta l/l_0$ листа ППЛ от величины растягивающего напряжения σ (рисунок 4) может быть использована для определения модуля упругости при растяжении E с применением закона Гука:

$$E = \frac{\sigma_{0,3}}{\Delta l_{0,3}/l_0}, \quad (4)$$

где $\sigma_{0,3}$ – значение растягивающего напряжения в области упругой деформации ($\sigma_{0,3} = 0,3\sigma_p$); $\Delta l_{0,3}/l_0$ – относительное удлинение образца при $\sigma_{0,3}$.

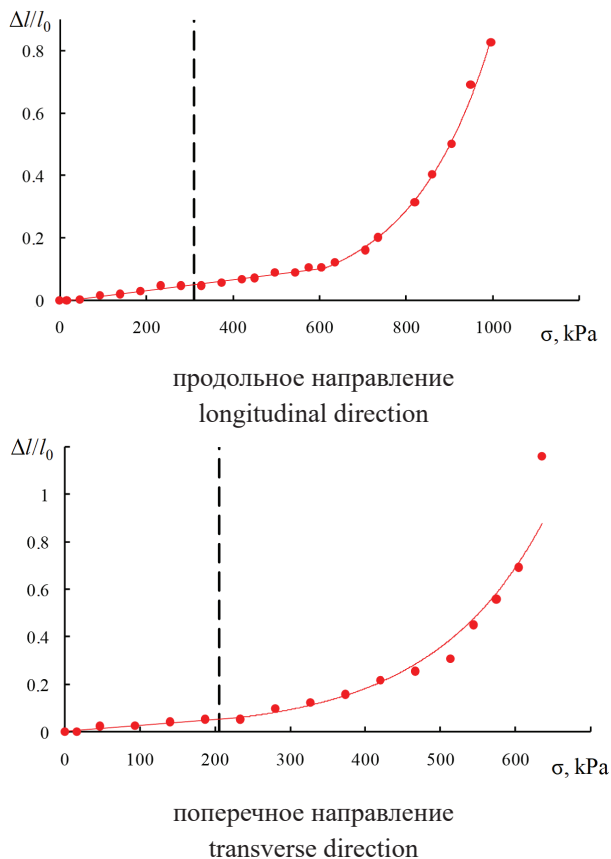


Рисунок 4 – Зависимость относительного удлинения $\Delta l/l_0$ листа пенополиолефина ISOLON 500 1004 от величины растягивающего напряжения σ

Figure 4 – Dependence of the ISOLON 500 1004 polyolefin foams sheet relative elongation $\Delta l/l_0$ on the magnitude of the tensile stress σ

Изменение относительного удлинения $\Delta l/l_0$ листа ППЛ в процессе его растяжения (рисунок 4) также можно разделить на две зоны: область упругой деформации (линейная зависимость) и область текучести (нелинейная зависимость). Определив по графикам на рисунке 4 значение относительного удлинения образца при растягивающей нагрузке $\sigma_{0,3} = 0,3\sigma_p$, соответствующей упругой области деформации, рассчитаны модуль упругости для исследуемых образцов в продольном и поперечном направлениях (таблица 2).

Для наглядности зависимости коэффициента акустоупругости K_D от модуля Юнга E для исследуемых листов ППЛ представлены на рисунке 5. Как видно из графиков, для образцов одной толщины, но разной кратности вспенивания ISOLON 500 3004 и ISOLON 500 1004 рост модуля Юнга E приводит к увеличению коэффициента акустоупругости K_D , причём в продольном направлении данная зависимость более существенна. При этом коэффициент акустоупругости K_D для более тонкого листа ISOLON 500 2003 ($h = 3,5$ мм) имеет наименьшее значение относительно других образцов.

Используя полученные значения коэффициента акустоупругости K_D для определённого значения толщины листа ППЛ и модуля Юнга E , можно построить тарифовочные кривые, которые могут быть использованы для оценки упругих модулей с помощью разработанной установки, без разрушающего воздействия на образец и использования сложного оборудования для регистрации относительного удлинения образца.

С целью проверки упругости и текучести листов ППЛ выполнена серия экспериментов по растяжению–восстановлению образцов (рисунок 6). Цикл измерения проводился в следующей последовательности: производилось нагружение образца в течение 300 с нагрузкой $0,3\sigma_p$ и $0,7\sigma_p$ с регистрацией коэффициента прохождения акустической волны D через лист материала из закрытоячеистых ППЛ через каждые 60 с; далее нагрузка снималась и оценивалось восстановление листа ППЛ в течение 300 с посредством измерения коэффициента прохождения акустической волны D с интервалом 15 с.

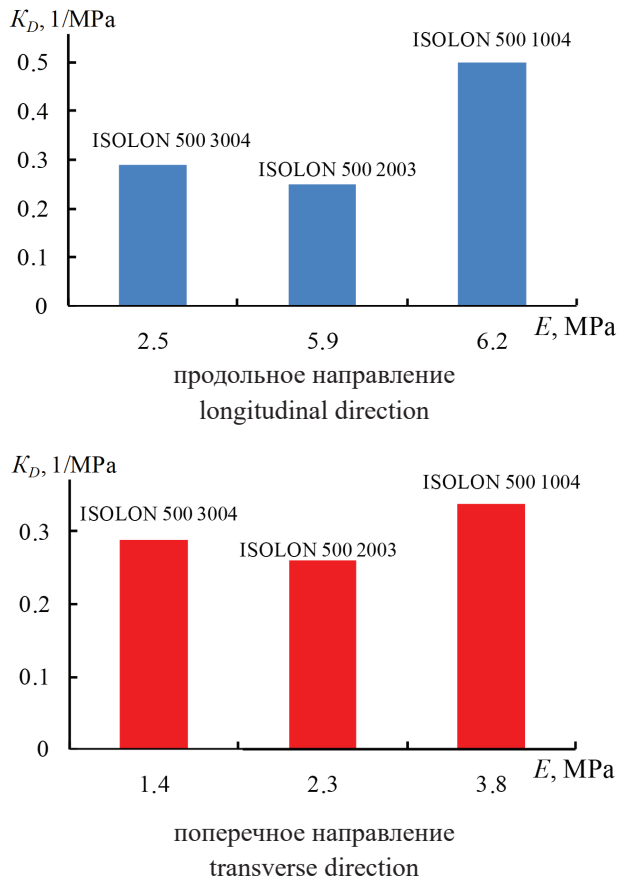


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента акустоупругости K_D от модуля Юнга E для исследуемых образцов

Figure 5 – Dependence of the acoustoelastic coefficient K_D on the Young's modulus E for the studied samples

На рисунке 6 показано изменение коэффициента прохождения D акустической волны через образец ППЛ ISOLON 500 1004 в процессе

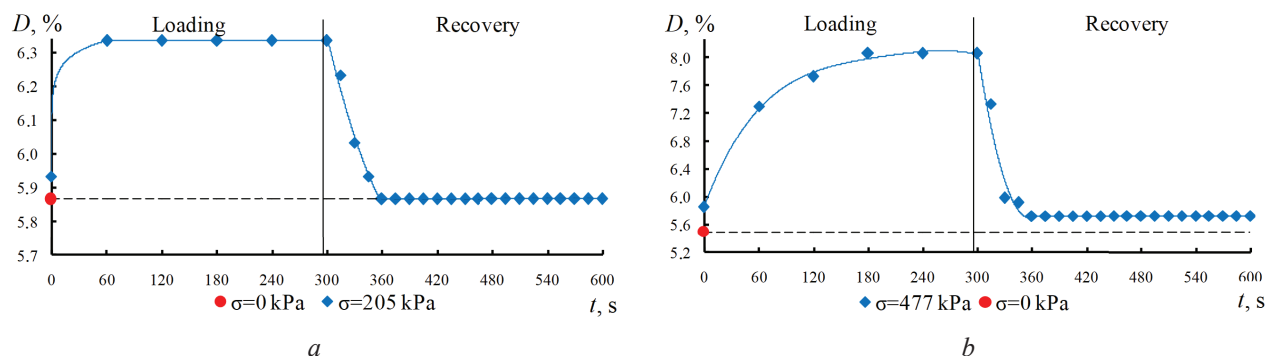


Рисунок 6 – Изменение коэффициента прохождения D акустической волны через образец пенополиолефина ISOLON 500 1004 в процессе воздействия растягивающей нагрузки σ в поперечном направлении и в процессе восстановления после её снятия: a – растягивающая нагрузка $\sigma_{0.3} = 0,3\sigma_p$; b – растягивающая нагрузка $\sigma_{0.7} = 0,7\sigma_p$

Figure 6 – Change in the acoustic wave transmission coefficient D through the ISOLON 500 1004 polyolefin foams sheet during exposure to a tensile load σ in the transverse direction and during recovery after its removal: a – tensile load $\sigma_{0.3} = 0,3\sigma_p$; b – tensile load $\sigma_{0.7} = 0,7\sigma_p$

Таблица 3 / Table 3

Степень восстановления упругих свойств пенополиолефина по данным коэффициента прохождения

Restoration degree of the polyolefin foams elastic properties. Estimation is based on the transmission coefficient

Марка Grade	Направление растяжения Direction of stretching	$\Delta D_V/D_0$, %		V_D , %	
		$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.7}$	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.7}$
ISOLON 500 3004	продольное/ longitudinal	0.4	8.5	99.6	91.5
	поперечное / transverse	0	3.0	100.0	97.0
ISOLON 500 2003	продольное / longitudinal	0	3.3	100.0	96.7
	поперечное / transverse	0.64	15.3	99.4	84.7
ISOLON 500 1004	продольное / longitudinal	0	4.8	100.0	95.2
	поперечное / transverse	0	4.2	100.0	95.8

Для остальных исследуемых образцов ППЛ процесс нагружение–восстановление носит аналогичный характер как в продольном, так и в поперечном направлениях воздействия растягивающей нагрузки, результаты исследований представлены в таблице 3. Основываясь на данных результатах, определена степень восстановления V_D упругих свойств ППЛ по данным коэффициента прохождения:

$$V_D = \left(1 - \frac{\Delta D_V}{D_0}\right) \cdot 100\%, \quad (6)$$

где $\Delta D_V/D_0$ – относительное изменение коэффициента прохождения акустической волны через лист материала из закрытоячеистых ППЛ в конце цикла восстановления.

Полученные результаты подтверждают, что при растягивающей нагрузке $\sigma_{0.3} = 0,3\sigma_p$ деформация листов ППЛ находится в упругой области, так как после снятия воздействия образцы восстанавливаются, а при нагрузке $\sigma_{0.7} = 0,7\sigma_p$ деформация листов ППЛ находится в область текучести.

Заключение

Разработана методика экспериментальных исследований коэффициента прохождения D акустической волны через лист материала из закрытоячеистых пенополиолефинов под воздействием статической растягивающей нагрузки.

Экспериментальные исследования показывают возрастание коэффициента прохождения

D акустической волны через лист материала из закрытоячеистых пенополиолефинов при увеличении значения статической растягивающей нагрузки, воздействующей на образцы, что обусловлено уменьшением толщины образца, утонением межпорных перегородок и деформаций пор в направлении воздействия нагрузки. Показана однозначная связь коэффициента прохождения D акустической волны через лист материала из закрытоячеистых пенополиолефинов с произведением кратности вспенивания на толщину листа пенополиолефина и пределом прочности материала. Показано, что процесс растяжения листа пенополиолефина носит упругий характер до тех пор, пока растягивающая нагрузка не превысит 30 % от нагрузки разрушения, что позволило определить модуль упругости в соответствии с законом Гука. Полученные результаты позволили обосновать структурно-чувствительный параметр акустической тензометрии – коэффициент упругоакустической связи для образцов пенополиолефинов. Показана также связь коэффициента упругоакустической связи с упругим модулем листа пенополиолефина, использование которой может быть полезно при построении тарировочных кривых для оценки упругих свойств без разрушающего воздействия на образец и использования сложного оборудования для регистрации относительного удлинения образца.

Экспериментальные исследования коэффициента прохождения D акустической волны через лист материала из закрытоячеистых

пенополиолефинов при растяжении образцов пенополиолефина показывают его рост в процессе воздействия постоянной растягивающей нагрузки в течение времени 300 с, что обусловлено утонением образца и возможным изменением пористости. После снятия нагрузки, превышающей 30 % от нагрузки разрушения, образец восстанавливается не полностью, что свидетельствует о наличии упругопластической деформации и возможном нарушении первоначальной пористости. Полученные результаты позволили оценить степень восстановления листов пенополиолефина по коэффициенту прохождения акустической волны D после снятия растягивающей нагрузки, а также подтвердили, что напряжение, равное 30 % от нагрузки разрушения, приводит к упругой деформации образцов и, следовательно, полному восстановлению образцов после её снятия.

Разработанная методика измерения коэффициента прохождения D акустической волны через лист материала из закрытоячеистых пенополиолефинов под воздействием статической растягивающей нагрузки достаточно проста в реализации, обладает высокой воспроизводимостью, не требует сложной аппаратной части и может быть использована для оценки упругих свойств без разрушения образца.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» в рамках программы «Ректорские гранты 2025», научный проект «Исследование акустических свойств материалов с низкой поверхностной плотностью», шифр БОП-2025рг, с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследования акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

Acknowledgments

The study was carried out with the financial support Kalashnikov ISTU within the framework of the Rector's Grants 2025 scientific project "Research of acoustic properties of materials with low surface density" cipher BOP-2025rg using the UNU "Information and Measuring Complex for the study of acoustic properties of materials and products" (registration number: 586308).

Список использованных источников

1. Акимов В.М. Обзор пенополимеров под микроскопом / В.М. Акимов // Тенденции развития науки и образования. – 2022. – № 92-15. – С. 113-116. DOI: 10.18411/trnio-12-2022-711
2. Колосова А.С. Современные газонаполненные полимерные материалы и изделия / А.С. Колосова, Е.С. Пикалов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2020. – № 10. – С. 54-67.
3. Панкратов А.В. Влияние минеральных наполнителей на свойства химически сшитого пенополиэтилена / А.В. Панкратов, Г.Н. Матюхина, Ю.Т. Панов, О.А. Фридман // Пластические массы. – 2010. – № 7. – С. 32-34.
4. Дементьев А.Г. Деформирование химически сшитого пенополиэтилена. 2. Связь между структурой, механическими свойствами и термическим деформированием пенополиэтилена / А.Г. Дементьев, Г.Н. Матюхина, А.В. Панкратов // Пластические массы. – 2013. – № 5. – С. 16-19.
5. Волынский А.Л. Визуализация структурных перестроек, сопровождающих деформацию аморфного полиэтилентерефталата / А.Л. Волынский, Т.Е. Гроховская, А.И. Кулебякина [и др.] // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2006. – Т. 48, № 5. – С. 823-833.
6. Дементьев А.Г. Деформирование химически сшитого пенополиэтилена. 1. Термическое деформирование пенополиэтилена / А.Г. Дементьев, Г.Н. Матюхина, А.В. Панкратов // Пластические массы. – 2013. – № 4. – С. 8-12.
7. Дементьев А.Г. Влияние ячеистой структуры на восстановление размеров деформированного пенополиэтилена. / А.Г. Дементьев, Ю.А. Куликов // Высокомолекулярные соединения. – 1991. – Серия Б, Т. 33, № 9. – С. 650-655.
8. Леньков С.В. Акустические поверхностные волны в пористо-упругих двухфазных средах / С.В. Леньков // Химическая физика и мезоскопия. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 375-384. DOI: 10.15350/17270529.2023.3.33
9. Черноус Д.А. Методы расчета механических характеристик пороматериалов малой плотности (обзор) / Д.А. Черноус, Е.М. Петроковец, Д.А. Конек, С.В. Шилько // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2001. – Т. 7, № 4. – С. 533-545.
10. Hong K. Моделирование растяжения полиэтилена: влияние температуры и степени кристалличности / K. Hong, G Strobl // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2008. – Т. 50, № 5. – С. 760-772.
11. Белокуров В.Н. Механизм деформации вязкоупругих полимерных материалов в резонансных режимах / В.Н. Белокуров, Д.В. Шагунов //

Интернет-журнал "Науковедение". – 2015. – Т. 7, № 1(26). – С. 93. DOI: 10.15862/129TVN115

12. Хохлов А.В. Немонотонность, знакопеременность и другие особенности поведения коэффициента Пуассона линейно вязкоупругих материалов при растяжении с постоянной скоростью / А.В. Хохлов // Проблемы прочности и пластичности. – 2019. – Т. 81, № 3. – С. 271–291.

DOI: 10.32326/1814-9146-2019-81-3-271-291

13. Ефимов А.В. Влияние скорости растяжения на механические характеристики предварительно прокатанных пленок полиэтиленотерефталата / А.В. Ефимов, С.Л. Баженов, А.В. Бобров, Т.Е. Гроховская // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2017. – Т. 59, № 3. – С. 234–242.

DOI: 10.7868/S2308112017030038

14. Демидов А.Н. Исследование механических характеристик биоразлагаемых полимеров методами растяжения и кинетического индентирования / А.Н. Демидов, М.А. Каримбеков, А.Ю. Марченков [и др.] // Технология металлов. – 2022. – № 10. – С. 46–51.

DOI: 10.31044/1684-2499-2022-0-10-46-51

15. Патлажан С.А. Деформационное поведение полиэтилена высокой плотности ниже предела текучести: влияние скорости разгрузки / С.А. Патлажан // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2008. – Т. 50, № 5. – С. 789–796.

16. Bobrova EYu, Popov II, Zhukov AD, Ganzhuntsev MI. Fatigue strength of foamed polymers. Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2022;4(56):29–38.

DOI: 10.36622/VSTU.2022.56.4.003

17. Пилипенко А.С. Оценка долговечности вспененных полиолефинов / А.С. Пилипенко, Б.И. Ефимов, В.И. Кращенко, Е.О. Безверхова // Инновации в жизнь. – 2020. – № 2(33). – С. 129–136.

18. Черноус Д.А. Анализ деформирования жестких пороматериалов / Д.А. Черноус, С.В. Шилько // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2003. – № 1(121). – С. 23–27.

19. Bogdan O.P. Evaluation of Nonuniformity of Elastic Properties of Sheets Made from Closed-Cell Polyolefin Foams by Acoustic Method / O.P. Bogdan, D.V. Zlobin, O.V. Murav'eva [et al.]. // Devices and Methods of Measurements. – 2021. – Vol. 12, No. 1. – P. 58–66. DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-1-58-66

20. Богдан О.П. Методы акустического контроля пористых материалов / О.П. Богдан, А.В. Блинова, Л.А. Денисов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2024. – Т. 11, № 3. – С. 68–72. DOI: 10.24892/RIJE/20240311

21. Муравьева О.В. Влияние плотности листов терморасширенного графита на прохождение

акустической волны / О.В. Муравьева, Л.А. Денисов, О.П. Богдан, А.В. Блинова // Дефектоскопия. – 2024. – № 12. – С. 44–58.

DOI: 10.31857/S0130308224120047

22. Богдан О.П. Исследование плотности образцов из терморасширенного графита акустическим амплитудно-теневым методом / О.П. Богдан, О.В. Муравьева, А.В. Блинова, Д.В. Злобин // Дефектоскопия. – 2023. – № 8. – С. 21–31.

DOI: 10.31857/S0130308223080031

23. Богдан О.П. Исследование характеристик листов пенополиэтилена акустическими методами / О.П. Богдан, О.В. Муравьева, А.В. Платунов, Д.С. Рысев // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 61–68.

DOI: 10.22213/2413-1172-2020-2-61-68

References

1. Akimova VM. Overview of foams under a microscope. Trends in the development of science and education. 2022;92(15):113–116. (In Russ.).

2. Kolosova AS, Pikalov ES. Modern gas-filled polymer materials and products. International Journal of Applied and Fundamental Research. 2020;10:54–67. (In Russ.).

3. Pankratov AV, Matyuhina GN, Panov YUT, Fridman OA. Influence of mineral extender on properties of crosslinked cellular polyethylene. International Polymer Science and Technology. 2010;7:32–34. (In Russ.).

4. Dement'ev AG, Matyuhina GN, Pankratov AV. Deformation of chemical sew cellular polyethylene. 2. Relation between structure, mechanical properties and thermal deformation of cellular polyethylene. International Polymer Science and Technology. 2013;5:16–19. (In Russ.).

5. Volynskii AL, Grokhovskaya TE, Kulebyakina AI. [et al.] Visualization of strain-induced structural rearrangements in amorphous poly(ethylene terephthalate). Polymer Science, Series A. 2006;48(5):527–535.

DOI: 10.1134/S0965545X06050105

6. Dement'ev AG, Matyuhina GN, Pankratov AV. Deformation of chemical sew cellular polyethylene. 1. Thermal deformation of cellular polyethylene. International Polymer Science and Technology. 2013;4:8–12. (In Russ.).

7. Dement'ev AG, Kulikov YuA. The effect of the cellular structure on the size restoration of deformed polyurethane foam. High molecular weight compounds. Series B. 1991;650–655 pp. (In Russ.).

8. Len'kov SV. Acoustic surface waves in porous-elastic biphasic media. Chemical physics and mesoscopy. 2023;25:3:375–384. (In Russ.).

DOI: 10.15350/17270529.2023.3.33

9. Hernous DA, Petrokovec EM, Konek DA, SHil'ko SV. Methods of Calculation of Mechanical Characteristics of Low Density Porous Materials: Review. Mechanics of composite materials and structures. 2001;7:4:533-545. (In Russ.).

10. Hong K, Strobl G. Characterizing and Modeling the Tensile Deformation of Polyethylene: The Temperature and Crystallinity Dependences. Seriya A. 2008;50(5):760-772. (In Russ.).

11. Belokurov VN, SHagunov DV. Deformation mechanism of visco-elastic polymeric materials in the resonance modes. <http://naukovedenie.ru/PDF/129TVN115.pdf>. 2015;7(1):93. (In Russ.). **DOI:** 10.15862/129TVN115

12. Hohlov AV. Non-monotonicity, sign changes and other features of poisson's ratio evolution for isotropic linear viscoelastic materials under tension at constant stress rates. Problems of Strength and Plasticity. 2019;81(3):271-291. (In Russ.).

DOI: 10.32326/1814-9146-2019-81-3-271-291

13. Efimov AV, Grokhovskaya TE, Bazhenov SL, Bobrov AV. Effect of tensile speed on mechanical characteristics of preliminary rolled polyethylene terephthalate films. Polymer Science, Series A. 2017;59(3):316-323. (In Russ.). **DOI:** 10.1134/S0965545X17030038

14. Demidov AN. [et al.]. Study of mechanical properties of biodegradable polymers by tensile testing and instrumented indentation methods. Russian Metallurgy (Metally). 2022;(10):46-51. (In Russ.).

DOI: 10.31044/1684-2499-2022-0-10-46-51

15. Patlazhan SA, Hizoum K, Remond Y. Stress-strain behavior of high-density polyethylene below the yield point: effect of unloading rate. Polymer Science, Series A. 2008;50(5):789-796. (In Russ.).

16. Bobrova EYu, Popov II, Zhukov AD, Ganzhuntsev MI. Fatigue strength of foamed polymers. Russian

Journal of Building Construction and Architecture. 2022;4(56):29-38. (In Russ.).

DOI: 10.36622/VSTU.2022.56.4.003

17. Pilipenko AS, Efimov BI, Krashchenko VI, Bezverhova EO. Evaluation of long-term foam polyolefins. Innovations in life. 2020;2(33):129-136. (In Russ.).

18. Chernous DA, SHil'ko SV. Analysis of deformation of rigid poromaterials. News of higher educational institutions. The North Caucasus region. Series: Natural Sciences. 2003; 1(121):23-27. (In Russ.).

19. Bogdan OP. [et al.]. Evaluation of Nonuniformity of Elastic Properties of Sheets Made from Closed-Cell Polyolefin Foams by Acoustic Method. Devices and Methods of Measurements. 2021;12:1:58-66. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-1-58-66

20. Bogdan OP, Blinova AV, Denisov LA. Methods of acoustic control of porous materials. Russian Internet Journal of Industrial Engineering. 2024;11(3):68-72. (In Russ.). **DOI:** 10.24892/RIJIE/20240311

21. Muravieva OV, Denisov LA., Bogdan OP, Blinova AV. Influence of the Density of Sheeted Thermally Expanded Graphite on the Transmission of Acoustic Waves. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2024;60(12):1363-1375.

DOI: 10.1134/S1061830924603155

22. Bogdan OP, Muraveva OV, Blinova AV, Zlobin DV. Density study of thermoexpanded graphite samples by acoustic amplitude-shadow method. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2023;(8)21-31. (In Russ.).

DOI: 10.31857/S0130308223080031

23. Bogdan OP, Murav'eva OV, Platunov AV, Rysev DS. Investigation of characteristics of sheets of polyurethane foam using acoustic methods. Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova. 2020;23(2):61-68. (In Russ.). **DOI:** 10.22213/2413-1172-2020-2-61-68