

УДК 620.179.161

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

## Исследование характеристик листов пенополиэтилена акустическими методами\*

**О. П. Богдан**, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

**О. В. Муравьева**, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

Физико-технический институт УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Россия

**А. В. Платунов**, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

**Д. С. Рысев**, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*Представлена разработанная установка бесконтактного акустического контроля листов из пенополиэтилена, основанная на регистрации амплитудного параметра импульсного сигнала, прошедшего сквозь лист, и позволяющая выявлять различные типы дефектов разных размеров, что является достаточно важным при применении пенополиэтилена в особо опасных областях промышленности – нефтегазовой, авиационной, атомной и др.*

*Разработана новая методика контроля листов пенополиэтилена, в основе которой лежит акустический теневой бесконтактный метод, использующий высокочастотную область звукового диапазона (5...13 кГц). Суть бесконтактного акустического теневого метода состоит в анализе изменения амплитуды прошедшей волны сквозь лист пенополиэтилена, обусловленного наличием дефекта. Для исследований использована уникальная научная установка «Информационно-измерительный комплекс для исследования акустических свойств материалов и изделий» (зарегистрирована на портале научно-технологической инфраструктуры РФ <http://скр-rf.ru>), в состав которой входит информационно-измерительная система для бесконтактного возбуждения, регистрации и измерения параметров акустических волн в пористых средах.*

*Исследование возможности обнаружения дефектов различного типа-вида проводилось на искусственных дефектах, таких как вмятина (сразу после формирования и после восстановления листа), порез (сквозной и несквозной), включение (намного превышающее по плотности), отверстие, расслоение. Измерения амплитудного параметра импульсного сигнала, прошедшего сквозь лист пенополиэтилена в области расположения искусственных дефектов различного размера, позволили оценить чувствительность установки и методики.*

*Проанализировав полученные данные, можно сделать вывод, что сквозные несплошности, неоднородность плотности и дефекты, плоскость которых находится перпендикулярно направлению акустической волны, обнаруживаются с достаточно высокой чувствительностью, следовательно, минимальные размеры их обнаружения соизмеримы с размером пор пенополиэтилена за исключением несквозных порезов, для которых размер дефектов должен быть в несколько раз выше, так как чувствительность к ним находится ниже погрешности измерения (1 отн. ед.).*

**Ключевые слова:** пенополиэтилен, акустический контроль, теневой метод, искусственные дефекты, безопасность.

### Введение

**П**енополиэтилен (ГОСТ Р 56729–2015 (EN 14313:2009)) представляет собой полужесткий или эластичный материал на основе полимеров, полученных из этилена путем его химического вспенивания. Пенополиэтилен обладает высокими коэффициентами шумопоглощения, виброгашения, эластичностью, ветро- и влагоустойчивостью, низкой теплопроводностью и сохраняет свои свойства в широком диапазоне температур. В зависимости от способа вспенивания пенополиэтилен может быть несшитый (открытоячеистый)

и сшитый (закрытоячеистый), что оказывает влияние на его эксплуатационные свойства [1–4]. За счет своих уникальных физико-механических свойств пенополиэтилен нашел широкое применение во многих областях, которые можно разделить на две группы – бытовые и промышленные.

К бытовому применению пенополиэтилена можно отнести теплоизоляцию и шумоизоляцию зданий и автомобилей [5–8], производство товаров для активного отдыха, спорттоваров, зимней и специальной одежды [9], использование его в качестве упаковочного материала.

© Богдан О. П., Муравьева О. В., Платунов А. В., Рысев Д. С., 2020

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» в рамках научного проекта № ПАВ/20-90-17 с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. № 586308).

Основное применение в промышленности – для тепловой изоляции в установках, работающих в диапазоне рабочих температур  $-80...+150\text{ }^{\circ}\text{C}$  – труб, авиационной техники [10] и др.

При использовании пенополиэтиленов на опасных производственных объектах нарушение сплошности листов пенополиэтилена, даже не воспринимаемое глазом, может привести к серьезным последствиям в результате нарушения теплоизоляции [11, 12]. Вопросы восстановления свойств пенополиэтилена при динамических нагрузках важны с позиций его использования в задачах виброгашения колебаний [13, 14].

В связи с этим возникает необходимость контроля сплошности и в процессе производства, и в процессе эксплуатации. При этом отсутствуют стандартизированные методики контроля нарушения сплошности промышленного и бытового пенополиэтилена. Согласно ГОСТ Р 56729–2015 (EN 14313:2009), ГОСТ Р 56227–2014, ТУ 2244-069-04696843–00, ТУ 2244-001-61124153–2014 и других нормативных документов для листов из пенополиэтилена реализуется приемочный контроль, в рамках которого определяются только физические свойства листов пенополиэтилена (кажущаяся плотность, теплопроводность, влагопоглощение и паропроницаемость, линейные размеры, сопротивление растяжению и расслаиванию, звукопоглощение и выделение вредных веществ).

Для контроля сплошности пенополиэтилена могут быть использованы оптические (шерография), термографические, акустические, радиационные методы, при этом каждый из них имеет ряд недостатков. К недостаткам оптических методов можно отнести зависимость чувствительности метода от пористости, состояния поверхности, разнотолщинности; термографических методов – необходимость обеспечения доступа к поверхности контролируемого объекта, однородности температуры контролируемой поверхности, особых температурных условий измерения; радиационных методов – необходимость обеспечения особых мер защиты и хранения радионуклидов, невозможность контроля в процессе производства [15]; акустических методов – высокое затухание волны в ультразвуковом диапазоне, обусловленное пористостью материала, сложность обеспечения акустического контакта [16–18]. Наиболее перспективным для обнаружения дефектов в листах пенополиэтилена является акустический метод контроля, использующий волны звукового диапазона в высокочастотной области. В указанном

частотном диапазоне затухание акустической волны мало, и имеется возможность использования воздуха в качестве переходной акустической среды.

**Целью исследования** является разработка новой методики и устройств акустического контроля листов пенополиэтилена и исследование влияния дефектов различных типов и размеров на измеряемые параметры акустических волн.

#### **Используемые подходы**

Разработана новая методика контроля листов пенополиэтилена, в основе которой лежит акустический теневой бесконтактный метод, использующий высокочастотную область звукового диапазона (5...13 кГц). Суть бесконтактного акустического теневого метода состоит в анализе изменения амплитуды прошедшей волны сквозь лист пенополиэтилена, обусловленного наличием дефекта [19]. Для исследований использована уникальная научная установка «Информационно-измерительный комплекс для исследования акустических свойств материалов и изделий» (зарегистрирована на портале научно-технологической инфраструктуры РФ <http://ckp-rg.ru>), в состав которой входит информационно-измерительная система для бесконтактного возбуждения, регистрации и измерения параметров акустических волн в пористых средах. Блок-схема экспериментальной установки, реализующей данную методику, представлена на рис. 1.

Генератор зондирующих импульсов, управляемый с персонального компьютера (ПК), подает электрический сигнал на излучающий пьезопреобразователь, под действием которого возбуждается акустическая волна. Излученная акустическая волна проходит через лист пенополиэтилена и поступает на аналогичный излучающему приемный преобразователь; далее сигнал усиливается и оцифровывается, значение амплитуды зарегистрированного сигнала отображается на компьютере со специализированным программным обеспечением. При этом обязательными условиями проведения контроля является соосность излучающего и приемного преобразователей и обеспечение звукоизоляции установки. Нарушение данных условий может привести к снижению достоверности результатов контроля. Благодаря использованию в качестве излучателей и приемников пьезопреобразователей изгибного типа имеет место наилучшее согласование преобразователя с воздушной переходной средой, что обеспечивает бесконтактность разработанной методики.

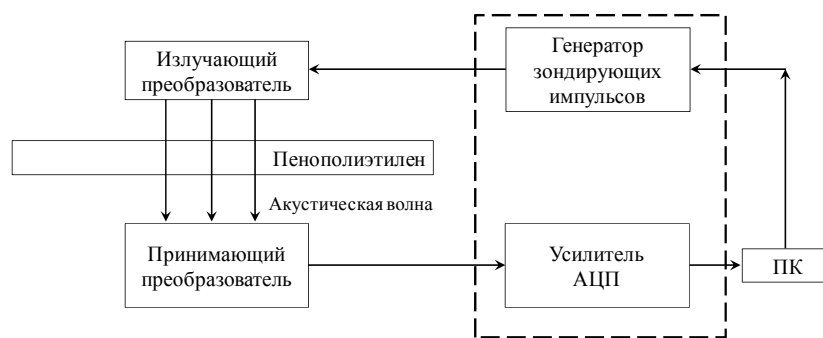


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для контроля листов пенополиэтилена

Fig. 1. Block diagram of an experimental installation for the control of sheets of Styrofoam

Основным информативным параметром теневоего метода является амплитудный параметр импульса, прошедшего сквозь лист из пенополиэтилена, величина которого зависит от плотности и скорости звука, толщины листа и наличия дефектов. Увеличение плотности, скорости звука или толщины листа ведет к снижению амплитудного параметра прошедшего сигнала в результате увеличения влияния затухания (поглощения, рассеивания) акустической волны.

Данная закономерность лежит в основе обнаружения дефектов листов пенополиэтилена, при этом величина изменения амплитудного параметра может являться критерием оценки вида дефекта и браковки.

Погрешность измерения амплитудного параметра прошедшего сигнала экспериментальной установкой для контроля листов пенополиэтилена составляет  $\pm 1$  отн. ед. при измеряемой амплитуде сотни отн. ед.

### Результаты и их обсуждение

Для исследования возможности контроля сплошности листов пенополиэтилена бесконтактным акустическим теневым методом на ячеистом листе ППЭ 2004 плотностью  $50 \text{ кг/м}^3$  и толщиной 4 мм были созданы искусственные дефекты различных типов и размеров, такие как вмятины, сквозные и несквозные порезы, отверстия, расслоения, включения, при этом преобразователь размещался так, что дефекты оказывались по его центру.

Чувствительность обнаружения дефекта  $K_U$  представляет собой отношение изменения амплитудного параметра прошедшего сигнала  $U$  к изменению изменяемого параметра  $\Delta$  дефекта и определяется как

$$K_U = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{\Delta},$$

где  $U_{\max}$  и  $U_{\min}$  – максимальное и минимальное значения амплитудного параметра прошедших сигналов соответственно.

Наиболее часто встречающимся дефектом в листах из пенополиэтилена является вмятина, что обусловлено невысоким модулем упругости, который составляет порядка  $0,14 \dots 1,8 \text{ МПа}$ . Искусственный дефект «вмятина» формировался воздействием на лист силы 75 Н через шайбы различного диаметра ( $D = 18, 22, 26, 30, 35$  и  $40 \text{ мм}$ ) в течение 60 сек. Измерение амплитудного параметра, прошедшего сквозь лист пенополиэтилена импульса, производилось сразу после снятия приложенной силы и далее – после полного восстановления (стабилизации амплитудного параметра).

Результаты влияния диаметра  $D$  искусственного дефекта «вмятина» на амплитуду прошедшего импульса представлены на рис. 2, а, из которого видно, что с увеличением диаметра вмятины наблюдается рост амплитудного параметра импульса  $U$ , прошедшего сквозь лист пенополиэтилена в области вмятины. Данная зависимость носит логарифмический характер. Чувствительность к обнаружению вмятин сразу после ее формирования достаточно высокая и составляет  $K_U = 4,85$  отн. ед./мм, что превышает погрешность установки. Максимальное значение амплитудного параметра импульса  $U$  наблюдается для вмятины диаметром  $D = 40 \text{ мм}$ , что соответствует размерам излучающего и принимающего преобразователей. Дальнейшее увеличение диаметра вмятины к росту амплитудного параметра импульса  $U$  не приводит.

После снятия нагрузки, формирующей вмятину, под действием упругости лист пенополиэтилена частично восстанавливает свою форму, о чем свидетельствует стабилизация амплитудного параметра во времени (около 120 сек). Этот интервал времени определен экспериментально и соответствует моменту времени, когда амплитудный параметр импульса  $U$ , прошедшего сквозь лист, стабилизировался, и его изменение прекращается. Зависимость изменения ам-

плитудного параметра импульса  $U$ , прошедшего сквозь лист пенополиэтилена после его восстановления от диаметра вмятины  $D$ , представлена на рисунке 2, *a*. Характер кривой повторяет кривую изменения амплитудного параметра им-

пульса  $U$ , полученного сразу после снятия нагрузки, но имеет меньшие значения. После восстановления листа пенополиэтилена чувствительность к обнаружению вмятин составляет  $K_U = 3,48$  отн. ед./мм.

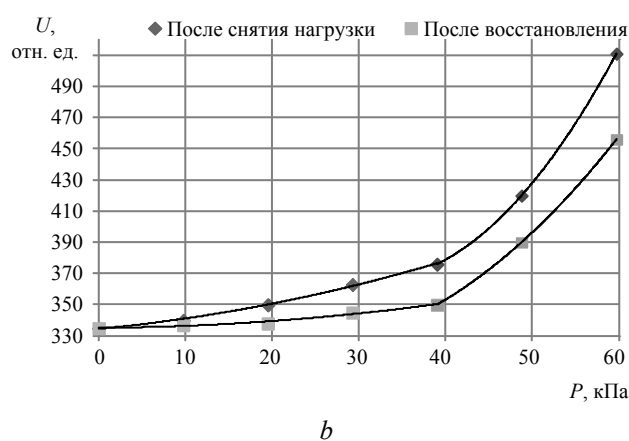
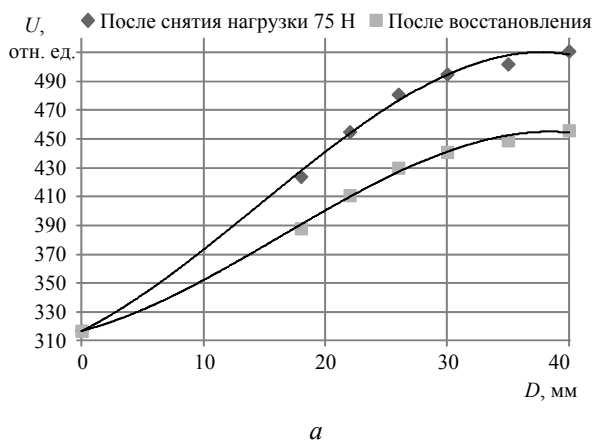


Рис. 2. Графики зависимости амплитудного параметра  $U$  прошедшего сигнала после снятия нагрузки и после восстановления листа пенополиэтилена: *a* – от диаметра вмятины  $D$  (нагрузка 75 Н); *b* – от прикладываемого давления  $P$  в процессе формирования вмятины

Fig. 2. Graphs of the dependence of the amplitude parameter  $U$  of the passed signal after the load is removed and after the recovery of the sheet of Styrofoam: *a* - on the diameter of the dent  $D$  (load 75 N); *b* - on the applied pressure  $P$  during the formation of the dent

Кроме диаметра дефекта «вмятина» на значение амплитудного параметра импульса влияет давление  $P$  в процессе ее формирования. Измерения выполнены для вмятины диаметром  $D = 40$  мм при изменении давления  $P$  от 10 до 60 кПа с шагом 10 кПа. Зависимости амплитудного параметра прошедшего сигнала  $U$  от прикладываемого давления  $P$  в процессе формирования вмятины, после снятия нагрузки и после частичного восстановления (через 120 сек.) представлены на рис. 2, *b*. Обе зависимости носят экспоненциальный характер, и при увеличении давления  $P$ , оказываемого на лист пенополиэтилена при формировании вмятины, амплитудный параметр прошедшего импульса  $U$  растет, что может быть связано с уменьшением толщины листа. Чувствительность к обнаружению вмятины по давлению составила  $K_U = 0,17$  отн. ед./кПа сразу после снятия нагрузки и  $K_U = 0,11$  отн. ед./кПа после восстановления зоны листа с вмятиной.

Искусственный дефект «включение», имитирующий наличие инородных слоев на листе и внутри него, формировался путем наклеивания ленты поливинилхлоридной (ГОСТ 16214–86) размером  $10 \times 10$  мм, толщиной  $h = 0,143$ ,  $0,286$ ,  $0,429$ ,  $0,572$  и  $0,715$  мм, плотностью  $1400 \text{ кг/м}^3$ . Результаты измерения амплитудного параметра сигнала  $U$ , прошедшего через уча-

сток листа пенополиэтилена с имитацией включений различной толщины  $h$ , представлены на рис. 3. С увеличением толщины включения  $h$  наблюдается уменьшение амплитудного параметра прошедшего сигнала  $U$  по экспоненциальному закону. Добавление включения толщиной  $h = 0,143$  мм и плотностью  $1400 \text{ кг/м}^3$  значительно превышает плотность листа пенополиэтилена ( $50 \text{ кг/м}^3$ ), что приводит к снижению амплитудного параметра  $U$  на 17 отн. ед. и позволяет уверенно его обнаружить. Увеличение толщины  $h$  исследуемого включения приводит к менее выраженному уменьшению амплитудного параметра  $U$  на 6...10 отн. ед. Чувствительность к обнаружению данного включения по его толщине составила  $K_U = 62,94$  отн. ед./мм. При уменьшении плотности включения чувствительность к его обнаружению будет снижаться пропорционально изменению его плотности.

Следующими исследуемыми искусственными дефектами являются сквозные отверстия диаметром  $D = 0,5$ ;  $0,8$ ;  $1$ ;  $1,5$ ;  $2$ ;  $5$ ;  $10$ ;  $20$  и  $40$  мм, которые формировались при строгом контроле размеров. Результаты измерения амплитудного параметра прошедшего сигнала  $U$  через участок листа пенополиэтилена с отверстием различного диаметра  $D$  представлены на рис. 4.

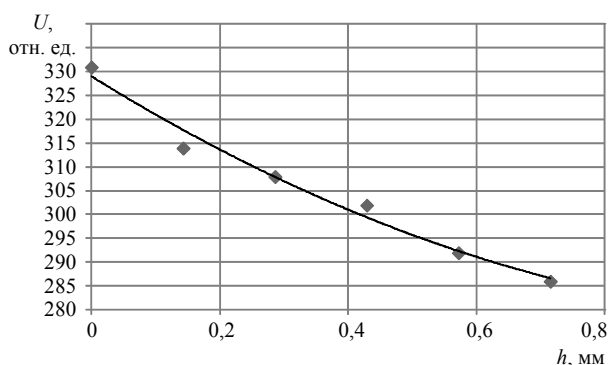


Рис. 3. График зависимости амплитудного параметра прошедшего сигнала  $U$  от толщины включения  $h$ , отличного по плотности от листа пенополиэтилена

Fig. 3. Graph of the dependence of the amplitude parameter of the passed signal  $U$  on the thickness of the inclusion  $h$ , which differs in density from the sheet of polyethylene foam

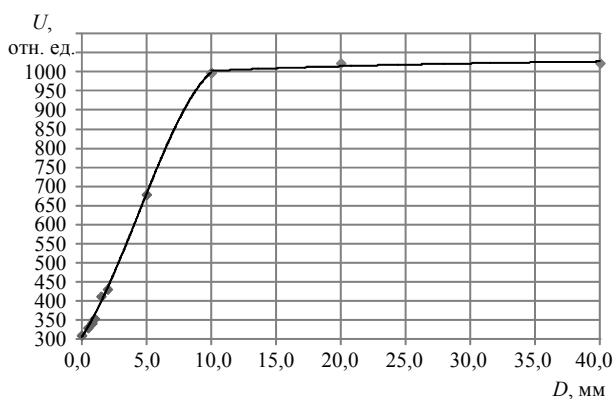


Рис. 4. График зависимости амплитудного параметра прошедшего сигнала  $U$  от диаметра отверстия  $D$

Fig. 4. Graph of the dependence of the amplitude parameter of the passed signal  $U$  on the hole diameter  $D$

Из графика на рисунке видно, что с увеличением диаметра отверстия  $D$  наблюдается увеличение амплитудного параметра прошедшего сигнала  $U$ . При этом кривую можно условно разделить на два участка. Первый участок кривой является нелинейным и находится в диапазоне диаметров отверстия  $D = 0 \dots 10$  мм, где наблюдается изменение амплитудного параметра прошедшего сигнала  $U$  при изменении диаметра искусственного дефекта. При этом наличие отверстия диаметром  $D = 0,5$  мм уже приводит к увеличению амплитудного параметра  $U$ , прошедшего сквозь лист пенополиэтилена, на 20 отн. ед., что позволяет уверенно обнаруживать дефекты подобного типа даже малого размера. При увеличении размера отверстия наблюдается дальнейший рост амплитуды прошедшего сигнала. Чувствительность к обнару-

жению отверстий в диапазоне диаметров до 10 мм составила  $K_U = 68,8$  отн. ед./мм.

На втором участке кривой (при диаметре отверстия  $D$  более 10 мм, амплитуда прошедшего сигнала  $U$  остается практически постоянной, так как уходит в ограничение прибора, что соответствует распространению акустической волны от излучателя к приемнику через воздух. Указанный размер отверстия соответствует четверти диаметра акустического преобразователя (40 мм) и определяется шириной раскрытия его диаграммы направленности на расстоянии до приемника. При этом оценка чувствительности на данном участке кривой не является целесообразной, так как отверстия такого размера обнаруживаются визуально.

Порезы на листах пенополиэтилена могут появляться в процессе технологической обработки или в процессе эксплуатации. Исследование возможности обнаружения таких дефектов проводилось на искусственно созданных на листе пенополиэтилена сквозных и несквозных (глубиной 1 и 3 мм) порезах различной длины  $l$  (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 и 40 мм) лезвием толщиной 0,5 мм. Результаты измерения амплитудного параметра прошедшего сигнала  $U$  через участок листа пенополиэтилена с порезами различной длины  $l$  представлены на рис. 5.

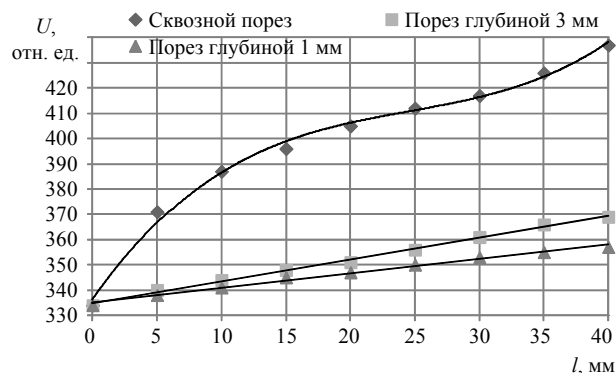


Рис. 5. График зависимости амплитудного параметра прошедшего сигнала  $U$  от длины порезов  $l$  различной глубины

Fig. 5. Graph of the dependence of the amplitude parameter of the passed signal  $U$  on the length of cuts  $l$  of various depths

Для всех порезов наблюдается рост амплитудного параметра прошедшего сигнала  $U$  с увеличением длины дефекта  $l$ . При этом рост изменения амплитудного параметра прошедшего сигнала  $U$  более выражен для сквозного пореза и уменьшается с уменьшением глубины пореза, также изменяется характер кривой: для

сквозного пореза наблюдается нелинейная зависимость, в то время как для несквозных порезов она линейна. Чувствительность к обнаружению порезов также зависит от его глубины и составляет для сквозного пореза  $K_U = 2,58$  отн. ед./мм, для пореза глубиной 3 мм –  $K_U = 0,88$  отн. ед./мм, для пореза глубиной 1 мм –  $K_U = 0,58$  отн. ед./мм, следовательно, сквозные порезы можно обнаружить более мелких размеров, чем несквозные.

Одним из технологических дефектов пенополиэтилена является расслоение. Данный дефект искусственно создавался в листе пенополиэтилена с использованием лезвия толщиной 0,5 мм и шириной 10 мм, что стало минимальным размером искусственного расслоения. Результаты измерения амплитудного параметра прошедшего сигнала  $U$ , выполненные для искусственного расслоения длиной  $l = 10, 15, 20, 25, 30, 35$  и 40 мм, представлены на рис. 6. Из графика видно, что с увеличением размера расслоения  $l$  амплитудный параметр  $U$  возрастает линейно и гораздо существеннее, чем для несквозных порезов, так как площадь расслоения больше. Чувствительность к обнаружению расслоения составила  $K_U = 2,2$  отн. ед./мм.

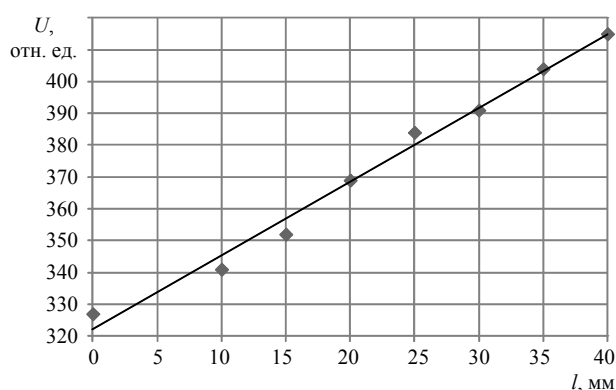


Рис. 6. График зависимости амплитудного параметра прошедшего сигнала  $U$  от длины  $l$  искусственного дефекта «расслоение»

Fig. 6. Graph of the dependence of the amplitude parameter of the passed signal  $U$  on the length  $l$  of the artificial defect «bundle»

Сравнительная чувствительность разработанного метода к дефектам различных типов представлена в таблице.

Проанализировав полученные данные, можно сделать вывод, что дефекты сквозные, существенно отличающиеся по плотности и ориентированные перпендикулярно направлению акустической волны, обнаруживаются с достаточно высокой чувствительностью.

### Чувствительность акустического метода прохождения к обнаружению дефектов различных типов

#### Sensitivity of acoustic transmission method to detection of various types of defects

Дефект	Чувствительность $K_U$ , отн. ед./мм
Вмятина (при нагрузке 75 Н) – после снятия нагрузки – после восстановления	4,85 3,48
Включение плотностью 1400 кг/м <sup>3</sup>	62,94
Порез: – сквозной – глубиной $l = 3$ мм – глубиной $l = 1$ мм	2,58 0,88 0,58
Отверстие	68,80
Расслоение	2,20

### Выводы

В работе показана возможность проведения контроля листов пенополиэтилена акустическим теньевым бесконтактным методом, обладающим высокой чувствительностью к дефектам различных типов (отверстие, вмятина, включение, порез и т. п.). Нарушение структуры листа пенополиэтилена понижает его акустико-подавляющие свойства, что вызывает рост амплитудного параметра прошедшего через лист сигнала. Оценка чувствительности к дефектам показала, что разработанная установка позволяет обнаруживать любые дефекты достаточно малых размеров за исключением несквозных порезов, для которых размер должен быть в несколько раз выше размеров минимально обнаруживаемых сквозных дефектов.

### Библиографические ссылки

1. Взаимосвязь электретных свойств пенополиэтилена и коэффициента их вспенивания / И. Р. Гильманов, М. Ф. Галиханов, А. Р. Гильманова, М. А. Дымова // Вестник технологического университета. 2018. Т. 21, № 9. С. 42–45.
2. Белокуров В. Н., Жаворонков А. И., Лукина Л. А. Анализ эксплуатационных свойств армированных композитных материалов в бытовой технике // Сервис в России и за рубежом. 2014. № 4. С. 24–31. DOI: 10.12737/4849.
3. Белокуров В. Н., Завязкина Л. С., Шагунов Д. В. Условия получения полимерных материалов с заданными деформационными показателями // Науковедение. 2015. Т. 7, № 1. С. 92–106. DOI: 10.15862/128TVN115.
4. 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.

5. Системы изоляции объектов для хранения техники / К. А. Тер Закарян, Е. А. Шокодько, Е. Д. Фомина, Е. Ю. Жукова // Московский экономический журнал. 2019. № 3. С. 26–34.

6. Пенополиэтилен как теплоизоляция для холодного климата / А. Д. Жуков, Б. А. Ефимов, Ю. В. Сазонова, А. Ю. Жуков // Научное обозрение. 2017. № 15. С. 10–14.

7. Дроздова Л. Ф., Чеботарева Е. Ю., Кудяев А. В. Обзор современных компрессорных установок и материалов для снижения их шума // *Noise theory and practice*, 2018, vol. 4, no. 2, pp. 11-20.

8. Композиционные материалы и их применение в обувном производстве / И. Ш. Абдуллин, Р. Г. Ибрагимов, Г. Ш. Музафарова, Э. М. Саматова // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 19. С. 150–154.

9. Ковалевский В. Тепловая изоляция для объектов трубопроводного транспорта нефти // Технологии топливно-энергетического комплекса. 2006. № 1. С. 58–63.

10. Жарова Ю. А. Обзор методов неразрушающего контроля изделий авиационной техники из полимерных композиционных материалов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. № 1-1. С. 34–38.

11. Перрен А. А., Баганик А. М. Неразрушающий контроль полимерных композитных материалов в судостроении // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 3 (53). С. 24–26.

12. Неразрушающие методы контроля содержания связующих в полимерных композитных материалах / В. И. Постнов, О. Л. Бурхан, А. Э. Рахматуллин, С. И. Качура // Труды ВИАМ. 2013. № 12. С. 6–24.

13. Молин С. М., Леньков С. В. Моделирование и экспериментальные исследования поведения модельного объекта испытаний при вибрационном нагружении // Вестник ИжГТУ. 2005. № 1. С. 3–6.

14. Леньков С. В., Молин С. М., Копытов А. Г. Резонансный метод измерения вязкоупругих свойств демпфирующих материалов типа пористых закрытоячеистых пенополиэтиленов // Дефектоскопия. 2014. № 3. С. 57–63. DOI: 10.1134/S1061830914030061.

15. Неразрушающий контроль. Т. 3. Ультразвуковой контроль / под ред. В. В. Ключева. М.: Машиностроение, 2004. 846 с.

16. Методика и устройство для экспериментальной оценки акустического импеданса вязкоупругих сред / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, Д. В. Злобин, О. П. Богдан, В. Н. Сяктерев, В. В. Волков // Приборы и методы измерений. 2017. Т. 8, № 4. С. 314–326. DOI: 10.21122 / 2220-9506-2017-8-4-314-326.

17. Экспериментальная оценка интенсивности ультразвукового излучения медицинского оборудования на основе анализа размеров равновесных газовых пузырьков в жидкости / О. В. Муравьева, О. П. Богдан, Д. В. Злобин, В. Н. Милич, С. И. Масленников, Ю. С. Дудина // Приборы и техника эксперимента. 2017. Т. 60, № 1. С. 136–141. DOI: 10.7868/S0032816217010104.

18. Исследования структурного и напряженно-деформированного состояния рельсов текущего производства методом акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, И. В. Булдакова, Л. В. Гущина // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21, № 2. С. 13–23. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-13-23.

19. Трифонова С. И., Генералов А. С., Далин М. А. Современные технологии и средства теневого ультразвукового контроля полимерных композиционных материалов // В мире неразрушающего контроля. 2016. Т. 19, № 1. С. 31–35.

## References

1. Gil'manov I.R., Galikhanov M.F., Gil'manova A.R., Dymova M.A. [The relationship of the electret properties of polyethylene foam and their foaming coefficient]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2018, vol. 21, no. 9, pp. 42-45 (in Russ.).

2. Belokurov V.N., Zhavoronkov A.I., Lukina L.A. [Analysis of the operational properties of reinforced composite materials in household appliances]. *Servis v Rossii i za rubezhom*, 2014, no. 4, pp. 24-31 (in Russ.). DOI: 10.12737/4849.

3. Belokurov V.N., Zavyazkina L.S., Shagunov D.V. [Conditions for the production of polymeric materials with specified deformation indicators]. *Naukovedenie*, 2015, vol. 7, no. 1, pp. 92-106 (in Russ.). DOI: 10.15862/128TVN115.

4. Pankratov A.V., Matyukhina G.N., Panov Yu.T., Fridman O.A. [The effect of mineral fillers on the properties of chemically cross-linked polyethylene foam]. *Plasticheskie massy*, 2010, no. 7, pp. 32-34 (in Russ.).

5. Ter Zakaryan K.A., Shokod'ko E.A., Fomina E.D., Zhukova E.Yu. [Storage Systems for Storage Technology]. *Moskovskii ekonomicheskii zhurnal*, 2019, no. 3, pp. 26-34 (in Russ.).

6. Zhukov A.D., Efimov B.A., Sazonova Yu.V., Zhukov A.Yu. [Polyethylene foam as thermal insulation for cold climates]. *Nauchnoe obozrenie*, 2017, no. 15, pp. 10-14 (in Russ.).

7. Drozdova L.F., Chebotareva E.Yu., Kudaev A.V. [Overview of modern compressor systems and materials to reduce their noise]. *Noise theory and practice*, 2018, vol. 4, no. 2, pp. 11-20 (in Russ.).

8. Abdullin I.Sh., Ibragimov R.G., Muzafarova G.Sh., Samatova E.M. [Composite materials and their use in shoe production]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, no. 19, pp. 150-154 (in Russ.).

9. Kovalevskii V. [Thermal insulation for oil pipeline transport facilities]. *Tekhnologii toplivno-energeticheskogo kompleksa*, 2006, no. 1, pp. 58-63 (in Russ.).

10. Zharova Yu.A. [A review of non-destructive testing methods for aircraft products made of polymer composite materials]. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, 2014, no. 1-1, pp. 34-38 (in Russ.).

11. Perren A.A., Baganik A.M. [Non-destructive testing of polymer composite materials in shipbuilding].

*V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 2011, no. 3, pp. 24-26 (in Russ.).

12. Postnov V.I., Burkhan O.L., Rakhmatullin A.E., Kachura S.M. [Non-destructive methods for controlling the content of binders in polymer composite materials]. *Trudy VIAM*, 2013, no. 12, pp. 6-24 (in Russ.).

13. Molin S.M., Len'kov S.V. [Modeling and experimental studies of the behavior of a model test object under vibration loading]. *Vestnik IzhGTU*, 2005, no. 1, pp. 3-6 (in Russ.).

14. Len'kov S.V., Molin S.M., Kopytov A.G. [Resonance method for measuring the viscoelastic properties of damping materials such as porous closed-cell polyethylene foams]. *Defektoskopiya*, 2014, no. 3, pp. 57-63 (in Russ.). DOI: 10.1134/S1061830914030061.

15. Klyueva V.V. (ed.). *Ul'trazvukovoi kontrol'* [Ultrasound testing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 846 p. (in Russ.).

16. Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Zlobin D.V., Bogdan O.P., Syakterev V.N., Volkov V.V. [Methodology and device for experimental estimation of acoustic

impedance of viscoelastic media]. *Pribory i metody izmerenii*, 2017, vol. 8, no. 4, pp. 314-326 (in Russ.). DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-314-326.

17. Murav'eva O.V., Bogdan O.P., Zlobin D.V., Milich V.N., Maslennikov S.I., Dudina Yu.S. [Eksperimental'naya otsenka intensivnosti ul'trazvukovogo izlucheniya meditsinskogo oborudovaniya na osnove analiza razmerov ravnovesnykh gazovykh puzyr'kov v zhidkosti]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2017, vol. 60, no. 1, pp. 136-141 (in Russ.). DOI: 10.7868/S0032816217010104

18. Murav'ev V.V., Volkova L.V., Platonov A.V., Buldakova I.V., Gushchina L.V. [Studies of the structural and stress-strain state of current production rails using acoustoelasticity]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2018, vol. 21, no. 2, pp. 13-23 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-13-23.

19. Trifonova S.I., Generalov A.S., Dalin M.A. [Modern technologies and means of shadow ultrasonic testing of polymer composite materials]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 31-35 (in Russ.).

### Investigation of Characteristics of Sheets of Polyurethane Foam Using Acoustic Methods

*O.P. Bogdan*, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*O.V. Murav'eva*, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*A.V. Platonov*, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*D.S. Rysev*, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*The paper presents the developed installation and a new method of contactless acoustic control of sheets made of Styrofoam, based on the registration of the amplitude parameter of the pulse signal that passed through the sheet. It allows detecting various types of defects of different sizes, which is quite essential when using Styrofoam in particularly dangerous areas of the industry: oil and gas, aviation, nuclear, etc.*

*A new method of control of polyethylene foam sheets has been developed, based on an acoustic shadow non-contact method using the high-frequency area of the sound range (5...13 kHz). The essence of the non-contact acoustic shadow method is the analysis of the wave's amplitude change passed through the polyethylene foam sheet due to the defect [19]. For researches, the unique scientific installation "Information-measuring complex for investigation of acoustic properties of materials and products" (registered on the portal of the scientific and technological infrastructure of the Russian Federation <http://ckp-rf.ru>) is used. It includes an information-measuring system for non-contact excitation, registration, and measurement of acoustic wave parameters in porous media.*

*The study of the possibility of detecting various types of defects was carried out for artificial defects, such as a dent (immediately after the formation and after the restoration of the sheet), a cut (through and non-through), an inclusion (much higher in density), a hole, and delamination. Measurements of the amplitude parameter of the pulse signal passed through a sheet of polyethylene foam in the area of the location of artificial defects of various sizes allowed us to assess the sensitivity of the installation and methodology.*

*Analyzing obtained data, it can be concluded that the penetration defect, heterogeneity, density, and defects, the plane of which is perpendicular to the direction of the acoustic waves are detected with quite high sensitivity. Therefore, the minimum size of detection is comparable with the foam's pore size, except for non-through cuts, in which the defect size should be several times higher since sensitivity to defects is below the measurement error (1 relative unit).*

**Keywords:** polyurethane foam, acoustic control, shadow method, artificial defects, safety.

Получено 04.06.2020

#### Образец цитирования

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.

#### For Citation

Bogdan O.P., Murav'eva O.V., Platonov A.V., Rysev D.S. [Investigation of Characteristics of Sheets of Polyurethane Foam Using Acoustic Methods]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 2, pp. 61-68 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-2-61-68.