

УДК 620.179.16

DOI: 10.22213/2410-9304-2020-2-28-36

Универсальная экспериментальная установка для проведения акустических исследований*

Д. В. Злобин, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова,
Ижевск, Россия

Л. В. Волкова, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова,
Ижевск, Россия

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

Т. И. Земсков, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

С. В. Казанцев, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Проведение большого числа различных исследований в области акустического контроля обусловило необходимость разработки экспериментального оборудования, способного при небольших затратах обеспечить требуемый спектр характеристик (работа в широком частотном диапазоне, использование преобразователей различных типов и т. п.). В статье описана конструкция универсального акустического измерительного (экспериментального) стенда, предназначенного для решения спектра задач, связанных с разработкой оригинальных методик акустического неразрушающего контроля. Установка построена на широко доступных компонентах, возможна ее простая модернизация.

Приведены примеры методик контроля различных объектов, в том числе и протяженных, разработанные с ее помощью в разных частотных диапазонах и с использованием разных типов акустических волн. В частности, универсальная установка для проведения акустических исследований использована при оценке влияния коррозии и КРН на скорость рэлеевской волны. Измерения проводились в рамках исследования возможности оценки состояния металла магистральных трубопроводов по изменению скорости рэлеевских волн. Результаты исследований показали отклонение скорости рэлеевской волны не более чем на 100 м/с от эталонного значения при максимальной погрешности ее измерения не более 0,7 %.

Ключевые слова: генератор импульсов, акустический контроль, широкополосный усилитель, измерительное оборудование, ультразвук.

Введение

В настоящее время приборы акустического контроля представлены на рынке сравнительно узким диапазоном ультразвуковых (УЗ) дефектоскопов и толщиномеров. Несмотря на большое количество функций, базовые принципы их работы остались неизменными и предполагают регистрацию отраженных или прошедших УЗ-сигналов с частотой из стандартного ряда (ГОСТ 12090–80) в диапазоне 1,25–10 МГц [1–17]. В то же время существует ряд задач, требующих излучения и приема сигналов в других частотных диапазонах.

Примерами подобных экспериментальных исследований являются: контроль длинномерных объектов волнами Похгаммера (до 100 кГц) [18–20], бесконтактное прозвучивание современных композитных материалов, использование ТН-волн для контроля листов или стенок сосудов и др. [21–25]. Как правило, разработка подобных методик состоит из следующих этапов: выбор частотного диапазона, разработка конструкции преобразователей, точная настройка параметров зондирующего импульса и амплитудно-частотной характеристики усилительного тракта для конкретного объ-

© Злобин Д. В., Волкова Л. В., Богдан О. П., Земсков Т. И., Казанцев С. В., 2020

* Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10122) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

екта. Оборудование, позволяющее гибко регулировать перечисленные параметры, на рынке практически не представлено.

Целью работы является разработка универсальной экспериментальной установки для проведения акустических исследований и измерений в широком диапазоне частот, а также ее апробация в лабораторных условиях для решения различных исследовательских задач.

Используемые подходы

Для проведения таких исследований разработана экспериментальная установка, принципиальная схема которой представлена на рис. 1. Ее основой является задающий генератор, выполненный на интегральной микросхеме 74HC132 (4 элемента И-НЕ с триггером Шмитта). Частота повторения импульсов определяется генератором на элементе DD1.1, позволяющим при указанных номиналах устанавливать значения частоты 1–1000 Гц. Длительность зондирующего импульса определяется из номиналов

R2, C2, C3, для удобства введено переключение поддиапазонов 50 нс – 10 мкс и 10 мкс – 200 мкс, что соответствует условно «низкочастотным» и «высокочастотным» задачам. Преимуществом применения данной схемы перед известными решениями, например, на таймере 555, является более широкий диапазон перекрытия и высокая скорость нарастания сигналов.

Отвод от 3-го вывода интегральной микросхемы DD1 служит для формирования выхода синхросигнала установки. Генератор управляет затвором полевого транзистора VT2, в качестве которого может быть применен любой полевой транзистор с параметрами, необходимыми в данном конкретном случае. Потенциометр R8 позволяет изменять скорость открытия транзистора, что бывает полезно для предотвращения генерации высокочастотных гармоник акустического сигнала (например, в случае возможности существования в объекте нескольких акустических мод).

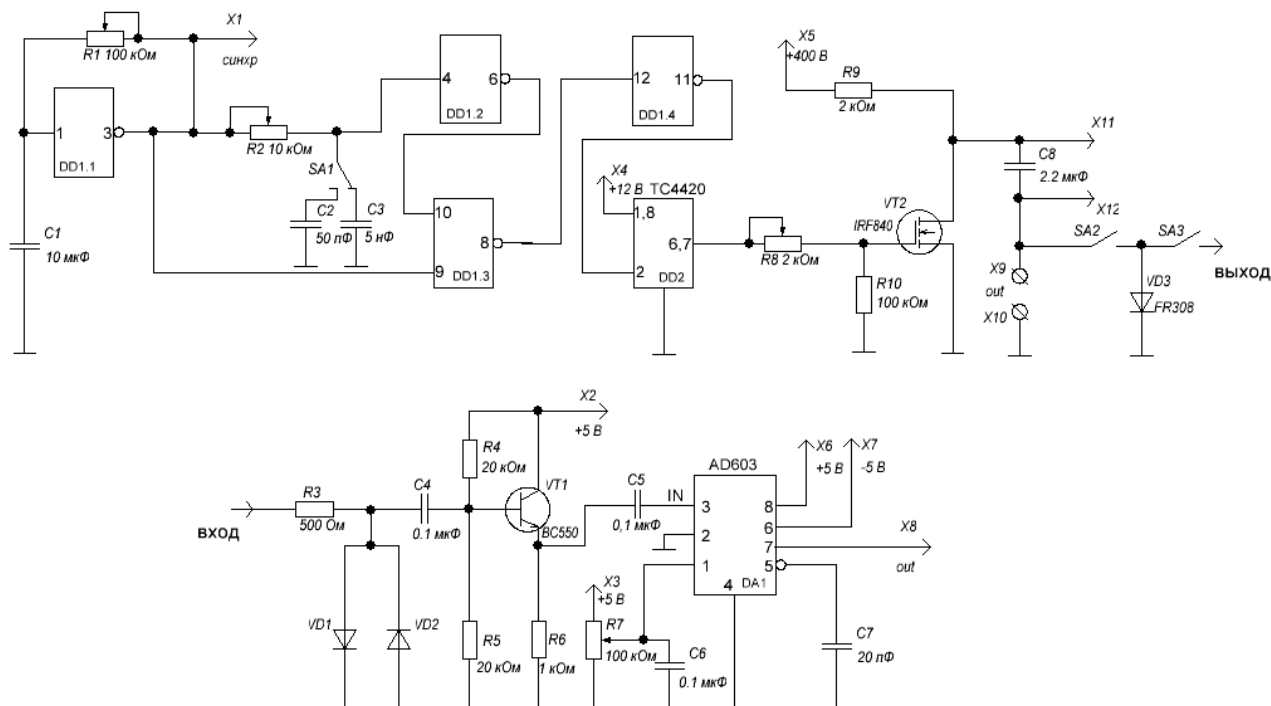


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема экспериментальной универсальной установки для проведения акустических исследований (DD1 74HC132, VD1,2 1N4148)

Генератор осуществляет ударное возбуждение преобразователя, причем позволяет эффективно возбуждать как пьезоэлектрический, так и электромагнитно-акустический

преобразователи. Контакты X11 и X12 служат для подключения дополнительной емкости, выключатель SA2 коммутирует диод, шунтирующий индуктивный выброс. При

необходимости подстройки длительности зондирующего импульса значение емкости $C8$ выбирается таким, чтобы к моменту закрытия транзистора на ней еще присутствовал существенный по величине заряд. В этом случае становится возможным формирование сигналов от передних и задних фронтов зондирующего импульса, что позволяет удвоить эффективность возбуждения.

Усилительная часть установки выполнена на базе микросхемы AD603, представляющей собой управляемый напряжением усилитель с достаточно высокими характеристиками. Производителем микросхемы AD603 гарантируются следующие параметры: коэффициент усиления $K_y = 50$ дБ в полосе частот $0 \dots 9$ МГц, $K_y = 30$ дБ в полосе частот $0 \dots 90$ МГц. При необходимости получения большего усиления схема может быть дополнена вторым каскадом, аналогичным по построению. Для компенсации сравнительно низкого (100 Ом) входного сопротивления микросхемы ее вход буферизирован эмиттерным повторителем на транзисторе VT1. Кроме того, на входе установлена стандартная защитная цепь R3, VD1,2, предотвращающая перегрузку входного тракта высоковольтным зондирующим

импульсом. Регулировка усиления осуществляется потенциометром R7, напряжение которого воздействует на вход G+ микросхемы. Стоит отметить, что схема установки построена таким образом, что допускает ее простую поблочную модернизацию. Например, формирователь зондирующих импульсов может быть выполнен на микроконтроллере с более точным управлением временными параметрами зондирующего импульса, с помощью того же микроконтроллера методом широтно-импульсной модуляции может быть сформировано управляющее усилением напряжение, например, при построении систем с автоматической регулировкой усиления. Частотная характеристика тракта (избыточно широкая для большинства задач) может быть скорректирована установкой на входе и выходе соответствующих фильтров.

Материалы и методы

В качестве примера использования установки в низкочастотной области (≈ 20 кГц) приведена схема экспериментов (рис. 2) с разработанным на кафедре перспективным раздельно-совмещенным преобразователем для контроля длинномерных объектов.



Рис. 2. Схема проведения контроля прутка с использованием универсальной установки для проведения акустических исследований

Раздельно-совмещенный преобразователь устанавливается на поверхность объекта контроля (прутка диаметром 8 мм, длиной 1940 мм) вблизи торца и возбуждает крутильную волну, серия переотраженных импульсов которой на дефектном и бездефектном объектах показана на рис. 3.

Эффективность работы установки в высокочастотной области (2,5 МГц) демонст-

рируется экспериментом, схема которого показана на рис. 4. Пьезоэлектрический преобразователь работает в совмещенном режиме, амплитуда возбуждения 150 В, при этом на расстоянии 130 мм уверенно фиксируется сигнал от бокового цилиндрического отверстия диаметром 3 мм (рис. 5).

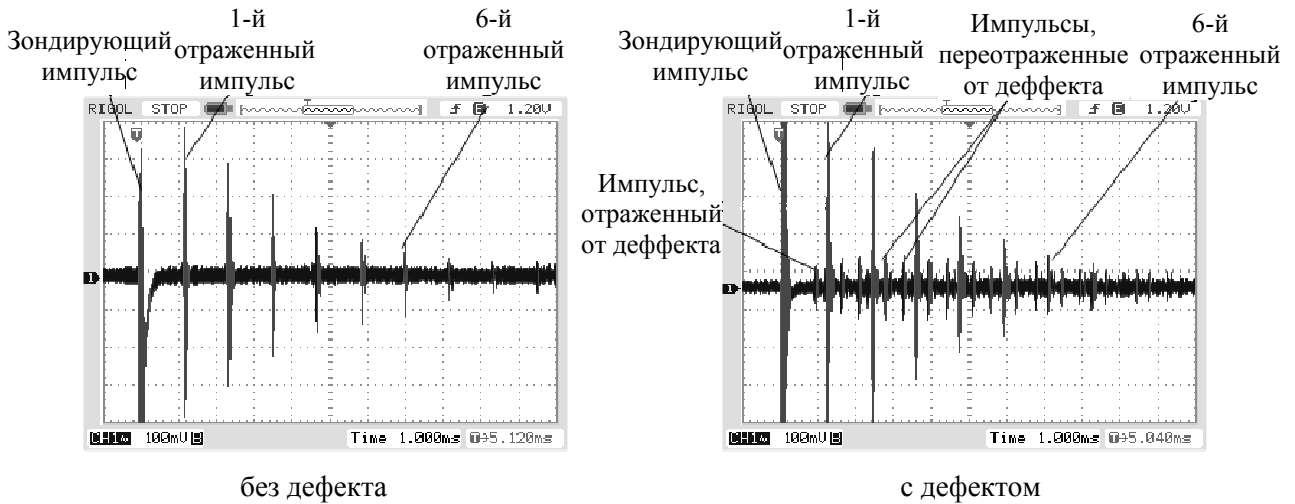


Рис. 3. Эхограммы, полученные при контроле прутков с дефектом и без дефекта

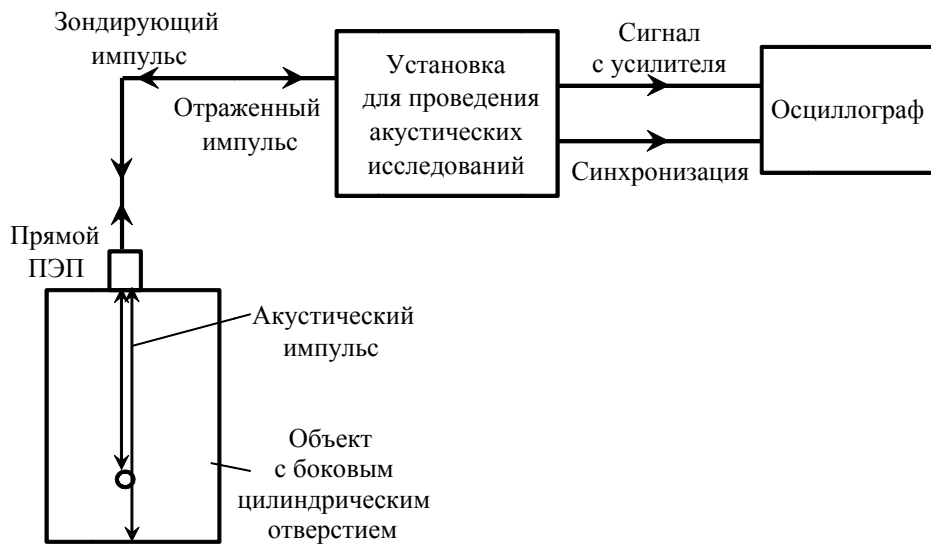


Рис. 4. Схема проведения контроля объекта с боковым цилиндрическим отверстием с использованием универсальной установки для проведения акустических исследований

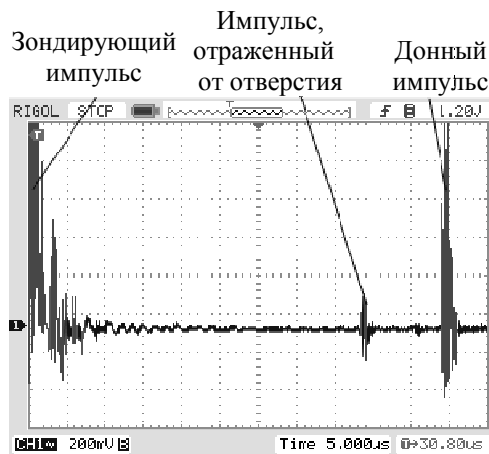


Рис. 5. Эхограмма, полученная при контроле объекта (толщина 165 мм) с боковым цилиндрическим отверстием (диаметр 3 мм, глубина 130 мм)

За время эксплуатации установка зарекомендовала себя надежным, хорошо повторяемым, гибким устройством. С ее помощью был проведен ряд интересных научных исследований, разработаны оригинальные конструкции акустических преобразователей и методики контроля:

- в низкочастотной области (10–100 кГц) разработаны методика контроля композитных и пористых материалов; методика дефектоскопии насосных штанг; методика дефектоскопии насосно-компрессорных труб; методика волноводного акустического контроля прутков, заготовок насосных штанг НШ 22, утяжеленных насосных штанг ШУТ32, ШУТ 44; методика волноводного акустического контроля проката диаметром 10 мм;

- в высокочастотной области (0,5–10 МГц) разработаны методика оценки остаточных напряжений в цельнокатаных железнодорожных колесах; методика оценки остаточных напряжений и натяга в бандажах локомотивных колес, методика испытаний тонких холоднокатаных стальных проволок; методика многократного зеркально-теневого электромагнитно-акустического контроля прутков заготовок утяжеленных насосных штанг ШУТ32, ШУТ 44; методика многократного зеркально-теневого электромагнитно-акустического контроля проката диаметром 10 мм; методика измерения скоростей упругих волн в твердых телах; методика определения упругих модулей твердых тел; методика определения анизотропии акустических свойств листового,

трубного, пруткового проката; методика определения акустического импеданса вязкоупругих сред; методика определения остаточных напряжений в рельсах при изготовлении; методика определения термических напряжений в рельсах при эксплуатации; методика определения двухосного напряженно-деформированного состояния в трубах и пластинах [16–25].

Измерение скорости рэлеевской волны

Универсальная установка для акустических измерений использована, в том числе, для исследования влияния на скорость рэлеевской волны наличия коррозии и коррозионного растрескивания под напряжением (КРН), что является важной задачей, решение которой позволяет предотвратить появление опасных утечек на магистральных нефте- и газопроводах. Исследования проводились на образцах труб с помощью раздельно-совмещенного пьезопреобразователя (РС ПЭП) П122-2,5-56 R03 (рис. 6). В процессе измерения определялось время t прохождения рэлеевской волны по участку трубы, равному базе преобразователя, с помощью разработанной установки и осциллографа, пример регистрируемой осциллограммы представлен на рис. 7. Скорость рэлеевской волны определялась по формуле

$$C_R = \frac{L}{t - 2t_{\text{пр}}},$$

где $2t_{\text{пр}} = 8,04$ мкс – время прохождения волны в призме, $L = 60$ мм – расстояние, пройденное рэлеевской волной в образце.

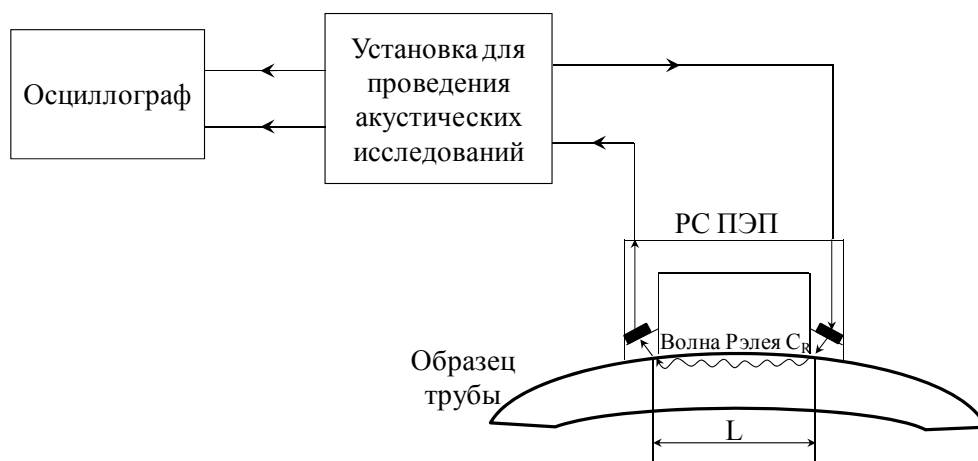


Рис. 6. Схема измерения скорости рэлеевской волны в трубе

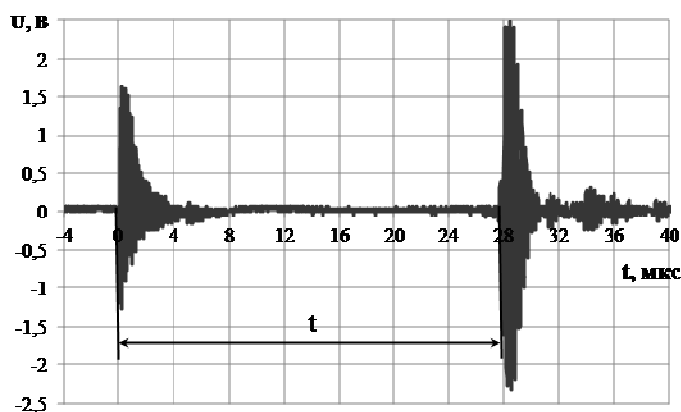


Рис. 7. Эхограмма, полученная при измерении скорости рэлеевской волны

Анализ результатов

Результаты измерений скорости рэлеевской волны в дефектных образцах и образцах после устранения дефектов, а также их характеристики приведены в таблице.

Результаты измерения скорости рэлеевской волны в трубе

Образец трубы (диаметр D , толщина стенки h)	Качество поверхности	Время между зондирующим и принятым импульсами t , мкс	Время прохождения волны в образце $t_{ок}$, мкс	Скорость рэлеевской волны C_R м/с
№ 3 ($D=1220$ мм, $h=16$ мм)	КРН	27,26	19,22	3122±11
	Зачищено	27,02	18,98	3161±23
№ 4 ($D=1420$ мм, $h=15,7$ мм)	Зачищено	27,90	19,86	3021±0
№ 5 ($D=1420$ мм, $h=15,7$ мм)	Зачищено	27,88	19,84	3024±8
№ 6 ($D=1420$ мм, $h=16$ мм)	КРН	28,08	20,04	2994±8
	Зачищено	27,90	19,86	3021±0
№ 7 ($D=1420$ мм, $h=18,5$ мм)	КРН	28,02	19,98	3003±8
	Зачищено	27,90	19,86	3021±13
№ 8 ($D=1020$ мм, $h=18,5$ мм)	Коррозия	28,52	20,48	2930±8
	Зачищено	27,94	19,90	3015±10
№ 9 ($D=1220$ мм, $h=18,5$ мм)	Коррозия	28,10	20,06	2991±0
	Зачищено	27,78	19,74	3040±9
№ 10 ($D=1420$ мм, $h=15,6$ мм)	Ржавчина	28,18	20,14	2979±8
	Коррозия	27,88	19,84	3024±9

Анализ полученных данных показывает, что при наличии в образце участков, подверженных КРН, скорость волны уменьшается по сравнению с бездефектным участком данного образца. Поскольку величина изменения скорости достаточно мала (не более 100 м/с), при регистрации использовался недетектированный сигнал, производилась точная фиксация момента пересечения определенного периода с поддержанием

неизменной амплитуды за счет регулировки усиления в тракте экспериментальной установки. Причем данное явление может быть обусловлено двумя факторами: действительным замедлением распространения волны по неровной поверхности, а также существенным смещением спектральных составляющих акустического импульса в сторону более низких частот. Погрешность измерения скорости рэлеевской волны

не превышает 23 м/с, что составляет всего 0,7 % и является меньше погрешности существующих аналогичных специализированных устройств. При решении задачи выявления наличия в трубе поврежденных коррозией участков возможен многофакторный анализ, учитывающий, кроме временных, частотные параметры принятого импульса.

Выводы

Таким образом, разработанная установка для проведения акустических исследований действительно позволяет проводить самый широкий спектр экспериментальных работ в области акустического неразрушающего контроля. Она обладает простой, легко повторяемой конструкцией, несколько изготовленных образцов установки показали хорошую воспроизводимость параметров. Кроме того, установка не содержит дорогостоящих комплектующих, за счет этого ее себестоимость на порядок ниже покупного специализированного оборудования для проведения исследований. Методики, разработанные с ее помощью, эффективно используются в научных исследованиях – измерениях свойств композитных и пористых материалов, исследованиях в области контроля протяженных объектов, оценки состояния металла магистральных трубопроводов, в разрабатываемых приборах неразрушающего контроля.

Библиографические ссылки

1. *Толипов Х. Б., Клещев Д. Г., Березин В. М.* Использование волн Лэмба для измерения толщины тонких металлических пленок // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 2. С. 137–139. DOI: 10.7868/S0032816217020148.
2. *Шкелев Е.И., Ширкаев А.В.* Акустический измеритель временной задержки // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 4. С. 25–30. DOI: 10.1134/S0032816218040298.
3. *Лобастов С. А., Герасимов С. И.* Сферические пьезокерамические датчики для измерения параметров ударных волн // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 1. С. 104–108. DOI: 10.7868/S0032816217010098.
4. *Ибрагимов Н. Ю., Ибрагимова Э. Н.* Дефектоскопическая установка трещиномер силикатных покрытий труб // Дефектоскопия. 2017. № 11. С. 55–57.
5. *Аббакумов К. Е., Коновалов Р. С., Цанлев В. М.* Экспериментальное исследование дискового биморфного пьезоэлектрического генератора // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2014. № 9. С. 59–63.
6. *Montinaro N, Epasto G., Cerniglia D., Guglielmino E.* Laser ultrasonics inspection for defect evaluation on train wheel // NDT & E International. 2019. Vol. 107. Pp. 102-145. (DOI: 10.1016/j.ndteint.2019.102145).
7. *Peng D., Jones R., Constable T., Lingama-naik S.N., Chen B.K.* The tool for assessing the damage tolerance of railway wheel under service conditions // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2012. Vol. 57. Pp. 1-13. (DOI: 10.1016/j.tafmec.2011.12.002).
8. *Yamamoto S., Hoshi T., Miura T., Semboshi J., Ochiai M., Fujita Y., Ogawa T., Asai S.* Defect Detection in Thick Weld Structure Using Welding In-Process Laser Ultrasonic Testing System // Materials transactions. 2014. Vol. 55, P. 998-1002. DOI: 10.2320/matertrans.I-M2014809.
9. *Mihaljević M., Markučić D., Runje B., Keran Z.* Measurement uncertainty evaluation of ultrasonic wall thickness measurement // Measurement. 2019. Vol. 137. Pp. 179-188. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.01.027.
10. *Lo F., Bonfanti M.S.* A novel device for measuring the ultrasonic wave velocity and the thickness of hyperelastic materials under quasi-static deformations // Polymer Testing. Vol. 74. Pp. 235-244. DOI: 10.1016/j.polymeresting.2019.01.005.
11. *Minin S.I., Trofimov A.I., Trofimov M.A.* Automated ultrasonic system residual stresses in the welded joints of the circulation pipe NPP // Nuclear Energy and Technology. Vol. 2. Pp. 236-239. DOI: 10.1016/j.nucet.2016.11.002.
12. *Bruggera C., Palin-Luca P., Osmondb P., Blanc M.* A new ultrasonic fatigue testing device for biaxial bending in the gigacycle regime // International Journal of Fatigue. Vol. 100. Pp. 619-626. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.12.039.
13. *Vieira M., Reis L., Freitas M., Ribeiro A.* Strain measurements on specimens subjected to biaxial ultrasonic fatigue testing // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. Vol. 85. Pp. 2-8. DOI: 10.1016/j.tafmec.2016.08.007.
14. *Kurashkin K., Mishakin V., Rudenko A.* Ultrasonic Evaluation of Residual Stresses in Welded Joints of Hydroelectric Unit Rotor Frame // Materialstoday: proceedings. Vol. 11. Pp. 163-168. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.12.125.
15. *Hunter C., Sapozhnikov O.A., Maxwell A.D., Khokhlova V.A., Wang Y.-N., MacConaghy B., Krei-*

der W. An Ultrasonic Caliper Device for Measuring Acoustic Nonlinearity // *Physics Procedia*. Vol. 87. Pp. 93-98. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.12.015.

16. Прибор для измерений скорости акустических волн в металлах и сплавах / В. В. Муравьев, Д. В. Злобин, С. В. Леньков, Н. Н. Зверев // *Приборы и техника эксперимента*. 2016. № 3. С. 142–146. DOI: 10.7868/S0032816216020245.

17. Муравьев В. В., Злобин Д. В., Платунов А. В. Прибор для исследований акустоупругих характеристик тонких проволок // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2017. Т. 60. № 6. С. 572–577.

18. Акустический волноводный контроль элементов глубиннонасосного оборудования / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, Д. В. Злобин, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин, Ю. В. Мышкин // *Нефтяное хозяйство*. 2016. № 9. С. 110–115.

19. Злобин Д. В., Волкова Л. В. Влияние динамического подмагничивания на эффективность электромагнитно-акустического преобразования при волноводном контроле прутков // *Приборы и методы измерений*. 2017. Т. 8. № 3. С. 236–245. DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-236-245.

20. Муравьева О. В., Леньков С. В., Мурашов С. А. Крутильные волны, возбуждаемые электромагнитно-акустическими преобразователями, при акустическом волноводном контроле трубопроводов // *Акустический журнал*. 2016. Т. 62. № 1. С. 117–124. DOI: 10.7868/S032079191506009X.

21. Анализ отражённых сигналов при контроле цилиндрических образцов многократным зеркально-теневым методом / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, М. А. Габбасова, И. В. Булдакова, М. Ю. Соков // *Автометрия*. 2016. Т. 52. № 4. С. 62–70. DOI: 10.15372/AUT20160408.

22. Муравьева О. В., Зорин В. А. Метод многократной тени при контроле цилиндрических объектов с использованием рэлеевских волн // *Дефектоскопия*. 2017. № 5. С. 3–9.

23. Муравьева О. В., Муравьев В. В. Методические особенности использования SH-волн и волн лэмба при оценке анизотропии свойств листового проката // *Дефектоскопия*. 2016. № 7. С. 3–11.

24. 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.

25. Муравьев В. В., Тапков К. А. Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов

при изготовлении // *Приборы и методы измерений*. 2017. Т. 8. № 3. С. 263–270. DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-263-270.

References

1. Tolipov K.B., Kleshchev D.G., Berezin V.M. (2017). *Instruments and Experimental Techniques*, vol. 60, no. 2, pp. 284-286. DOI: 10.1134/S0020441217020142.

2. Shkelev E.I., Shirkaev A.V. (2018). *Instruments and Experimental Techniques*, vol. 61, no. 4, pp. 486-490. DOI: 10.1134/S0020441218040243.

3. Lobastov S.A., Gerasimov S.I. (2017). *Instruments and Experimental Techniques*, vol. 60, no. 1, pp. 107-111. DOI: 10.1134/S0020441217010092.

4. Ibragimov N. Ju., Ibragimova Je. N. (2017). *Defektoskopija*, [Flaw detection], no. 11. pp. 55–57 (in Russ.).

5. Abbakumov K. E., Kononov R. S., Caplev V. M. (2014). *Izvestija SPbGJeTU LJeTI* [News LETI], no. 9, pp. 59–63 (in Russ.).

6. Montinaro N, Epasto G., Cerniglia D., Guglielmino E. (2019). *NDT & E International*, vol. 107, pp. 102-145. DOI: 10.1016/j.ndteint.2019.102145.

7. Peng D., Jones R., Constable T., Lingamanaik S.N., Chen B.K. (2012). *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 57, pp. 1-13. DOI: 10.1016/j.tafmec.2011.12.002.

8. Yamamoto S., Hoshi T., Miura T., Semboshi J., Ochiai M., Fujita Y., Ogawa T., Asai S. (2014). *Materials transactions*, vol. 55, pp. 998-1002. DOI: 10.2320/matertrans.I-M2014809.

9. Mihaljević M., Markučić D., Runje B., Keran Z. (2019). *Measurement*, vol. 137, pp. 179-188. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.01.027.

10. Lo F., Bonfanti M.S. (2019). *Polymer Testing*, vol. 74, pp. 235-244. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2019.01.005.

11. Minin S.I., Trofimov A.I., Trofimov M.A. (2016). *Nuclear Energy and Technology*, vol. 2, pp. 236-239. DOI: 10.1016/j.nucet.2016.11.002.

12. Bruggera C., Palin-Luca P., Osmond P., Blanc M. (2016). *International Journal of Fatigue*, vol. 100, pp. 619-626. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.12.039.

13. Vieira M., Reis L., Freitas M., Ribeiro A. (2016). *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 85, pp. 2-8. DOI: 10.1016/j.tafmec.2016.08.007.

14. Kurashkin K., Mishakin V., Rudenko A. (2018). *Materialstoday: proceedings*, vol. 11, pp. 163-168. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.12.125.

15. Hunter C., Sapozhnikov O.A., Maxwell A.D., Khokhlova V.A., Wang Y.-N., MacConaghy B., Kreider W. (2015). *Physics Procedia*, vol. 87, pp. 93-98. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.12.015.

16. Murav'ev V.V., Zlobin D.V., Len'kov S.V., Zverev N.N. (2016). *Instruments and Experimental Techniques*, vol. 59, no. 3, pp. 476-480. DOI: 10.1134/S002044121602024X.

17. Murav'ev V. V., Zlobin D. V., Platonov A. V. (2017). *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Priboroostroenie*. [News of higher educational institutions. Instrument making.], vol. 60, no. 6, pp. 572-577.

18. Murav'eva O.V., Strizhak V.A., Zlobin D.V., Murashov S.A., Prjahnin A.V., Myshkin Ju.V. (2016). *Neftjanoe hozjajstvo* [Oil industry], no. 9, pp. 110-115.

19. Zlobin D.V., Volkova L.V. (2017). *Devices and methods of measurements*, vol. 8, no. 3, pp. 236-245. DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-236-245.

20. Murav'eva O.V., Murashov S.A., Len'kov S.V. (2016). *Acoustical Physics*, vol. 62, no. 1, pp. 117-124. DOI: 10.1134/S1063771015060093.

21. Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Gabba-sova M.A., Buldakova I.V., Sokov M.Y. (2016). *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, vol. 52, no 4, pp. 367-373. DOI: 10.3103/S8756699016040087.

22. Murav'eva O.V., Zorin V.A. (2017). *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 53, no. 5, pp. 337-342. DOI: 10.1134/S1061830917050059

23. Murav'eva O.V., Murav'ev V.V. (2016). *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 52, no. 7, pp. 363-369. DOI: 10.1134/S1061830916070056.

24. Murav'ev V.V., Volkova L.V., Platonov A. V., Buldakova I.V., Gushhina L.V. (2018). *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov ISTU], vol. 21, no. 2, pp. 13-23. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-13-23.

25. Murav'ev V.V., Tapkov K.A. (2017). *Devices and methods of measurements*, vol. 8, no. 3, pp. 263-270. DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-263-270.

A Versatile Experimental Setup for the Acoustic Research

D. V. Zlobin, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

L. V. Volkova, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

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

T. I. Zemskov, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

S. V. Kazantsev, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

A large number of different studies in the field of acoustic control necessitated the development of experimental equipment capable of providing the required range of characteristics at low cost (operation in a wide frequency range, the use of transducers of various types, etc.). The paper describes the design of a universal acoustic measuring (experimental) stand designed to solve a range of problems associated with the development of original methods of acoustic non-destructive testing. The installation is built on widely available components, its simple upgrade is possible.

Examples of control methods for various objects, including extended ones, developed with its help, in different frequency ranges, and using different types of acoustic waves are given. In particular, the possibility of monitoring the extended objects in the low-frequency ultrasound region (of the order of 20 kHz), as well as the detection of defects in compact objects using the megahertz range of ultrasonic radiation, is shown.

A versatile setup for conducting acoustic studies was used to assess the effect of corrosion and SCC at the speed of the Rayleigh wave. Measurements were carried out as part of the study of the possibility of assessing the state of the metal of the main pipelines by changing the speed of Rayleigh waves. The research results showed a deviation of the Rayleigh wave velocity by no more than 100 m/s from the reference value, with a maximum error of its measurement of not more than 0.7%.

Keywords: pulse generator, acoustic control, broadband amplifier, measuring equipment, ultrasound.

Получено: 12.05.2020