

УДК 620.179.17+620.186.8

КОНТРОЛЬ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ

Муравьев В.В., Муравьева О.В., Дедов А.И., Байтеряков А.В.

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
г. Ижевск, Российская Федерация
e-mail: superdedov@mail.ru

Для определения структурного состояния металла в качестве информативного параметра предложены акустические структурные шумы. Представлены экспериментальные результаты использования акустических шумов для структуроскопии углеродистых и трубных сталей, подвергнутых термической обработке, коррозионному воздействию и растягивающим нагрузкам. Рассмотрено влияние размера зерна, наводороживания, растягивающей нагрузки на уровень акустических структурных шумов.

Ключевые слова: акустическая структуроскопия, размер зерна, текучесть, углеродистая сталь.

Введение

Магистральные и технологические нефтегазопроводы в процессе эксплуатации подвергаются воздействию циклически изменяющихся механических, тепловых нагрузок, а также коррозионно-активных сред.

Эти факторы вызывают изменение напряженно-деформированного состояния металла трубы, которое совместно с внутренним давлением может способствовать ускоренному развитию дефектов, особенно в местах с концентраторами напряжений, и приводить в конечном итоге к разрушению конструкции.

Существующие в настоящее время ультразвуковые, электромагнитные и вихретоковые дефектоскопы позволяют выявлять наличие уже образовавшихся достаточно крупных трещин. Однако существенно важнее вовремя обнаружить начальный этап процесса накопления поврежденности в металле путем определения изменений структурного состояния металла [1–5].

Исследованиям металлов методами акустической структуроскопии и поиску информативных параметров для описания структурного состояния металлов и сплавов посвящены работы [6–14].

В предлагаемой статье представлены результаты исследований влияния структурных изменений металла углеродистых и трубных сталей после термического, механического и коррозионного воздействий на средний уровень акустических структурных шумов.

Методика эксперимента

Структурный шум связан с рассеянием акустических волн на структурных неоднородностях, зернах металла. Импульсы, образовавшиеся в результате обратного рассеяния ультразвука на неоднородностях структуры, формируют структурный шум, имеющий вид отдельных близко расположенных пиков на индикаторе дефектоскопа. В зависимости от случайного соотношения фаз отдельных рассеянных импульсов они могут усилить или ослабить друг друга [14].

Во всех экспериментах использовался ультразвуковой раздельно-совмещенный (РС) преобразователь с резонансной частотой 5 МГц, характеризующийся малой мертвой зоной преобразования. В качестве опорного сигнала использовалась рэлеевская волна, т.н. «пролаза», возникший при переизлучении ультразвуковой волны в приемную призму. В отличие от донного сигнала, сигнал «пролаза» рэлеевской волны является наиболее стабильным при изменении качества контакта, шероховатости поверхности и не зависит от состояния донной поверхности.

Блок-схема установки, реализующая методику измерений, представлена на рисунке 1. Генератор электрических импульсов ультразвукового дефектоскопа ДУК-66 возбуждает излучающую пластину РС-преобразователя П112-5,0-Ø8. Рассеянные на структурных неод-

нородностях ультразвуковые (УЗ) импульсы регистрируются приемной пьезопластиной РС-преобразователя и усиливаются высокочастотным усилителем дефектоскопа на 80–90 дБ.

Для сохранения и дальнейшей обработки электрического сигнала структурных шумов к выходу «VideoSignal» дефектоскопа подключен цифровой осциллограф, синхронизированный с дефектоскопом через линию синхронизации (рисунок 2).

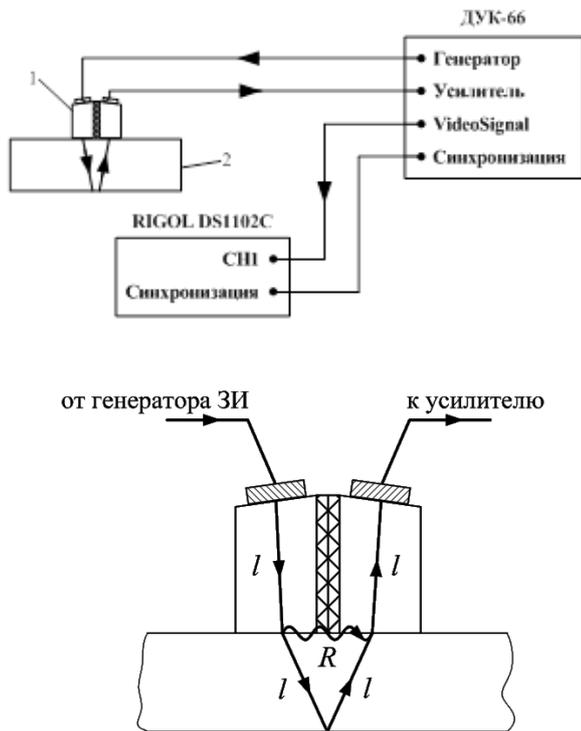


Рисунок 1 – Схемы контроля и формирования «пролаза» рэлеевской волны в зоне контакта объекта контроля и преобразователя: 1 – раздельно-совмещенный преобразователь; 2 – исследуемый образец; L – продольная волна, R – рэлеевская волна



Рисунок 2 – Осциллограмма импульсов на экране осциллографа: «пролаз», зона структурных шумов, донный импульс (ДИ)

Определение размера зерна стали 45

Для апробации разработанной методики исследования структурных шумов подготовлены образцы из круглого проката конструкционной стали 45 в виде дисков диаметром 50 мм и высотой 20 мм после различных термических обработок, реализующих различные структуры с разным номером зерна.

На основании полученных данных построен график зависимости среднего диаметра зерна от отношения структурного шума U_{sn} к «пролазу» рэлеевской волны U_R для исследованных образцов (рисунок 3). Наличие явной зависимости уровня структурных шумов от размера зерна свидетельствует о возможности использования разработанной методики для оценки структуры металла.

Анализ результатов теоретических и экспериментальных (металлографических и акустических) исследований показывает, что амплитуда УЗ-волн, отраженных от структурных элементов, пропорциональна размеру зерен в термически обработанных образцах исследуемой стали 45. Выявлена явная зависимость между величиной зерен в образцах исследуемой стали 45, полученных после различных видов термической обработки, и усредненной амплитудой структурных шумов.

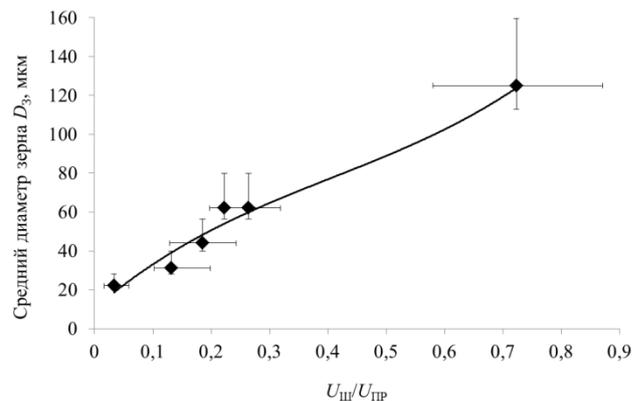


Рисунок 3 – Зависимость структурных шумов от размера зерна

Наводороживание стали 45

Для исследований был подготовлен образец из круглого проката конструкционной стали 45 в виде диска диаметром 55 мм и высотой 20 мм.

Процесс электролитического наводороживания проводился в емкости с однонормальным раствором серной кислоты H_2SO_4 при плотности катодного тока $I \approx 50 \text{ mA/cm}^2$.

Исследуемый образец находился в процессе наводороживания 6 ч. При этом для проведения измерений структурного шума образец извлекался из ячейки через 30 мин, 1 ч, 2 ч, 4 ч и 6 ч от начала времени процесса наводороживания. Спустя 30 мин и 45 ч после наводороживания были так же произведены измерения.

При установке преобразователя на объект контроля, после извлечения из ячейки, наблюдается сильная нестабильность структурного шума. Однако по завершению шестичасового процесса наводороживания нестабильность со временем пропадала полностью.

Для каждого из образцов были рассчитаны усредненные амплитуды «пролаза» рэлеевской волны. После чего строился график зависимости отношения структурного шума U_{SN} к «пролазу» рэлеевской волны U_R от времени наводороживания (рисунок 4).

В результате экспериментов по исследованию влияния режимов наводороживания образца стали 45 можно сделать следующий вывод. Размах значений структурного шума, полученных в результате измерений, говорит о наличии большого числа внешних факторов, которые необходимо учитывать в процессе контроля. К ним относится температура электролита, положение образца в ячейке, давление внутри ячейки, которые в данном случае не учитывались.

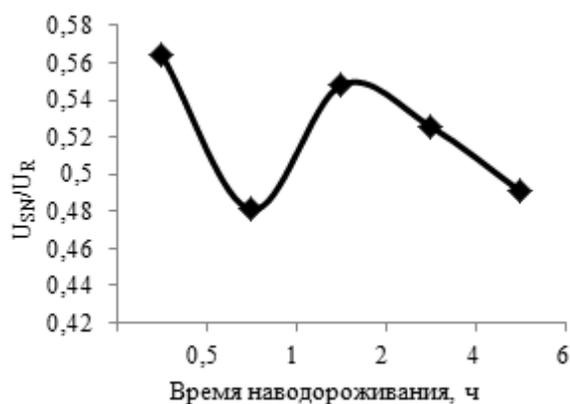


Рисунок 4 – Зависимость среднего уровня структурных шумов от времени наводороживания (соединение полученных в ходе экспериментов данных)

Растяжение образцов стали 09Г2С

С целью исследования влияния растягивающей одноосной нагрузки при растяжении стальных образцов после различной термической обработки на акустические структурные шумы выбрали конструкционную низколегиро-

ванную сталь 09Г2С, широко применяемую при производстве труб и другого металлопроката.

Были изготовлены плоские металлические образцы по ГОСТ 1497-84 (Металлы. Методы испытаний на растяжение) из трех вырезанных фрагментов ранее эксплуатируемого магистрального трубопровода Ду1420 × × 15,7. Фрагменты предварительно подвергались термической обработке для получения различных структурных состояний. Характеристики подготовленных образцов приведены в таблице.

Образцы имеют корсетный вырез в средней части для концентрации напряжений в этой области и локализации накоплений повреждений при растяжении. Испытания на растяжение металлических образцов проводились с помощью испытательной машины Instron 300DX. Образцы нагружались поступательно с шагом 10 кН до достижения нагрузки в 100 кН, а далее с шагом 5 кН. Схема измерений приведена на рисунке 5.

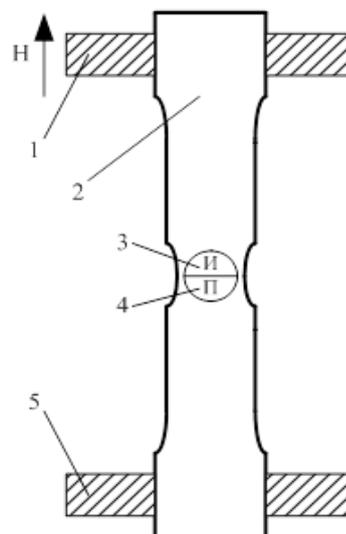


Рисунок 5 – Схема измерений: 1 – подвижное крепление испытательной машины Instron 300DX; 2 – исследуемый образец; 3 – излучающая и 4 – приемная пьезопластины РС-преобразователя; 5 – неподвижное крепление испытательной машины

На рисунке 6 представлен график зависимости отношения уровня структурного шума к «пролазу» рэлеевской волны U_{SN}/U_R от величины растягивающего напряжения для трех образцов.

Согласно полученным данным для всех образцов уровень структурного шума изменяется незначительно вплоть до достижения пре-

дела текучести. В момент достижения предела текучести (на графике – точка перегиба, которая характеризует структурные изменения – течение металла) зависимость выражается резким снижением уровня структурного шума.

Таким образом, в зависимости от предварительной термической обработки и соответственно от структуры металла точка резкого снижения уровня структурного шума характеризует начало пластической течения.

Таблица

Характеристика образцов

№ образца	Режим термообработки	Температура нагрева, °С	Выдержка в печи, час	Условия охлаждения	Балл зерна
1	исходное состояние	-	-	-	4
2	высокий отпуск	600–650	1,0	с печью	4
3	нормализация	900–930	0,5	на воздухе	7

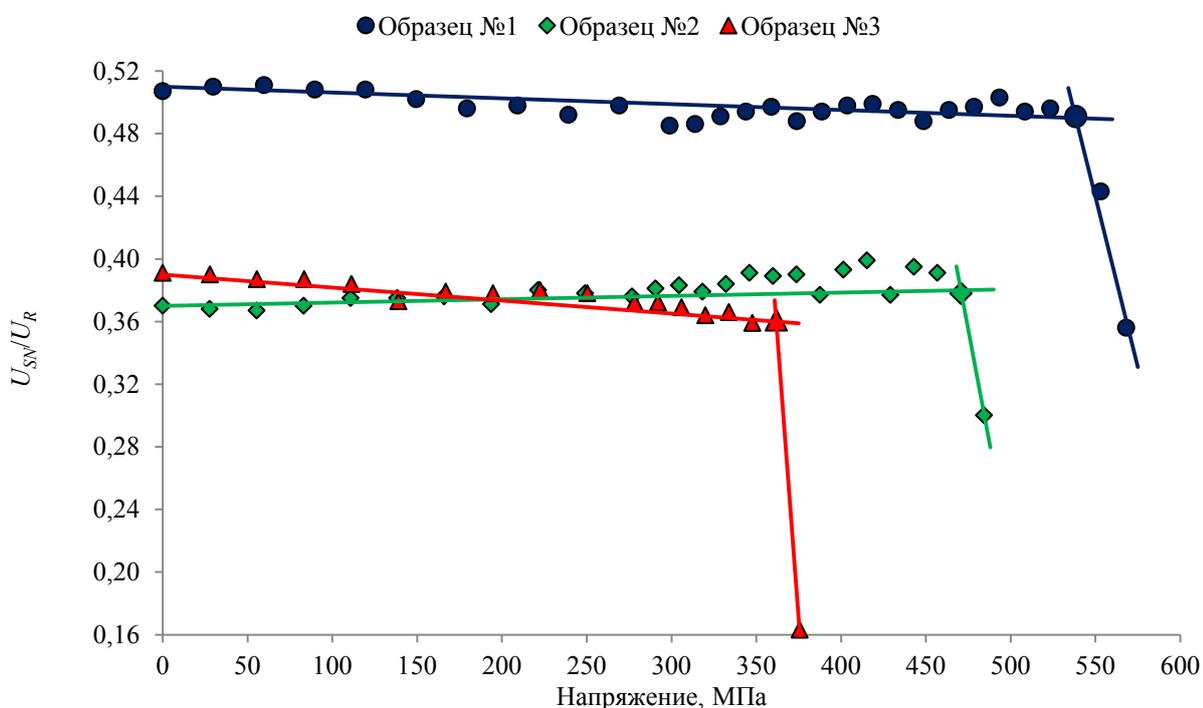


Рисунок 6 – Зависимость отношения уровня структурного шума к «пролазу» рэлеевской волны U_{SN}/U_R от величины растягивающего напряжения для трех образцов

Заключение

В развитие УЗ-структуроскопии предложен новый подход контроля структурного состояния металла по значению интегрального уровня акустических структурных шумов.

Установлено влияние структурного состояния образцов сталей 45, 09Г2С, подвергшихся различной термической обработке, на уровень структурных шумов.

Выявлен эффект влияния режимов наводороживания стали 45 на уровень акустических структурных шумов.

Выявлена закономерность резкого снижения уровня структурных шумов при достижении металлом предела текучести в зависимости от режимов термической обработки.

Разработанный метод структуроскопии с помощью структурных шумов может быть автоматизирован и применен для контроля качества

металлических изделий, а также для контроля текущего состояния эксплуатируемых объектов, в том числе нефтегазопроводного транспорта.

Список использованных источников

1. *Смирнов, А.Н.* Структурно-фазовое состояние и ресурс длительно работающего металла технических устройств опасных производственных объектов, перспективы дальнейшего развития методов оценки работоспособности / А.Н. Смирнов, В.В. Муравьев, С.В. Фольмер // Контроль. Диагностика. – 2009. – № 1. – С. 22–32.
2. *Буденков, Г.А.* Исследование напряженно-деформированного состояния ободьев цельнокатаных вагонных колес методом акустической тензометрии / Г.А. Буденков, В.В. Муравьев, О.В. Коробейникова // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2009. – Том 6. – № 3. – С. 111–117.
3. *Муравьев, В.В.* К расчету параметров системы намагничивания электромагнитно-акустического преобразователя / В.В. Муравьев, В.А. Стрижак, Е.Н. Балобанов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1. – С. 197–205.
4. *Муравьев, В.В.* Оценка остаточных напряжений в ободьях вагонных колес электромагнитно-акустическим методом / В.В. Муравьев [и др.] // Дефектоскопия. – 2011. – № 8. – С. 16–28.
5. *Муравьев, В.В.* Распределение остаточных напряжений при электроконтактном упрочнении бандажей локомотивных колес / В.В. Муравьев [и др.] // Технология машиностроения. – 2011. – № 9. – С. 42–45.
6. *Муравьев, В.В.* Исследование акустоупругих характеристик стержневой волны в термически обработанных стальных проволоках электромагнитно-акустическим методом / О.В. Муравьева, А.В. Платунов, Д.В. Злобин // Дефектоскопия. – 2012. – № 8. – С. 3–15.
7. *Муравьев, В.В.* Определение коэффициентов упругоакустической связи ферромагнитных металлов / В.В. Муравьев, Е.Н. Балобанов, Е.А. Печина // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2013. – № 2. – С. 108–112.
8. *Муравьев, В.В.* Контроль остаточных напряжений в бандажах локомотивных колес методом акустоупругости / В.В. Муравьев, Л.В. Волкова, Е.Н. Балобанов // Дефектоскопия. – 2013. – № 7. – С. 22–28.
9. *Муравьев, В.В.* Оценка величины натяга бандажей локомотивных колес методом акустоупругости / В.В. Муравьев, Л.В. Волкова // Дефектоскопия. – 2013. – № 9. – С. 40–46.
10. *Муравьев, В.В.* Устройство ультразвукового контроля цилиндрических изделий / В.В. Муравьев, О.В. Муравьева, В.А. Захаров // Патент на полезную модель № 130082 РФ. опубл. 10.07.2013, Бюл. № 19. – 6 с.
11. *Муравьев, В.В.* Контроль остаточных напряжений в ободьях вагонных колес методом акустоупругости / В.В. Муравьев, В.А. Стрижак, А.В. Пряхин, Е.Н. Балобанов // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2014. – № 3. – С. 42–45.
12. *Муравьев, В.В.* Контроль натяга бандажей колес методом акустоупругости / В.В. Муравьев, В.А. Стрижак, Л.В. Волкова, А.В. Пряхин // Локомотив. – 2014. – № 5. – С. 39–41.
13. *Муравьев, В.В.* Влияние структурного состояния металла труб магистральных газопроводов на параметры ультразвуковых волн / В.В. Муравьев, А.В. Байтерьяков, А.Ю. Котоломов // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2014. – № 3. – С. 125–128.
14. *Муравьев, В.В.* Методика определения акустических структурных шумов металла / В.В. Муравьев, О.В. Муравьева, А.В. Байтерьяков, А.И. Дедов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1. – С. 143–148.
15. *Баев, А.Р.* Влияние акустической нагрузки на распространение подповерхностных продольных волн. / А.Р. Баев [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. – № 2. – 2014. – С. 20–32.
16. *Викторов, И.А.* Звуковые поверхностные волны в твердых телах / И.А. Виторов. – М. : Наука, 1981. – 288 с.

**MONITORING OF THE METAL STRUCTURAL STATE
BY ACOUSTICAL STRUCTURAL NOISE**

Muraviev V.V., Muravieva O.V., Dedov A.I., Baiteryakov A.V.

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia
e-mail: superdedov@mail.ru

Abstract. To determine the structural state of the metal as an informative parameter the structural acoustic noise is proposed. The paper represents the experimental results of the use at acoustical structural noise for the determination at the structural state of carbon pipe steels exposed by heat treatment, corrosion and tensile loads. The effect of grain size, corrosion and tensile loads on the level of structural noise is discussed.

Keywords: acoustic structurescopy, grain size, yield stress, carbon steel.

References

1. Smirnov A.N., Muraviev V.V., Volfmer S.V. [Structural-phase state and resource of long- life working metal of technical devices at hazardous production facilities, the prospects for further development of methods to assess performance]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2009. no. 1, pp. 22–32 (in Russian).
2. Budenkov G.A., Muraviev V.V., Korobeynikova O.V. [Investigation of stress-strain state of the rolled wheel rims by acoustic strain measurement]. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*, 2009, vol. 6, no. 3, pp. 111–117 (in Russian).
3. Muraviev V.V., Strizhak V.A., Balobanov E.N. [To the calculation of the magnetization system parameters of electromagnetic-acoustic transducer]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2011, no. 1, pp. 197–205 (in Russian).
4. Muraviev V.V., Muraveva O.V., Strizhak V.A., Priakhin A.V., Balobanov E.N., Volkova L.V. [Evaluation of residual stresses in the rim of the wheels by the electromagnetic-acoustic method]. *Defektoskopiya*, 2011, no. 8, pp. 16–28 (in Russian).
5. Muraviev V.V., Petrov S.Y., Platonov A.V. Balobanov E.N., Volkova L.V., Ryabov A.A., Sokolov O.V., Pechenova T.P., Kostyuk V.V. [The distribution of residual stresses in electrocontact hardening bandages of locomotive wheels]. *Tekhnologiya mashinostroyeniya*, 2011, no. 9, pp. 42–45 (in Russian).
6. Muraviev V.V., Muraveva O.V., Platonov A.V., Zlobin D.V. [Investigation of the acoustoelasticity characteristics of stem waves in heat-treated steel wire by electromagnetic acoustic method]. *Defektoskopiya*, 2012, no. 8, pp. 3–15 (in Russian).
7. Muraviev V.V., Balobanov E.N., Pechina E.A. [Definition of elastic acoustic communication coefficient of the ferromagnetic metals]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2013, no. 2, pp. 108–112 (in Russian).
8. Muraviev V.V., Volkova L.V., Balobanov E.N. [Control of residual stresses in bandages locomotive wheels by acoustoelasticity method]. *Defektoskopiya*, 2013, no. 7, pp. 22–28 (in Russian).
9. Muraviev V.V., Volkova L.V. [An estimate of the interference bands value of the locomotive wheels by acoustoelasticity method]. *Defektoskopiya*, 2013, no. 9, pp. 40–46 (in Russian).
10. Muraviev V.V., Muraveva O.V., Zakharov V.A. *Ustroystvo ultrazvukovogo controlya izdelij* [Ultrasonic testing device of cylindrical products]. Patent RF, no. 130082, 2013.
11. Muraviev V.V., Strizhak V.A., Priakhin A.V., Balobanov E.N. [Control of residual stresses in the rim of the wheels by acoustoelasticity method]. *Wagony i wagonnoye khozajstvo*, 2014, no. 3, pp. 42–45.

12. Muraviev V.V., Strizhak V.A., Volkova, L.V., Priakhin A.V. [Control of bands interference of the wheels by acoustoelasticity method]. *Lokomotiv*, 2014, no. 5, pp. 39–41 (in Russian).
13. Muraviev V.V., Bayteryakov A.V., Kotolomov A.Y. [The influence of the structural state of the metal gas pipes on the parameters of the ultrasonic waves]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, no. 3, pp. 125–128 (in Russian).
14. Muraviev V.V., Muraveva O.V., Bayteryakov A.V., Dedov A.I. [The methodology of determining acoustical structural noise of steel]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2013, no. 1, pp. 143–148 (in Russian).
15. Baev A.R., Sergeeva O.S., Asadchaya M.V., Konovalov G.E., Filippov K.A. [Influence of acoustic loading on the distribution of subsurface longitudinal waves]. *Nerazruschayuschij kontrol' i diagnostika*, 2014, no. 2, pp. 20–32 (in Russian).
16. Victorov I.A. *Zvukovye poverchnostnye volny v tviordikh telakh*. [Sound surface waves in solids]. Moscow, Science Publ., 1981. 288 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 30.09.2014.