ОСОБЕННОСТЬ КОНТРОЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ МЕТОДАМИ ОБОРУДОВАНИЯ С ТРАНСПОРТИРУЕМОЙ ИЛИ ХРАНИМОЙ СРЕДОЙ

PECULIARITY OF ULTRASONIC METHODS CONTROL OF EQUIPMENT FILLED WITH TRANSPORTING OR STORING FLUIDS

П. С. Кунина
P. S. Kupina

Кубанский государственный
технологический университет,
г. Краснодар, Российская
Федерация

Kuban State
Technological University,
Krasnodar, Russian Federation

В. В. Дубов
V. V. Dubov

Кубанский государственный
технологический университет,
г. Краснодар, Российская
Федерация

Kuban State
Technological University,
Krasnodar, Russian Federation

А. Е. Нижник
A. E. Nizhnik

Кубанский государственный
технологический университет,
г. Краснодар, Российская
Федерация

Kuban State
Technological University,
Krasnodar, Russian Federation

М. С. Степанов
M. S. Stepanov

Кубанский государственный
технологический университет,
г. Краснодар, Российская
Федерация

Kuban State
Technological University,
Krasnodar, Russian Federation

А. В. Поляков
A. V. Polyakov

Кубанский государственный
технологический университет,
г. Краснодар, Российская
Федерация

Kuban State
Technological University,
Krasnodar, Russian Federation

А. А. Голубева
A. A. Golubeva

Кубанский государственный
технологический университет,
г. Краснодар, Российская
Федерация

Kuban State
Technological University,
Krasnodar, Russian Federation

В работе рассмотрен вопрос различия результатов ультразвукового контроля вновь установленного оборудования и оборудования, находящегося в процессе эксплуатации. В большинстве дефектов, расположенных непосредственно в полости металла, находится вакуум, акустические свойства которого значительно отличаются от акустических свойств целостного металла. Поэтому дефекты в полости шва или металла являются хорошими отражателями, которые легко выявляются и дают возможность по амплитуде оценить их эквивалентную площадь. Все существующие методики проведения ультразвукового контроля предусматривают настройку прибора с учетом того, что в дефекте отсутствует технологическая среда. Это правильно только для нового оборудования, не находившегося еще в эксплуатации. На практике нередко приходится контролировать оборудование, которое уже находится в процессе эксплуатации. Оно часто является недостаточно подготовленным к обследованию, в том числе и из-за того, что в нем находится транспортируемая или хранимая среда. Если в шве или в основном металле имеется дефект с открытием во внутреннюю полость, то он может под действием капиллярных сил заполниться технологической средой. Таким образом, среда при стандартной настройке дефектоскопа будет маскировать дефект, влияя на величину амплитуды отраженного сигнала. Происходит недоотбраковка дефектов, особенно плоскостных, которые наиболее опасны с точки зрения эксплуатации оборудования. В работе производится моделирование изучаемого вопроса диагностики оборудования с использованием двух разных моделей дефектоскопов и заполнением полости объемного дефекта различными веществами. Авторами получены результаты влияния химических и физических свойств сред на показания выявляемости дефекта.

Ключевые слова

ультразвуковой
контроль,
преобразователь,
стандартный
образец,
сварной шов,
изменение
амплитуды,
дефект,
дефектоскоп

The paper considers the issue of the difference in the results of ultrasonic testing of newly installed equipment and equipment in the process of operation. In most defects located directly in the cavity of the metal, there is a vacuum, the acoustic properties of which are significantly different from the acoustic properties of the base metal. Therefore, defects in the weld cavity or in metal are well reflected, and are easy to be identified and make it possible to estimate their equivalent area by amplitude. All existing ultrasonic testing methods provide device setup taking into account the absence of technological fluid in defect. This is true only for new equipment that is not in practice yet. In practice, it is often necessary to control equipment that is under operation already. It is often not adequately prepared for the survey, because of presence of transporting or storing fluids in it. If in the weld or in the base metal there is a defect with opening into the inner cavity, then it can be filled with the technological fluid under the action of capillary forces. Thus, under standard setting of the flaw detector the fluid will mask the defect, influencing the magnitude of the amplitude of the reflected signal. So not all defects are fully rejected, especially flat ones, which are the most dangerous from the point of view of equipment operation. The simulation of the studied equipment diagnostics issue using two different models of flaw detectors and the filling of the cavity of a bulk defect by various substances is performed in the work. The authors obtained the results of the influence of chemical and physical properties of fluids on indications of a defect detection.

Key words

ultrasonic inspection, converter, standard sample, weld seam, amplitude change, defect, flaw detector

Падающая на границу двух сред плоская волна механических колебаний частично проходит, частично отражается или трансформируется. В твердых телах (рисунок 1), образуются две (продольная и поперечная) отраженные и две преломленные волны с направлениями согласно закону синусов (закон Снеллиуса) [1]:

$$\frac{\sin \beta}{c} = \frac{\sin \gamma_l}{c_l} = \frac{\sin \gamma_t}{c_t} = \frac{\sin \alpha_l}{c_{l'}} = \frac{\sin \alpha_t}{c_{t'}}$$

где β , γ и α — углы падения, отражения и преломления;

c — скорости волн;

l и t — индексы, отмечают продольные и поперечные волны, для нижней среды индексы имеют штрих ($'$), скорость падающей волны — без индекса.

Рисунок 1. Отражение, преломление и трансформация при падении продольной волны на границу раздела двух твердых сред

Амплитуды каждой отраженной или прошедшей волны определяются коэффициен-

тами отражения или прозрачности: R или D . Эти коэффициенты могут быть по амплитудам смещения, акустического давления или других переменных величин. Допускается использовать коэффициенты по потокам энергии, перпендикулярным к границе раздела $\tilde{R}$ и $\tilde{D}$. Для этих коэффициентов справедливы общие закономерности:

1) сумма всех коэффициентов отражения и прозрачности по энергии равна 1 (закон сохранения энергии):

$$\tilde{R}_{ll} + \tilde{R}_{lt} + \tilde{D}_{ll'} + \tilde{D}_{lt'} = 1;$$

2) коэффициенты отражения по амплитуде однотипной волны с двух сторон от границы равны по модулю и обратны по знаку:

$$R_{ll} = -R_{l'l'}; R_{tt} = -R_{t't'};$$

3) коэффициент прозрачности по энергии будет равен произведению коэффициентов по амплитуде в двух направлениях:

$$\tilde{D}_{lt'} = D_{lt'} D_{t'l} = \tilde{D}_{t'l}.$$

Аналогично коэффициентам отражения разных по типу волн:

$$\tilde{R}_{lt} = R_{lt} R_{tl} = \tilde{R}_{tl}.$$

Эта закономерность важна для неразрушающего контроля, так как границу твердого тела волна проходит дважды [2].

На рисунках 2, в и 3 показаны расчётные коэффициенты прозрачности по энергии для границ некоторых сред. Также на рисунке 2, а, б для границы оргстекло — сталь представлены коэффициенты прозрачности по амплитуде смещения при падении продольной волны из оргстекла в сталь под углом β (а) и при падении продольной или поперечной волн из стали в оргстекло под углами α_l и α_t (б).

Пунктирными линиями на рисунке 2, в изображены коэффициенты прозрачности по энергии при толщине слоя минерального масла δ (указано в долях длины волны в масле) [3].

При первом и втором критических углах получаются следующие равенства

$$\beta' = \arcsin(c_{it}/c), \beta'' = \arcsin(c_{it}/c).$$

Преломленные волны превращаются в неоднородные, т. е. соответствующая волна распространяется вдоль границы, фронт ее перпендикулярен границе, амплитуда уменьшается с глубиной проникновения.

В случае нормального падения волны на границу трансформация отсутствует и формулы для коэффициентов будут иметь вид:

$$R_{ll} = \frac{z' - z}{z' + z}; \tilde{R}_{ll} = R_{ll}^2;$$

$$D_{ll} = \frac{2z'}{z' + z}; \tilde{D}_{ll} = \frac{4z'z}{(z' + z)^2},$$

где z и z' — значения сопротивления верхней и нижней сред для продольных волн.

В случае свободной поверхности твердого тела отражение волны, распространяющейся в твердом теле от его границ, это частный случай задачи, рассмотренной ранее, с плотно-

стью $\rho' = 0$. В большинстве случаев отражение происходит однократно, в связи с этим важны коэффициенты отражения волны по амплитуде [4].

На рисунках 4 и 5 представлены коэффициенты отражения волны по амплитуде смещения для $c_t/c_l = 0,492$ (алюминий) и 0,546 (железо, сталь).

Для поперечных волн можно ввести третий критический угол падения, при котором продольная волна трансформируется в неоднородную:

$$\beta''' = \arcsin(c_t/c_l).$$

В стали третий критический уровень $\beta''' = 33^\circ$.

Угол, равный минимальному коэффициенту отражения без трансформации, будет называться *квазиобменным*: в этом случае большая часть энергии механических колебаний трансформируется в волну другого типа. Для стали это $\beta_i = 70^\circ$ и $\beta_i = 31^\circ$. Термин «обменный угол» (без «квази») применяется, если трансформация волн происходит полностью.

На рисунке 6 показаны случаи двойного отражения волны от прямого двугранного угла и коэффициент такого действия:

$$R_2 = R(\beta)R(90^\circ - \beta).$$

В итоге двойного отражения нетрансформированный эхо-сигнал возвращается к излучающему преобразователю (*угловой эффект*).

Двойное отражение часто встречается для поперечных волн. При углах $\beta_i = \beta''' \dots (90^\circ - \beta''')$ (для стали $33^\circ \dots 57^\circ$) такая волна будет отражаться без трансформации, так как для обеих граней углы падения больше третьего, критического.

Рисунок 2. Коэффициенты прозрачности для границы раздела фаз оргстекло — слой масла — сталь: по амплитуде в прямом (а), обратном (б) направлениях и по энергии (в) (штрихпунктирная линия — эксперимент)

Рисунок 3. Коэффициент прозрачности по энергии для границы раздела фаз вода — сталь (пунктирная линия — эксперимент)

Рисунок 4. Углы (а) и коэффициенты (б) отражения волны по амплитуде от границы раздела фаз сталь — воздух (—) и алюминий — воздух (---) для продольных волн

Для продольных волн такое отражение наблюдается крайне редко. Распространяется вдоль свободной поверхности, она становится головной, порождает поперечную волну и быстро затухает. В этом случае при $\beta = 0^\circ$ и 90° $R = 1$, как изображено на рисунке 6, в, в случае, когда грань угла, вблизи которой распространяется продольная волна, должна иметь криволинейную форму (рисунок 6, б) [5].

Рассмотрим случай, когда граница сред разделена слоем. Для расчета $R = R_c$ в формулу для нормального падения волны на границу раздела сред с характеристиками импедансами z и z' вместо z' вводят $Z_{вх}$ — входной импеданс границы со слоем, равный

$$Z_{вх} = z_c = \frac{z' - jz_c \tan k_i h_i}{z_c - jZ' \tan k_c h_c},$$

где $z_c = \rho_c c_c$, $k_c = 2\pi/\lambda_c$, λ_c и h_c — сопротивление волны, волновое число, длина волны в слое и толщина слоя; z' — входной импеданс среды за пределами слоя. В случае если среда за слоем протяженная, то входной импеданс равен ее волновому сопротивлению: $Z' = z'$. Если существует второй слой, можно рассчитать по аналогичной формуле. Коэффициент прозрачности волны по энергии:

Рисунок 5. Углы (а) и коэффициенты (б) отражения волны по амплитуде от границы раздела фаз сталь — воздух (—) и алюминий — воздух (---) для поперечных волн

Рисунок 6. Отражение волны от двугранного угла: схема для угла с плоскими гранями (а); с одной плоской и одной цилиндрической гранью (б); коэффициент двойного отражения волны в стали (в)

$$\tilde{D}_c = 1 - R_c^2 = \frac{4Z_{\text{вх}}z}{(z_{\text{вх}} + z)^2}.$$

Коэффициенты R и D становятся комплексными. Модули коэффициентов и значения по энергии имеют максимумы и минимумы при строго определенных волновых толщинах слоя $k_c h_c = 2\pi h_c / \lambda_c$.

Различают два расчетных случая :

- 1 симметричный случай, когда z_c больше или меньше одновременно z и z' ;
- 2 несимметричный — когда z_c лежит между z и z' .

В первом случае максимумы $\tilde{D}_c$, равные $\tilde{D}$ в отсутствие слоя, достигаются при полуволновом слое (т. е. его толщина равна целому числу полуволн), а минимумы — если слой четвертьволновой (его толщина равна нечетному числу четвертей волн) [6].

В несимметричном случае при последнем условии достигаются максимумы, при которых $\tilde{D}_c$ больше $\tilde{D}$ в отсутствие слоя — явление просветления границы. Коэффициент прозрачности равен 1 (полное просветление), когда

$$z_c = \sqrt{zz'}; h_c = \lambda_c / 4.$$

Если обе среды одинаковы, а слой тонкий ($h_c \ll \lambda_c$), то

$$R_c = \left[1 + \left(\frac{z_c \lambda_c}{\pi z h_c} \right)^2 \right]^{-1}.$$

В таблице 1 представлены рассчитанные по этим формулам значения $\tilde{R}_c$ для слоев в стали при частоте 2,5 МГц.

Приведенные в таблице 1 данные показывают практически полное отражение волны от тончайшего воздушного зазора (0,00001 мм), имитирующего дефект. Заполнение зазора или дефекта жидкостью резко улучшает прохождение волны.

Из вышеописанной теории можно предположить, что результаты ультразвукового контроля вновь установленного оборудования несколько отличны от результатов контроля оборудования, находящегося в эксплуатации. В настоящий момент эти данные не отражены в методиках контроля. Это приводит к недобраковке дефектов вследствие недостоверной настройки чувствительности элементов УЗД [7].

Таблица 1. Отражение волны ультразвука от слоев и стали

Толщина слоя, мм	Коэффициенты отражения по энергии, % для слоя	
	воздуха	воды
$1 \cdot 10^{-6}$	86,67	$2,67 \cdot 10^{-6}$
$1 \cdot 10^{-5}$	99,85	$2,67 \cdot 10^{-4}$
$1 \cdot 10^{-4}$	99,998	$2,67 \cdot 10^{-2}$
$1 \cdot 10^{-3}$	99,998	2,6
∞	99,998	88

В большинстве дефектов, расположенных непосредственно в полости металла, находится вакуум, акустические свойства которого значительно отличаются от акустических свойств целостного металла. Поэтому дефекты в полости шва или металла являются хорошими отражателями, которые легко выявляются и дают возможность по амплитуде оценить их эквивалентную площадь.

Все существующие методики контроля, в том числе ГОСТ 14782-86 «Ультразвуковые методы контроля», предполагают настройки браковочного уровня или чувствительности дефектоскопа с учетом того, что в дефекте отсутствует какая-либо среда. Это правильно только для нового оборудования, не находившегося в эксплуатации.

На практике часто приходится контролировать оборудование, находящееся длительное время в эксплуатации, во внутренней по-

лости которого может храниться или транспортироваться различная среда. Особенно это актуально для транспорта и хранения нефти, т. к. нефть — сложная многокомпонентная система.

При образовании в шве или основном металле дефект может иметь раскрытие во внутреннюю полость оборудования. Под действием капиллярных сил дефект может полностью заполниться технологической средой, акустические свойства которой будут резко отличаться от вакуума или воздуха, в то же время они не будут приближены к свойствам металла. Таким образом, среда при стандартной настройке дефектоскопа будет маскировать дефект, влияя на величину амплитуды отраженного сигнала. Таким образом, происходит недобраковка дефектов, особенно плоскостных, которые наиболее опасны с точки зрения безопасности эксплуатации оборудо-

вания. Это связано с тем, что напряжение в плоскостном дефекте сосредоточено на малой площади и достигает больших значений. При возникновении знакопеременных нагрузок плоскостной дефект (трещина) стремится к активному росту [8].

Среди имеющихся в лаборатории стандартных образцов нами было принято решение использовать в качестве модели стандартный образец № 2.

Это связано с тем, что стандартный образец № 1 выполнен из органического стекла и несмотря на то, что он имеет отверстия, позволяющие моделировать объемные дефекты, материал данного образца по своим акустическим свойствам сильно отличается от акустических свойств конструкционных сталей.

Стандартный образец № 3, предназначенный для определения времени задержки в призме и точки ввода, также неудобен в использовании в качестве модели, это связано с тем, что отсутствует отверстие и без механических доработок этот образец использовать достаточно сложно.

Самым оптимальным вариантом для моделирования изучения вопроса диагностики оборудования со средой является стандартный

образец № 2 (рисунок 7). Так как он выполнен из стали 20 ГОСТ 1050-88, имеет подходящие геометрические формы (имитирует стенку технического оборудования или трубопровода). В теле образца имеется 3 цилиндрических отверстия диаметром 2 и 6 мм, которые мы можем использовать в качестве модели объемного дефекта в сечении металлической конструкции.

В качестве УЗД нами были использованы следующие приборы:

1. «Пеленг» (УДЗ-103);
2. «Уралец» (УД9812).

В качестве преобразователя (ПЭП) или пьезоэлектрического образателя нами был выбран совмещенный наклонный преобразователь с частотой 2,5 МГц и углом ввода 50°. ПЭП с данными характеристиками позволяет нам легко и уверенно выявлять 6 мм отверстие стандартного образца СО₂ (на 2-х дефектоскопах). При поиске искусственного дефекта мы получили очень четкую диаграмму с «огibaющей» характеристикой (изменение амплитуды при постоянной частоте). Это подтверждает, что при контроле отсутствует ошибка оператора, т. е. донный отраженный сигнал, отраженный сигнал от угла образца и т. д.

Рисунок 7. Стандартный образец № 2

В качестве сред, которыми мы заполняли полости объемного дефекта в образце, нами были выбраны следующие вещества:

- густое трансмиссионное масло;
- консистентная смазка «Литол»;
- эпоксидная смола;
- консистентная смазка (солидол-графитовая смазка).

Перед выполнением работ проводилась настройка системы дефектоскоп — преобразователь в соответствии с ГОСТ 14782-86 «Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые».

После проведения практических исследований на стандартном образце № 2 с использованием вышеперечисленных веществ мы получили разницу в выявляемости дефектов

объемного характера минимум 4 дБ по отношению к воздуху. Таким образом, наше предположение о том, что различные среды в полости дефекта снижают его выявляемость при ультразвуковом исследовании верно (рисунок 8).

В результате исследования нами было установлено, что химические свойства практически не оказывают влияние на выявляемость дефекта, а в значительной степени влияют физические свойства среды.

На основе полученных данных по влиянию среды на выявляемость дефектов в сварном соединении или основном металле нами планируется построить калибровочный график. Благодаря графику процесс настройки чувствительности дефектоскопа будет учитывать

Рисунок 8. Показания на приборе при заполненной полости веществом: воздух (а); трансмиссионное масло 80W-90 (б); эпоксидная смола (в); консистентная смазка «Литол», графитовая смазка (г)

Таблица 2. Практические результаты

Используемые вещества	Диаметр дефекта, мм	Амплитуда браковочного уровня, дБ
Воздух	6	29
Густое трансмиссионное масло 80W-90	6	30
Консистентная смазка «Литол»	6	33
Солидол-графитовая смазка	6	33
Эпоксидная смола	6	32

процессы, связанные с особенностью отражения ультразвуковой волны от дефектов, заполненных различными средами, что будет снижать погрешность дефектоскопа при контроле путем устранения явления недобраковки дефекта.

Построенный график будет представлять собой зависимость амплитуды отраженной ультразвуковой волны и вязкость или плотность транспортируемой среды. Точные данные по построению калибровочного графика сейчас находятся в разработке нашего коллектива и послужат темой следующей НИР.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 14782-86. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. М.: Стандартинформ, 2005. 26 с.
2. РД 19.100.00-KTN-545-06. Ультразвуковой контроль стенки и сварных соединений при эксплуатации и ремонте вертикальных стальных резервуаров / ОАО «АК Транснефть». М., 2007. 27 с.
3. Ультразвуковой контроль: учеб. пособие / Н.П. Алешин, В.Т. Бобров, Ю.В. Ланге, В.Г. Щербинский. М.: Издательский дом «Спектр», 2011. 224 с.
4. Кунина П.С., Величко Е.И., Приходько М.Г., Нижник А.Е. Разработка современных методик диагностики сварных соединений резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов методом ультразвукового контроля // Территория Нефтегаз. 2017. № 3. С. 22–27.
5. Сеньюткин П.А. Расчет скорости контроля при автоматизированной ультразвуковой дефектоскопии труб // Контроль. Диагностика. 2003. № 10. С. 8–14.
6. Огарков Н.В., Сеньюткин П.А. Оценка достоверности контроля при автоматизированной ультразвуковой дефектоскопии труб // Контроль. Диагностика. 2004. № 11. С. 45–47.
7. Сеньюткин П.А. Использование ПЭП с различным типом фокусировки при ультразвуковом контроле труб // Контроль. Диагностика. 2007. № 9. С. 69–71.
8. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981. 240 с.

REFERENCES

1. GOST 14782-86. Kontrol' nerazrushayushchii. Soedineniya svarnyye. Metody ul'trazvukovye [State Standard 14782-86. Non-Destructive Testing. Welded Joints. Ultrasonic Methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2005. 26 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ABOUT THE AUTHORS

Кунина П. С., доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Оборудование нефтяных и газовых промыслов», ФГБОУ ВО «КубГТУ», г. Краснодар, Российская Федерация

P. S. Kunina, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Equipment for Oil and Gas Fields Department, FSBEI HE «KubSTU», Krasnodar, Russian Federation

Выводы

1. Для контроля оборудования, находящегося в эксплуатации необходимо учитывать, что полость дефекта может быть заполнена транспортируемой средой, и, как следствие, происходит снижение отражающей способности.
2. Это явление необходимо учитывать при настройке чувствительности дефектоскопа, чтобы избежать недобраковки.
3. Нами экспериментально получено подтверждение снижения амплитуды эхо-импульса от искусственного отражателя, заполненного различными средами.

2. RD 19.100.00-KTN-545-06. Ul'trazvukovoi kontrol' stenki i svarnykh soedinenii pri ekspluatatsii i remonte vertikal'nykh stal'nykh rezervuarov [RD 19.100.00-KTN-545-06. Ultrasonic Inspection of the Wall and Welded Joints During Operation and Repair of Vertical Steel Tanks]. ОАО «АК Транснефть». Moscow, 2007. 27 p. [in Russian].

3. Aleshin N.P., Bobrov V., Lange Yu.V., Shcherbinsky V.G. Ul'trazvukovoi kontrol': ucheb. posobie [Ultrasonic Testing: Textbook]. Moscow, Spectr Publ., 2011. 224 p. [in Russian].

4. Kunina P.S., Velichko E.I., Prihodko M.G., Nizhnik A.E. Razrabotka sovremennykh metodik diagnostiki svarnykh soedinenii rezervuarov dlya khraneniya nefti i nefteproduktov metodom ul'trazvukovogo kontrolya [Development of Modern Methods for Diagnosing Welded Joints of Oil and Oil Products Storage Tanks by Ultrasonic Testing]. *Territoriya Neftegaz — Territory of Neftegaz*, 2017, No. 3, pp. 22–27. [in Russian].

5. Senyutkin P.A. Raschet skorosti kontrolya pri avtomatizirovannoi ul'trazvukovoi defektoskopii trub [Calculation of the Control Speed for Automated Ultrasonic Flaw Detection of Pipes]. *Kontrol'. Diagnostika — Control. Diagnostics*, 2003, No. 10, pp. 8–14. [in Russian].

6. Ogarkov N.V., Senyutkin P.A. Otsenka dostovernosti kontrolya pri avtomatizirovannoi ul'trazvukovoi defektoskopii trub [Evaluation of the Reliability of Control in Automated Ultrasonic Flaw Detection of Pipes]. *Kontrol'. Diagnostika — Control. Diagnostics*, 2004, No. 11, pp. 45–47. [in Russian].

7. Senyutkin P.A. Ispol'zovanie PEP s razlichnym tipom fokusirovki pri ul'trazvukovom kontrole trub [Use of a PET with a Different Type of Focusing with Ultrasonic Testing of Pipes]. *Kontrol'. Diagnostika — Control. Diagnostics*, 2007, No. 9, pp. 69–71. [in Russian].

8. Ermolov I.N. *Teoriya i praktika ul'trazvukovogo kontrolya* [Theory and Practice of Ultrasonic Control]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 240 p. [in Russian].

Нижник А. Е., доктор технических наук, профессор кафедры «Оборудование нефтяных и газовых промыслов», ФГБОУ ВО «КубГТУ», г. Краснодар, Российская Федерация

A. E. Nizhnik, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Equipment for Oil and Gas Fields Department, FSBEI HE «KubSTU», Krasnodar, Russian Federation

Поляков А. В., кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование нефтяных и газовых промыслов», ФГБОУ ВО «КубГТУ», г. Краснодар, Российская Федерация

A. V. Polyakov, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Equipment for Oil and Gas Fields Department, FSBEI HE «KubSTU», Krasnodar, Russian Federation

Дубов В. В., старший преподаватель кафедры «Оборудование нефтяных и газовых промыслов», ФГБОУ ВО «КубГТУ», г. Краснодар, Российская Федерация

V. V. Dubov, Senior Lecturer of Equipment for Oil and Gas Fields Department, FSBEI HE «KubSTU», Krasnodar, Russian Federation

Степанов М. С., ассистент кафедры «Оборудование нефтяных и газовых промыслов», ФГБОУ ВО «КубГТУ», г. Краснодар, Российская Федерация

M. S. Stepanov, Assistant of Equipment for Oil and Gas Fields Department, FSBEI HE «KubSTU», Krasnodar, Russian Federation

e-mail: m.s.stepanov@mail.ru

Голубева А. А., студентка кафедры «Оборудование нефтяных и газовых промыслов», ФГБОУ ВО «КубГТУ», г. Краснодар, Российская Федерация

A. A. Golubeva, Student of Equipment for Oil and Gas Fields Department, FSBEI HE «KubSTU», Krasnodar, Russian Federation