

## ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ В ТРУБОПРОВОДЕ

Для совершенствования активных виброакустических систем контроля состояния трубопроводов актуальной является задача их адаптации к изменяющимся условиям окружающей среды. В работе исследовано влияние влажности грунта, частоты упругих колебаний и глубины погружения трубопровода на затухание упругих колебаний посредством проведения факторного эксперимента и получения регрессионной модели, позволившей оценить взаимное влияние факторов на упругие колебания в трубопроводе. Выделены частоты амплитудного спектра сигнала с максимальным поглощением грунтом, использование которых в системах контроля позволит обеспечить обнаружение изменения свойств контактирующих сред.

**Ключевые слова:** трубопровод, затухание упругих колебаний, факторный эксперимент, регрессионная модель, окружающая среда.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №17-08-01560).*

Прилегающий грунт и его свойства оказывают влияние на распространение упругих колебаний в трубопроводе. Контроль состояния трубопровода периодическим зондированием акустическими импульсами возможен при неизменности состояния среды пролегания трубы [1]. В противном случае необходимо располагать данными о совместном влиянии на распространяемый сигнал различных факторов для компенсации их воздействия с целью минимизации ошибки обнаружения.

На заглубленном действующем трубопроводе с водой был проведен эксперимент, его характеризует (рис. 1). Наземный трубопровод проходит через земляную насыпь протяженностью 5 м. В трех точках трубы устанавливались приемники, один из которых фиксировался на удалении 15 см от края насыпи в созданном шурфе. Генератор акустических импульсов [2] устанавливался на расстоянии 100 м от места регистрации сигналов.

Форма сигналов приведена на рис. 2. Спектр в точках 1 и 2 показан на рис. 3а. Значительных отличий в частотной характеристике сигналов нет. В точке 2 имеется различие амплитуд в точке 1 в полосе частот 50–1500 Гц с максимумом разницы на 15 дБ (рис. 3б).

Затухание сигнала зависит от условий среды на момент проведения опытов: влажность грунта и глубина погружения трубы в грунт. При изменении характеристик среды возможно изменение наблюдаемой амплитудно-частотной зависимости [3, 4]. Так как аналитически определить зависимость коэффициента затухания с учетом одновременного

влияния данных факторов не представляется возможным, предлагается создать эмпирическую модель на основе факторного эксперимента.

Для постановки активного эксперимента необходимо располагать физической моделью исследуемого объекта.

Основываясь на результатах, при переходе от реального объекта к его уменьшенной копии необходимо выполнить условие по обеспечению работы в дальней зоне, т.е. в условиях исключения образования стоячих волн. Кроме того, размеры области грунта с окружающей его средой должны в несколько раз превышать диаметр трубы, чтобы отражение волны от внешних границ массива не вносило погрешности в результаты измерения интенсивности распространяющейся по трубе упругой волны.

Планирование эксперимента позволяет варьировать ряд факторов и получать одновременно количественные оценки всех проявляющихся эффектов. При этом, в отличие от классического регрессионного анализа, необходимо избегать корреляцию между коэффициентами уравнения регрессии. При статистическом подходе математическая модель объекта или процесса представляется в общем виде уравнением регрессии [5]:

$$y(x_1, \dots, x_k) = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j,$$

где  $b_0$  — свободный член;  $b_i$  — линейные эффекты;  $b_{ij}$  — эффекты парного взаимодействия;  $x$  — значение параметра.

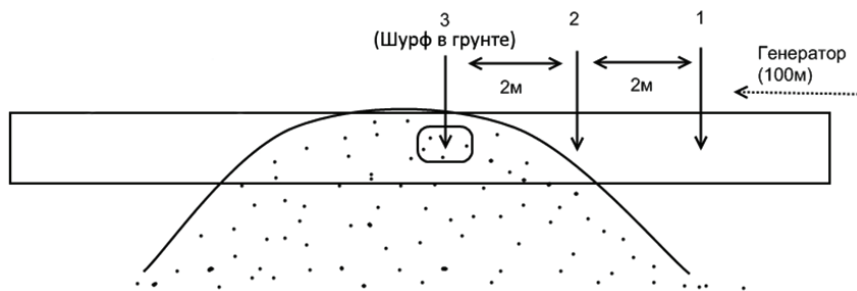


Рис. 1. Эксперимент по выявлению характера влияния грунта на параметры распространяющегося сигнала

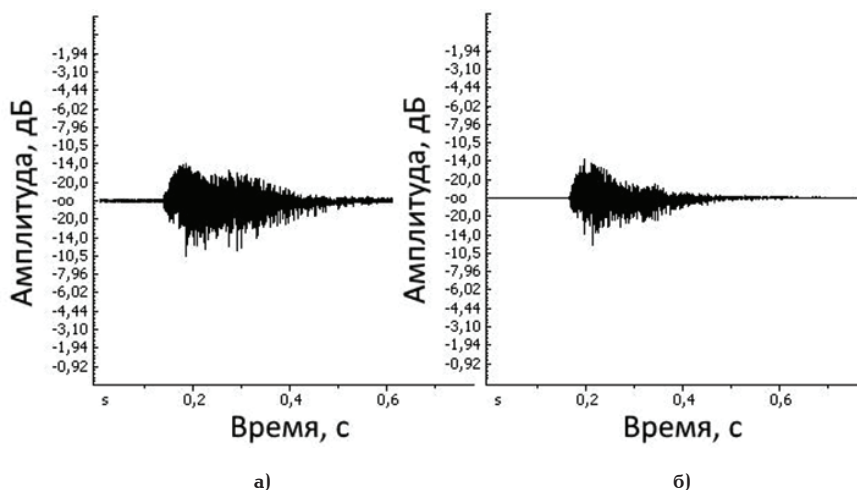


Рис. 2. Форма импульсов в точках 2 (а) и 3 (б)

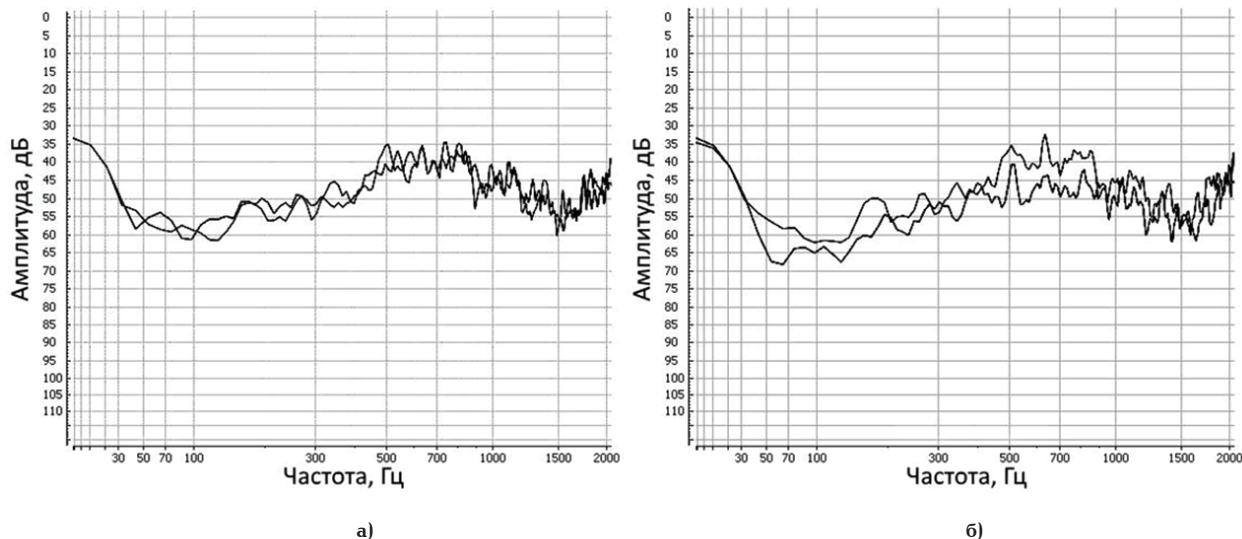


Рис. 3. Спектр сигналов в точках 1, 2 (а) и 2, 3 (б)

В модель включены три фактора: глубина погружения трубы в грунт (фактор  $z_1$ ), влажность (фактор  $z_2$ ), частота (фактор  $z_3$ ). Рассмотрим затухание сигнала в частотной области с учетом влияния данных факторов с целью обоснования выбранных областей для включения их в модель. Предлагается варьировать параметры и использовать частотные диапазоны (уровни для модели  $2^k$ ), которые можно описать эмпирической зависимостью. Измерения производились на макете в лабораторных условиях с трубой диаметром 50 мм без жидкости.

Предлагается включить в модель частотный диапазон, чувствительный к изменению состояния трубопровода и, вместе с этим, имеющий максимальное затухание сигнала. Результаты варьирования параметров изображены на рис. 4.

Затухание в заглубленном трубопроводе может иметь отклонения от экспоненциального закона затухания упругих волн (рис. 4). Данный эффект наблюдается при контакте волновода с грунтом, имеющим свой коэффициент поглощения акустической волны, зависящий от частоты с наличием

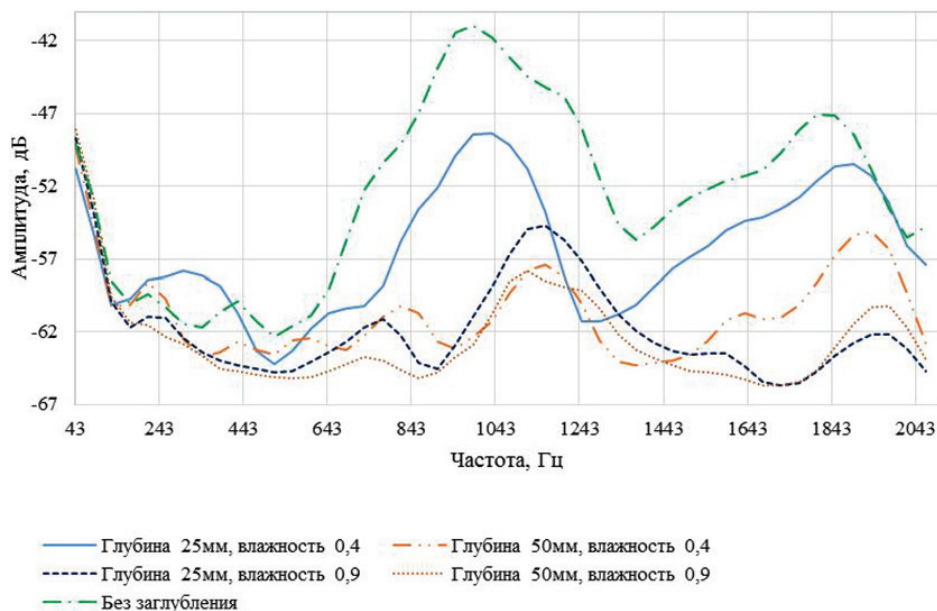


Рис. 4. Влияние факторов на амплитудно-частотный спектр

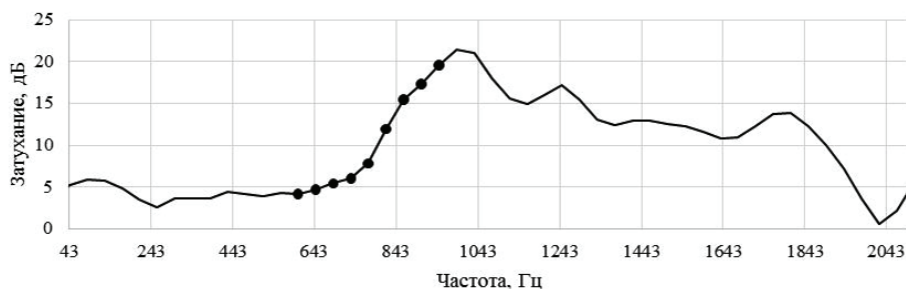


Рис. 5. Амплитудно-частотный спектр затухания сигнала при заполнении шурфа грунтом

резко выраженных максимумов. Известна частотная характеристика различных пористых поглотителей [6]. Грунт, в который погружалась труба при проведении полнофакторного эксперимента, также можно отнести к классу поглотителей, имеющих свою частотную характеристику поглощения.

Современные экспериментальные исследования в области изучения акустического поглощения в песчаных смесях указывают на максимальное поглощение в области 1200 Гц [7, 8] с возможным смещением максимума коэффициента поглощения в зависимости от параметров смеси.

Эксперимент по имитации создания шурфа выявил высокую информативность данного частотного диапазона (600–900 Гц, рис. 4, 5) при обнаружении отклонения трубопроводной системы от нормы, так как амплитудно-частотный спектр при возникновении шурфа имеет максимальное отклонение амплитуды на тех же частотах, как и в случае с изменением глубины погружения и влажности грунта. Точками на рис. 5 отмечен совпадающий диапазон частот. Построим регрессионную модель в данном частотном диапазоне, определяющую значение затухания сигнала, переданного по заглубленной трубе в грунт на один метр, в зависимости от влажности грунта, частоты сигнала и глубины погружения.

В табл. 1–3 отражены экспериментальные статистические данные, на основе которых строилась модель. В табл. 4, 5 получена матрица планирования эксперимента.

Число повторных опытов:  $m = 3$ , число разных опытов:  $g = 8$ . Всего опытов:  $N = mg = 3 \cdot 8 = 24$ .

Воспроизводимость опытов по критерию Кохрена [9]:

$$G_{\max} = \frac{S_{\max}^2}{\sum S_g^2} = 0,192.$$

Табличный критерий Кохрена выбирается для значений:  $\alpha = 0,05$ ;  $f_1 = g = 8$ ;  $f_2 = m - 1 = 3 - 1 = 2$ . Доверительной вероятности  $P = 0,95$  соответствует значение  $C_2^8 = 0,816$ . Табличное значение больше расчётного, следовательно, опыты воспроизводимы.

Коэффициенты регрессии:

$$b_0 = 9,704, b_1 = 1,282, b_2 = 2,291, b_3 = 7,283,$$

$$b_{12} = -0,697, b_{12} = -0,785, b_{23} = 0,982, b_{123} = -0,76.$$

Уравнение регрессии:

$$y(x_1, x_2, x_3) = 9,70375 + 1,2821x_1 + 2,2913x_2 + 7,2829x_3 - 0,697x_1x_2 + 0,8746x_1x_3 + 0,9821x_2x_3 - 0,76x_1x_2x_3,$$

где  $x_1$  — глубина погружения трубы в грунт;  $x_2$  — влажность грунта;  $x_3$  — частота;  $y(x_1, x_2, x_3)$  — функция затухания.

Необходимо выполнить оценку статистической значимости каждого из коэффициентов уравнения регрессии.

Сбор данных для эксперимента (амплитуда на расстоянии 1 м)

Глубина, мм	Влажность $\varphi$	Частота, Гц	Амплитуда, дБ	Амплитуда, дБ	Амплитуда, дБ	Среднее
25	0,4	600	-61,65	-61,85	-61,69	-61,73
50	0,4	600	-62,45	-62,31	-62,5	-62,42
25	0,9	600	-64,13	-64,32	-64,22	-64,22
50	0,9	600	-65,3	-65,14	-65,05	-65,16
25	0,4	900	-53,73	-53,95	-53,89	-53,85
50	0,4	900	-61,3	-61,03	-61,23	-61,18
25	0,9	900	-63,35	-63,41	-63,5	-63,42
50	0,9	900	-64,71	-64,85	-64,9	-64,82

Таблица 2

Сбор данных для эксперимента

Глубина, мм	Влажность $\varphi$	Частота, Гц	Амплитуда, дБ	Амплитуда, дБ	Амплитуда, дБ	Среднее
25	0,4	600	-60,81	-61,13	-60,95	-60,96
50	0,4	600	-60,81	-61,13	-60,95	-60,96
25	0,9	600	-60,81	-61,13	-60,95	-60,96
50	0,9	600	-60,81	-61,13	-60,95	-60,96
25	0,4	900	-43,87	-43,67	-43,73	-43,75
50	0,4	900	-43,87	-43,98	-43,73	-43,86
25	0,9	900	-43,87	-43,98	-43,73	-43,86
50	0,9	900	-43,87	-43,98	-43,73	-43,86

Таблица 3

Определение коэффициента затухания

Глубина, мм	Влажность $\varphi$	Частота, Гц	Затухание, дБ	$S$	$S^2$
25	0,4	600	0,77	0,064	0,004
50	0,4	600	1,46	0,243	0,059
25	0,9	600	3,26	0,065	0,004
50	0,9	600	4,2	0,255	0,065
25	0,4	900	10,1	0,216	0,046
50	0,4	900	17,33	0,242	0,058
25	0,9	900	19,56	0,183	0,033
50	0,9	900	20,96	0,182	0,0333

Незначимые коэффициенты следует исключить из уравнения. Значимость коэффициентов уравнения:

$$t_i = \frac{b_i}{\sqrt{\frac{S}{mg}}}$$

Табличный критерий Стьюдента [10] при уровне значимости  $\alpha=0,05$  и числе степеней свободы:  $\nu = g(m-1) = 16$ ;  $t \cdot \alpha = 0,0516 = 2,12$ .

Все коэффициенты уравнения регрессии являются значимыми, так как расчетные значения  $t_i$  для каждого коэффициента по модулю больше табличного  $t_{cm}$  (табл. 6).

Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Факторы в натуральном масштабе			Факторы в безразмерной системе координат				Выходной параметр
	$z_1$ , мм	$z_2$	$z_3$ , Гц	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	Затухание, дБ
1	25	0,4	600	1	-1	-1	-1	0,77
2	50	0,4	600	1	1	-1	-1	1,46
3	25	0,9	600	1	-1	1	-1	3,26
4	50	0,9	600	1	1	1	-1	4,2
5	25	0,4	900	1	-1	-1	1	10,1
6	50	0,4	900	1	1	-1	1	17,33
7	25	0,9	900	1	-1	1	1	19,56
8	50	0,9	900	1	1	1	1	20,96

Таблица 5

Расширенная матрица планирования эксперимента

Номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	Затухание, дБ
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,77
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1,46
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	3,26
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	4,2
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	10,1
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	17,33
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	19,56
8	1	1	1	1	1	1	1	1	20,96

Таблица 6

Значимость коэффициентов уравнения

	$b_i$	$t_i$		$b_i$	$t_i$	$t_{cm}$
$b_0$	9,704	242,59	$b_{12}$	-0,697	-17,427	2,1199
$b_1$	1,282	32,052	$b_{13}$	0,875	21,865	
$b_2$	2,291	57,281	$b_{23}$	0,982	24,552	
$b_3$	7,283	182,07	$b_{123}$	-0,76	-18,99	

Полученное уравнение регрессии не учитывает размерности величин для каждого из факторов, но отражает степень влияния каждого фактора на затухание. Для приведения модели к виду, соответствующему натуральным величинам (миллиметрам для глубины и коэффициенту объемной влажности от 0,4 до 0,9), выразим натуральные

переменные из кодированных через центр плана и интервал варьирования (табл. 7).

Далее подставим значения переменных в натуральном масштабе вместо кодированных и упростим выражение:

$$y(z_1, z_2, z_3) = 13,5753 - 0,892696z_1 - 47,7128z_2 +$$

Определение центра плана, интервала варьирования  
и зависимости кодированной переменной от натуральной

Фактор	Верхний уровень	Нижний уровень	Центр	Интервал	Зависимость кодированной от натуральной
$z_1$	50	25	37,5	12,5	$(z_1 - 37,5)/12,5$
$z_2$	0,9	0,4	0,65	0,25	$(z_2 - 0,65)/0,25$
$z_3$	900	600	750	150	$(z_3 - 750)/150$

Таблица 8

Сравнение данных моделирования (М) с эмпирическими (Э)

F, Гц	Глубина 25 мм, влажность 0,4		Глубина 25 мм, влажность 0,9		Глубина 50 мм, влажность 0,4		Глубина 50 мм, влажность 0,9	
	М	Э	М	Э	М	Э	М	Э
602	0,858	0,907	3,418	3,195	1,611	1,491	4,364	4,198
646	2,198	1,654	5,758	4,385	3,889	3,521	6,770	5,624
689	3,537	4,212	8,098	7,042	6,167	6,043	9,176	8,528
732	4,877	5,643	10,438	9,434	8,446	8,814	11,581	11,508
775	6,217	7,031	12,779	10,713	10,724	10,142	13,987	13,513
818	7,556	8,144	15,119	13,13	13,00	11,564	16,393	15,545
861	8,896	9,013	17,459	17,125	15,281	14,014	18,799	18,176
904	10,236	9,89	19,799	19,521	17,559	17,221	21,205	20,855
$R^2$	0,977		0,989		0,899		0,997	

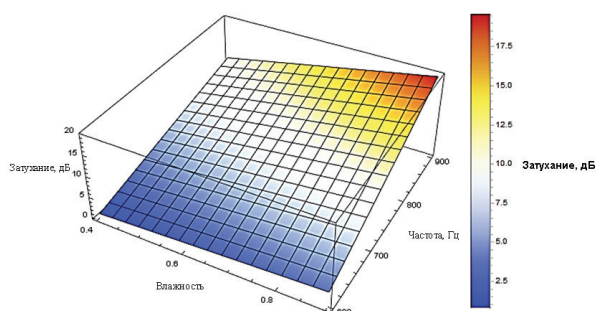


Рис. 6. Зависимость затухания от частоты и объемной влажности

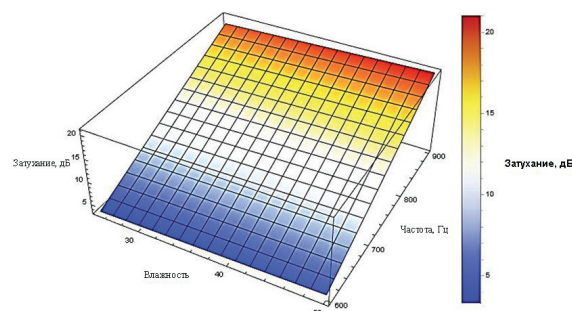


Рис. 7. Зависимость затухания от частоты и глубины погружения

$$+ 0,99296z_1z_2 - 0,0254824z_3 + 0,00152032z_1z_3 + \\ + 0,0869893z_2z_3 - 0,00162133z_1z_2z_3,$$

где  $z_1$  — глубина погружения трубы в грунт (25–50 мм);  $z_2$  — объемная влажность грунта (0,4–0,9);

$z_3$  — частота (600–900 Гц);  $y(z_1, z_2, z_3)$  — функция затухания, дБ на 1 метр.

Оценка результатов моделирования в сравнении с эмпирическими данными отражена в табл. 8. Коэффициенты детерминации находятся в диапазоне от 0,899 до 0,997, что указывает на адекватность

модели. Затухание сигнала в зависимости от частоты и объемной влажности при фиксированном параметре «глубина 25 мм» изображено на рис. 6, при фиксированном параметре «объемная влажность (0,4)» — на рис. 7.

Таким образом, при использовании данного уравнения регрессии возможно варьирование каждого из трех факторов для определения значения затухания сигнала на 1 метр заглубленного трубопровода.

#### Библиографический список

1. Пат. 2463590 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). Способ обнаружения изменений параметров среды в окружении заглубленного магистрального продуктопровода / Епифанцев Б. Н., Федотов А. А. № 2011121858/28; заявл. 30.05.2011; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 28.
2. Епифанцев Б. Н., Пятков А. А., Федотов А. А. Концепция обеспечения безопасной работы магистральных трубопроводов в условиях внешних воздействий // Безопасность труда в промышленности. 2013. № 12. С. 42–49.
3. Епифанцев Б. Н., Пятков А. А., Федотов А. А. К оценке чувствительности виброакустической системы обнаружения локальных возмущений параметров среды в окружении магистрального трубопровода // Дефектоскопия. 2015. № 2. С. 17–26.
4. Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Неразрушающий контроль: справ. В 8 т. Т. 3. Ультразвуковой контроль / под общ. ред. В. В. Клюева. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2006. 864 с.
5. Холодов В. И. Планирование экспериментов в гидробиологических исследованиях / под ред. В. Н. Еремеева; Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского. Севастополь, 2016. 196 с. ISBN 978-5-9909071-1-9.
6. Белов С. Б., Ильницкая А. В., Козьяков А. Ф. [и др.]. Безопасность жизнедеятельности / под общ. ред. С. В. Белова. 7-е изд., стер. М.: Высшая школа, 2007. 616 с.

7. Perna I., Hanzlicek T., Steinerova M. [et al.]. Acoustic Absorption of geopolimer/sand mixtures // Ceramics-Silikáty. 2009. Vol. 53, № 1. P. 48–51.

8. Sikora J., Turkiewicz J. Sound absorption coefficients of granular materials // Mechanics and control. 2010. Vol. 29, № 3. P. 149–157.

9. Середин В. В. Исследование влияния вязкости поровой жидкости (углеводородов) на прочностные свойства песков // Инженерная геология. 2014. № 4. С. 45–48. DOI:10.25296/1993-5056-2014-4-45-48.

10. Гузик В. Ф., Гушанский С. М., Потапов В. С. Проведение полного факторного эксперимента для характеристик модели квантового вычислителя // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 3 (164). С. 46–54.

**ФЕДОТОВ Александр Анатольевич**, соискатель, младший научный сотрудник кафедры «Комплексная защита информации» Омского государственного технического университета.

Адрес для переписки: fedotov1609@gmail.com

**КОПЕЙКИН Степан Андреевич**, аспирант кафедры «Информационная безопасность» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета.

Адрес для переписки: stepan.im@mail.ru

#### Для цитирования

Федотов А. А., Копейкин С. А. Влияние факторов окружающей среды на распространение упругих колебаний в трубопроводе // Омский научный вестник. 2018. № 1 (157). С. 76–82. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-157-76-82.

Статья поступила в редакцию 29.12.2017 г.

© А. А. Федотов, С. А. Копейкин