

дун. науч.-техн. конф / IEEE Catalog Number 98EX179. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. Т. 1. С. 223–229.

7. Зверев Е. Г., Дрянков А. И. Широкодиапазонный многостоповый преобразователь время-код // ПТЭ. 1991. № 2. С. 94–97.

8. Kern J. Certain problems that arise when testing LSI and VLSI // Prace PIE. 1988. № 105. P. 23–57. = Отдельные проблемы, возникающие при тестировании БИС и СБИС: пер. с англ. / МПСАиСУ. УТОиО НИИ «Контрольприбор». № 1115. Пенза. 30 с.

**НИКОНОВА Галина Владимировна**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики».

УДК 620.179.1

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-201-205

SPIN-код: 3654-0682

AuthorID (SCOPUS) 7801434337

ResearcherID: N-1910-2014

Адрес для переписки: ngvlad@mail.ru

#### Для цитирования

Никонова Г. В. Метрологическая надежность автоматизированных систем контроля и диагностики изделий электронной техники УВЧ диапазона // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 196–201. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-196-201.

Статья поступила в редакцию 04.10.2018 г.

© Г. В. Никонова

**А. Е. САМОТУГА<sup>1</sup>**  
**Р. А. АХМЕДЖАНОВ<sup>2</sup>**  
**А. А. ФЕДОТОВ<sup>2</sup>**  
**А. А. ПЯТКОВ<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

<sup>2</sup>Омский государственный  
университет путей сообщения,  
г. Омск

<sup>3</sup>Закрытое акционерное  
общество «СиСофт Омск»,  
г. Омск

## ПОЛНАЯ МОДЕЛЬ КОЛЕБАНИЙ ТРУБОПРОВОДА ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Актуальной задачей является получение экспериментальных данных о колебаниях трубопровода для оценки эффективности виброакустических способов контроля его состояния, при этом доступ к объекту зачастую затруднен. В работе представлена усовершенствованная модель, на основе которой предложено рассчитывать упругие колебания, фиксируемые на поверхности трубопровода в результате ударного воздействия. Проведена оценка адекватности полученного аналитического выражения путем сравнения расчетного сигнала с эмпирическим.

**Ключевые слова:** упругие колебания, поперечные колебания трубопровода, ударное воздействие, полная модель колебаний трубопровода.

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

Обширная сеть трубопроводов Российской Федерации обеспечивает работу топливно-энергетического комплекса. Остро стоит вопрос предупреждения и обнаружения утечек нефтепродуктов. Несмотря на снижение показателя аварийности на российских трубопроводах до уровня европейских, согласно статистике, в год происходит несколько тысяч разливов, которые приводят к существенному ущербу экологии и финансовым затратам.

Согласно данным Европейской группы по сбору данных об авариях на газопроводах (EGIG), Ассоциации операторов западно-европейских магистраль-

ных нефтепроводов (CONCAWE) и Бюро трубопроводной безопасности Управления по безопасности трубопроводов и опасным материалам (PHMSA), основным фактором возникновения аварийных ситуаций является внешнее воздействие [1].

Для изучения факторов, влияющих на возникновение аварий на трубопроводах и построения конструкций трубопроводов, устойчивых к внешним воздействиям, научным сообществом предложены различные математические модели трубопровода.

Известными моделями при расчете предельных состояний трубопровода для строительства систем

транспортировки нефтепродуктов являются аналитические выражения для колебаний нити [2, 3], стержня [4, 5] и цилиндрической оболочки [6]. Область применения многих моделей ограничена, например, не учитывается изгибная жесткость и предполагается, что трубопровод подвергается значительному прогибу (модель нити).

Несмотря на то, что модели создавались с целью оценки напряженно-деформированного состояния трубы, их также можно задействовать при расчетах виброакустического сигнала, фиксируемого на ее поверхности для разработки и расчета эффективности функционирования систем контроля состояния трубопроводов, так как в их составе применяются источники упругих колебаний. Возможность аналитического представления колебаний трубопровода позволяет проводить тестирование алгоритмов обнаружения и идентификации вида воздействия без необходимости получения доступа к действующим объектам [7]. В работе [8] применена модель упругих колебаний трубопровода, в которой отмечена необходимость модификации аналитического выражения для повышения достоверности получаемых данных при расчете колебаний протяженного трубопровода.

Фиксируемый оборудованием сигнал представляет собой колебания трубопровода на его собственных частотах при ударном точечном воздействии генератором [9]. С учетом упругости материала, которая определяет обратный процесс деформации, максимальное ее значение наблюдается в момент времени, соответствующий половине длительности контакта [10, 11]. Упругий удар описывается теорией Герца, согласно которой длительность контакта ударника (устройства, осуществляющего генерацию упругих колебаний) с трубой можно получить из соотношения [10]:

$$\tau = 2,9432 \frac{\alpha_m}{v_0}. \quad (1)$$

В формуле (1)  $v_0$  — скорость штока ударника. Ударник и трубу можно представить соответственно в виде сферы радиуса  $R$  и массивной плоской поверхности. В таком случае выражение для  $\alpha_m$  будет иметь вид:

$$\alpha_m = \frac{15\pi v_0^2 (\delta_1 + \delta_2) m}{16\sqrt{R}},$$

где  $m$  — масса ударника;  $R$  — радиус сферы;  $\delta_1, \delta_2$  — постоянная материала в теории Герца.

Зависимость между силой и временем можно записать в следующем виде [10]:

$$F = \left. \begin{aligned} & \frac{1,14 v_0^2}{k_i \alpha_m} \sin \frac{1,068 v_0 t}{\alpha_m}, \\ & 0 \leq t \leq \frac{\pi \alpha_m}{1,068 v_0}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Расчеты в среде Matlab по формуле (2) изображены на рис. 1.

Зависимость прогиба от времени, с учетом силы взаимодействия и жесткости основания, можно получить в результате разбиения колебательного процесса на две составляющие: от начала контакта трубы с ударником и после взаимодействия.

Первая составляющая взаимодействия описывает вынужденные колебания, в которой значения

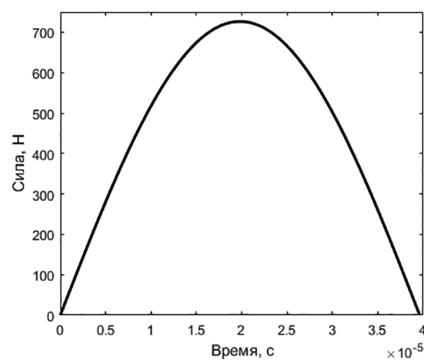


Рис. 1. Сила воздействия ударником на трубопровод

Таблица 1

Параметры полной модели

Длина трубы, м	$L=5$
Координата источника, м	$x_1=2,5$
Координата приемника, м	$x_2=0,53$
Толщина стенки трубы, м	$h=0,003$
Модуль Юнга для стали, Па	$E=200 \times 10^9$
Диаметр трубы, м	$d=0,038$
Число мод	$n=70$
Скорость штока генератора колебаний, м/с	$u=1,43$
Частота дискретизации сигнала, Гц	44100
Коэффициенты затухания	$A_1=7, A_2=1$
Коэффициент жесткости основания	$A_3=105000$
Длительность контакта, с	$T=0,00004$
Плотность стали, кг/м <sup>3</sup>	$R_0=7800$

прогибов при  $0 \leq t \leq \tau$  можно определить из следующей функции смещения от времени, если представить трубу в качестве стержня с моментом инерции  $J$ , диаметром  $d$  и толщиной стенки  $h$  [10]:

$$Y(x, t) = \frac{\pi m v_0 (1 + e)}{\rho A L \tau} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-1)^{i-1} \sin \frac{i\pi x}{L}}{\left( \omega_i^2 - \frac{\pi^2}{\tau^2} \right)^2 + \frac{4\pi^2 \delta_i^2}{\tau^2}} \times \left\{ \begin{aligned} & e^{-\delta_i t} \left[ \frac{2\delta_i \pi}{\tau} \cos \theta_i t + \frac{\pi}{\tau \theta_i} \left( 2\delta_i^2 - \omega_i^2 + \frac{\pi^2}{\tau^2} \right) \sin \theta_i t \right] \\ & - \frac{2\delta_i \pi}{\tau} \cos \frac{\pi t}{\tau} + \left( \omega_i^2 - \frac{\pi^2}{\tau^2} \right) \sin \frac{\pi t}{\tau} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где  $m$  — масса штока;  $v_0$  — скорость штока;  $\rho$  — плотность стали;  $A$  — площадь сечения;  $L$  — длина трубы;  $\tau$  — длительность контакта штока с трубой;  $x$  — координата воздействия;  $i$  — номер моды;  $\omega_i$  — собственная частота колебаний;

$$\omega_i = \sqrt{A_3 + \frac{EJK_i^4}{ML^4}}; \delta_i = \frac{1}{2} \left( A_1 \frac{i^4 \pi^4}{L^4} + A_2 \right);$$

$$\theta = \sqrt{\omega_i^2 - \delta_i^2}; A_1 = \frac{c_1 I}{\rho A}; A_2 = \frac{c_2}{\rho A}; A_3 = \frac{k}{\rho A};$$

$A_1, A_2$  — коэффициенты затухания;  $A_3$  — коэффициент жесткости основания.

Выражение (3) было использовано для определения прогиба трубы с параметрами, указанными в табл. 1.

Результаты расчета смещения для  $0 \leq t \leq \tau$  отражены на рис. 2.

Для построения смещения (рис. 2) потребовалась частота дискретизации 320000 Гц. Длительность контакта, полученная из выражения (1), составляет  $4 \cdot 10^{-5}$  с. При частоте дискретизации 44100 Гц период между отсчетами сигнала составляет  $2,3 \cdot 10^{-5}$  с и функция силы описывается двумя отсчетами, что неприемлемо. Таким образом, зафиксировать приемником функцию смещения не представляется возможным ввиду недостаточно высокой частоты дискретизации, а использование более высоких частот в сигнале бессмысленно, так как они не являются информативными для обнаружения нарушений.

Учитывая вышеизложенное, использовать функцию прогиба в моделировании итогового импульса колебаний при таких условиях не имеет смысла с практической точки зрения и регистрируемый сигнал следует представить в виде собственных колебаний трубопровода на его резонансных частотах [12, 13], которые описывает вторая составляющая колебательного процесса по истечении времени контакта  $t > \tau$ :

$$Y(t) = \frac{\pi m v_0 (1 + \bar{e})}{\rho A L \tau} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-1)^{i-1} \sin \frac{i \pi x}{L}}{\left( \omega_i^2 - \frac{\pi^2}{\tau^2} \right)^2 + \frac{4 \pi^2 \delta_i^2}{\tau^2}} \times$$

$$\left\{ \begin{aligned} & \left[ \begin{aligned} & 2e^{\delta_i \tau} \frac{\delta_i \pi}{\tau} \cos \theta_i \tau - \\ & - \frac{\pi e^{\delta_i \tau}}{\tau \theta_i} \left( 2\delta_i^2 - \omega_i^2 + \frac{\pi^2}{\tau^2} \right) \sin \theta_i \tau + \frac{2\pi \delta_i}{\tau} \end{aligned} \right] \cos \theta_i t + \\ & \left[ \begin{aligned} & \frac{\pi e^{\delta_i \tau}}{\tau \theta_i} \left( 2\delta_i^2 - \omega_i^2 + \frac{\pi^2}{\tau^2} \right) \cos \theta_i \tau + 2e^{\delta_i \tau} \cdot \\ & \cdot \frac{\delta_i \pi}{\tau} \sin \theta_i \tau + \frac{\pi}{\tau \theta_i} \left( 2\delta_i^2 - \omega_i^2 + \frac{\pi^2}{\tau^2} \right) \end{aligned} \right] \sin \theta_i t \end{aligned} \right\} + S(t) \quad (4)$$

Выражение (4) использовалось для расчета свободных колебаний трубопровода. Для модели введен термин «полная». Результат моделирования процесса свободных колебаний трубопровода с отсутствием помехи  $S(t)=0$  в сравнении с эмпирически полученным усредненным по 30 импульсам сигналом изображен на рис. 3.

Период 45 мс от начала формирования аналитически и эмпирически полученных импульсов с использованием ударника изображен на рис. 4. Визуальная оценка формы среднего эмпирического импульса, полученного на трубе с параметрами, указанными в табл. 1 и полученного аналитически, позволяет судить о высоком сходстве амплитудно-временных кривых. Коэффициент корреляции

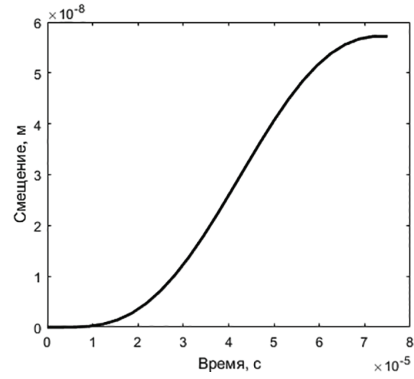


Рис. 2. Смещение трубопровода для  $0 \leq t \leq 2\tau$

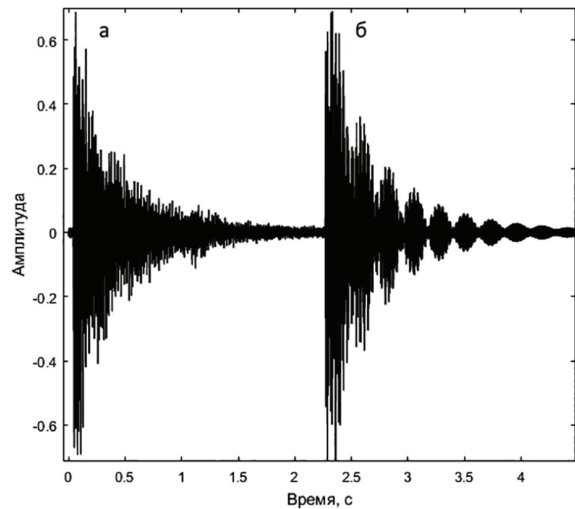


Рис. 3. Импульсы при ударном воздействии:  
а — эмпирический;  
б — аналитический, на основе полной модели

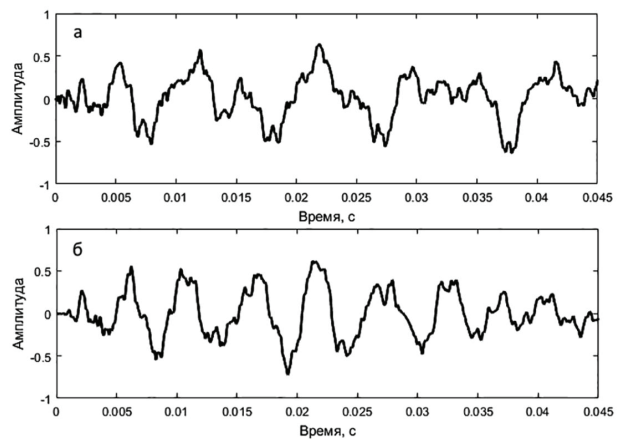


Рис. 4. Импульс при ударном воздействии, 45 мс от момента формирования сигнала: а — эмпирический; б — аналитический, на основе полной модели

[14] при длительности сигналов  $t < 5$  мс по формам на рис. 4 равен  $R=0,89$ . Далее наблюдается смещение фазы и отклонения амплитуд, однако общие закономерности построения сигналов сохраняются.

Произведем оценку спектральной составляющей сигнала модели с использованием ненулевых значений помехи  $S(t) \neq 0$  посредством суммирова-

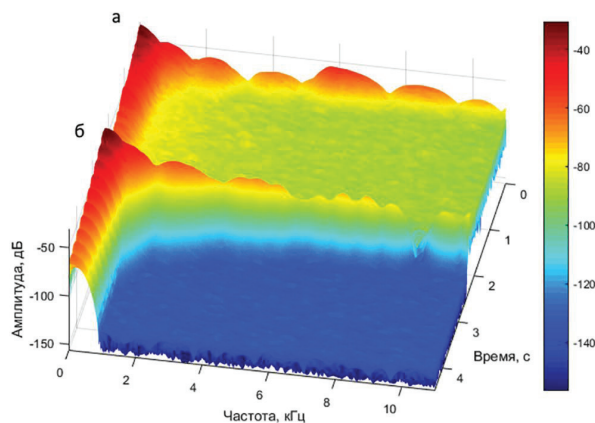


Рис. 5. Спектрограмма импульсов при ударном воздействии:  
а — эмпирический;  
б — аналитический, на основе полной модели при  $S(t)=0$

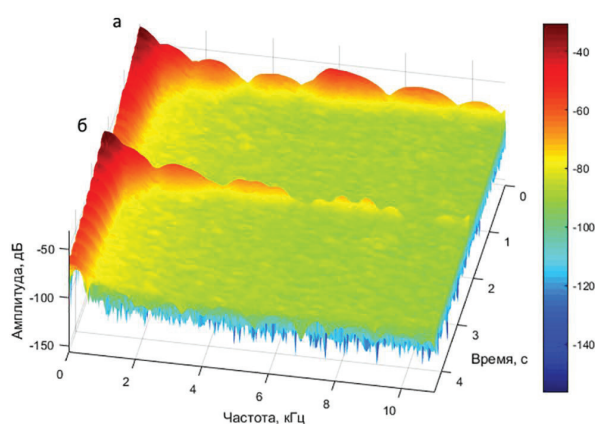


Рис. 6. Спектрограмма импульсов при ударном воздействии:  
а — эмпирический;  
б — аналитический, на основе полной модели при  $S(t) \neq 0$

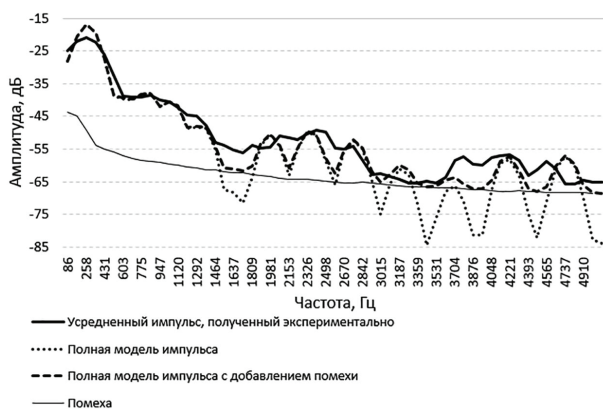


Рис. 7. Амплитудный спектр сигналов

ния с функцией полезного сигнала  $Y(t)$ . На рис. 5 изображена спектрограмма для сравниваемых сигналов при  $S(t)=0$  на рис. 6, 7 — спектрограммы моделированного сигнала с наложением помехи  $S(t) \neq 0$  и экспериментального усредненного сигнала.

Наблюдается сходство спектральных характеристик вплоть до 5кГц (против 1,5 кГц у базовой модели), с дальнейшим ростом частоты появляются расхождения. Возможно расширение диапазона

совпадения амплитуд частот, но посредством модификации частотного уравнения, что указывает на вероятное влияние двух металлических опор, на которых покоилась труба при проведении экспериментов.

Наложение помехи повлияло на амплитудный спектр. Частотная характеристика моделированного сигнала приблизилась по форме к экспериментальной ( $R=0,91$  при  $S(t)=0$ ;  $R=0,95$  при  $S(t) \neq 0$ ), амплитудный спектр сигналов изображен на рис. 7.

По результатам, выдаваемым полной моделью, следует сделать вывод о значительной сходимости результатов, формируемых при воспроизведении частот до 5 кГц ( $R=0,95$ ). Значение коэффициента корреляции амплитудного спектра для трубы с параметрами в табл. 1 на основе полной модели и эмпирических сигналов повысилось на 12 % относительно базовой модели, при этом появилась возможность оперирования такими параметрами, как жесткость основания (основная энергия импульса на основе базовой модели сосредоточена в низкочастотном диапазоне), длительность контакта ударника с трубой, свойства материала стенки трубы и характеристики источника колебаний.

Дальнейшие модификации активных способов контроля [15, 16] либо иных подходов к обнаружению несанкционированной деятельности рекомендовано испытывать на основе представленной полной модели, так как она наиболее полно описывает исследуемые явления.

#### Библиографический список

- Лисанов М. В., Савина А. В., Дегтярев Д. В. [и др.]. Анализ российских и зарубежных данных по аварийности на объектах трубопроводного транспорта // Безопасность труда в промышленности. 2010. № 7. С. 16–22.
- Наумова Г. А., Овчинников И. Г., Снарский С. В. Расчет трубопроводных конструкций с эксплуатационными повреждениями: моногр. Волгоград: Изд-во ВолГАСУ, 2009. 184 с. ISBN 978-598276-257-3.
- Щербаков В. П. Прикладная механика нити. М.: Изд-во РИО МГТУ им. А. Н. Косыгина, 2001. 301 с.
- Лалин В. В., Денисов Г. В. Динамическое поведение бесконечных стержневых элементов на упруговязком основании под действием точечного источника возмущения // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. 2013. № 2 (30). С. 105–113.
- Масленников А. М. Основы динамики и устойчивости стержневых систем. М.: Изд-во АСВ, 2000. 204 с.
- Булдаков Е. Л. Методика расчета несущей способности магистрального нефтепровода, проложенного в скальных грунтах, под воздействием сейсмозрывных волн: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2015. 105 с.
- Ахмеджанов Р. А., Федотов А. А. О помехоустойчивости активного виброакустического способа контроля состояния магистрального трубопровода // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 116–120. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-116-120.
- Федотов А. А. Математическая модель упругих колебаний трубопровода при ударном воздействии // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 5-3 (59). С. 132–138. DOI: 10.23670/IRJ.2017.59.039.
- Ахмеджанов Р. А., Кабанов С. В., Самотуга А. Е., Федотов А. А. Амплитудно-частотный спектр виброакустического сигнала при ударном воздействии на трубопровод // Энергосбережение и водоподготовка. 2018. № 1 (111). С. 67–72.
- Голдсмит В. Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел / пер. с англ. М. С. Лужиной и О. В. Лужина. М.: Изд-во литературы по строительству, 1965. 448 с.

11. Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уквер У. Колебания в инженерном деле / пер. с англ. Л. Г. Корнейчука; под ред. Э. И. Григолюка. М.: Машиностроение, 1985. 472 с.

12. Миронов М. А., Пятаков П. А., Андреев А. А. Вынужденные изгибные колебания трубы с потоком жидкости // Акустический журнал. 2010. Т. 56, № 5. С. 684–692.

13. Крайнова Л. Н., Муницын А. И. Пространственные нелинейные колебания трубопровода при гармоническом возбуждении // Машиностроение и инженерное образование. 2010. № 2. С. 46–51.

14. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. 9-е изд., стер. М.: Высшая школа, 2003. 479 с.

15. 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. 30.05.11; опубл. 10.10.12, Бюл. № 28.

16. Пат. 2523043, Российская Федерация, МПК G 01 N 29/04, F 17 D 5/02. Способ обнаружения предвестников чрезвычайных ситуаций на линейной части подземного магистрального продуктопровода / Епифанцев Б. Н. № 2013115545/28; заявл. 05.04.13; опубл. 20.07.14, Бюл. № 20.

**САМОТУГА Александр Евгеньевич**, кандидат технических наук, ассистент кафедры «Комплексная защита информации» Омского государственного технического университета.  
SPIN-код: 4235-1670  
AuthorID (РИНЦ): 724385

Адрес для переписки: samotugasashok@mail.ru  
**АХМЕДЖАНОВ Равиль Абдрахманович**, кандидат технических наук, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС).  
AuthorID (РИНЦ): 533818

Адрес для переписки: ahmedjanov.ra@gmail.com  
**ФЕДОТОВ Александр Анатольевич**, кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ОмГУПС.

SPIN-код: 2511-2353  
AuthorID (РИНЦ): 686080

Адрес для переписки: fedotov1609@gmail.com  
**ПЯТКОВ Артем Анатольевич**, кандидат технических наук, инженер-программист ЗАО «СиСофт Омск».

SPIN-код: 9104-6804  
AuthorID (РИНЦ): 631613  
Адрес для переписки: artoymur@gmail.com

#### Для цитирования

Самотуга А. Е., Ахмеджанов Р. А., Федотов А. А., Пятков А. А. Полная модель колебаний трубопровода при ударном воздействии // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 201–205. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-201-205.

Статья поступила в редакцию 13.10.2018 г.

© А. Е. Самотуга, Р. А. Ахмеджанов, А. А. Федотов, А. А. Пятков