

## О ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ АКТИВНОГО ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО СПОСОБА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА

Повышение помехоустойчивости является одной из основных задач при разработке методов и систем виброакустического контроля. В работе реализовано моделирование функционирования активного способа контроля состояния магистрального трубопровода с использованием аналитической модели поперечных колебаний стержня с добавлением помехи, полученной на действующем трубопроводе. Сделан вывод о перспективности использования когерентного накопления сигнала в активных системах контроля состояния трубопроводов.

**Ключевые слова:** накопление сигнала, трубопровод, модель колебания стержня, поперечные колебания, отношение сигнал/шум.

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

Актуальность проблемы обеспечения безопасности транспортировки нефтепродуктов приводит к появлению новых подходов, используемых в технических решениях обнаружения несанкционированных воздействий на трубопровод [1, 2]. Одним из способов мониторинга трубопровода предложено обнаруживать отклонение его состояния от штатного посредством периодической генера-

ции импульсов упругих колебаний на поверхности трубопровода, их накоплении на удаленном конце для формирования сигнала в виде импульса и сравнении с образцовым [3, 4]. Основу помехоустойчивости обеспечивает алгоритм когерентного накопления сигнала [5].

Накопление необходимо для повышения отношения сигнал/шум, так как окружающая среда

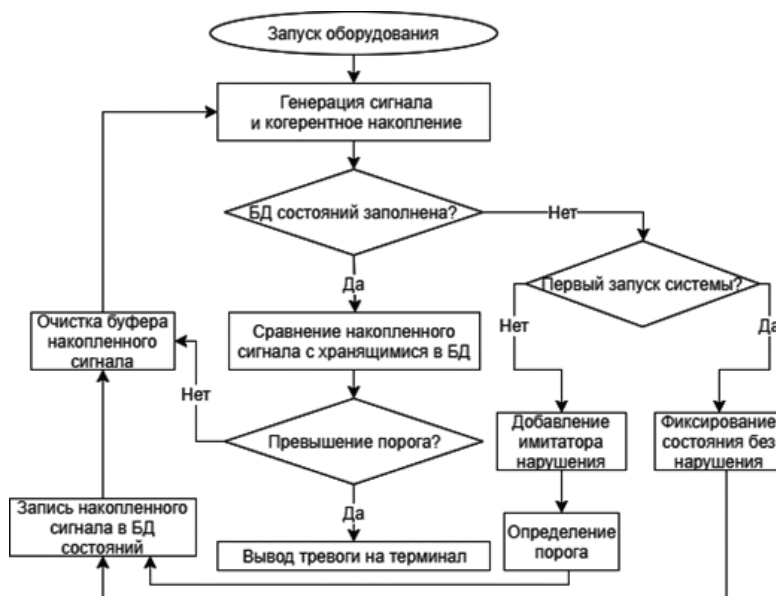


Рис. 1. Алгоритм работы системы

и особенности функционирования трубопровода вносят значительные искажения в переданный сигнал. Алгоритм работы системы контроля трубопровода изображен на рис. 1.

Эффективность способа требует уточнения, так как не приведены результаты оценки повышения отношения сигнал/шум с использованием естественной помехи, характеристики которой могут отличаться от теоретических. Реализация когерентного накопления требует высокоточного оборудования для генерации импульсов. Точную оценку эффективности подавления помехи можно осуществить с помощью добавления помехи  $S(t)$ , полученной на действующем трубопроводе, к дискретному сигналу, сгенерированному на основе математической модели [6]:

$$Y(t) = \frac{2v \cdot \delta}{L} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{\omega_i} \sin \frac{i \cdot \pi \cdot x_1}{L} \times \\ \times \sin \frac{i \cdot \pi \cdot x_2}{L} \sin \omega_i t \cdot e^{-t(\omega_i z + k)} + S(t); \\ \omega_i = \sqrt{\frac{EJ}{ML}} K_i^4; \quad J = \frac{\pi}{8} d^3 h; \quad M = \rho \pi d h,$$

где  $v$  — начальная скорость движения частиц трубы при ударном воздействии;  $\delta$  — диаметр штока ударника;  $L$  — длина трубопровода;  $\omega_i$  — собственные частоты колебаний трубы;  $x_1, x_2$  — координата источника и приемника;  $t$  — дискретизированные отсчеты времени;  $z$  — амплитудно-частотный коэффициент затухания;  $k$  — амплитудно-временной коэффициент затухания;  $E$  — модуль Юнга материала стенки трубы;  $J$  — момент инерции стенки трубы;  $M$  — погонная масса трубы;  $K_i$  — корни частотного уравнения для моды с номером  $i$ ;  $d$  — диаметр трубопровода;  $h$  — толщина стенки трубы;  $\rho$  — плотность материала стенки трубы.

Когерентное накопление с усреднением позволяет уменьшить дисперсию шума, сохраняя сигнал неизменным.

Условиями для повышения отношения сигнал/шум данным методом является синхронизация момента времени взятия отсчетов импульсов, неизменность характеристик передаваемого по трубе сигнала и некоррелированность отсчетов шумов. Общая формула когерентного накопления с усреднением имеет вид [7]:

$$X_{avg}(k) = \frac{\sum_{n=1}^N x_n(k)}{N},$$

где  $x_{avg}(k)$  — амплитуда усредненного отсчета;  $k$  — номер усредняемого отсчета;  $n$  — номер импульса из серии;  $N$  — число накоплений.

Если принять за  $\sigma_{ucx}$  стандартное отклонение шума, то стандартное отклонение шума при накоплении  $N$  отсчетов будет зависеть от числа накоплений [7]:

$$\sigma_{накопл} = \frac{\sigma_{ucx}}{\sqrt{N}}.$$

Анализируемые импульсы в виброакустическом сигнале состоят из полезного сигнала, представляющего собой собственные колебания трубы, и шума, создаваемого окружающей средой и транспортируемой жидкостью. Тогда отношение сигнал/шум (обозначим как  $SNR$ ) для исходного и накопленного сигналов:

$$SNR_{ucx} = \frac{A}{\sigma_{ucx}}; \quad SNR_{накопл} = \frac{A}{\sigma_{накопл}},$$

где  $A$  — полезная составляющая сигнала.

Таблица 1

Параметры модели макета трубопровода

Длина трубы, м	$L=5$	Число мод	$n=70$
Координата источника, м	$x_1=2,5$	Скорость штока генератора колебаний, м/с	$v=1,43$
Координата приемника, м	$x_2=0,53$	Частота дискретизации сигнала, Гц	44100
Толщина стенки трубы, м	$h=0,003$	Коэффициенты затухания	$z=0,0013, k=1,5$
Модуль Юнга для стали, Па	$E=200 \cdot 10^9$	Плотность стали, кг/м <sup>3</sup>	$\rho_0=7800$
Диаметр трубы, м	$d=0,038$	Диаметр штока, м	0,001

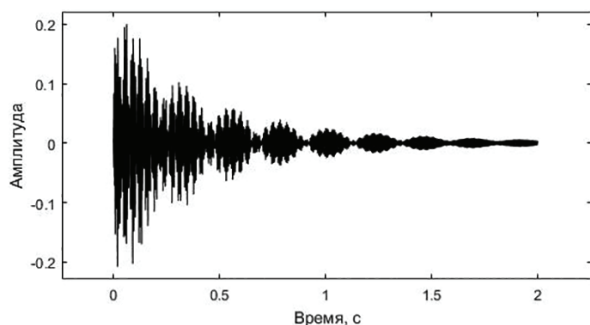


Рис. 2. Форма моделируемого сигнала при  $S(t)=0$

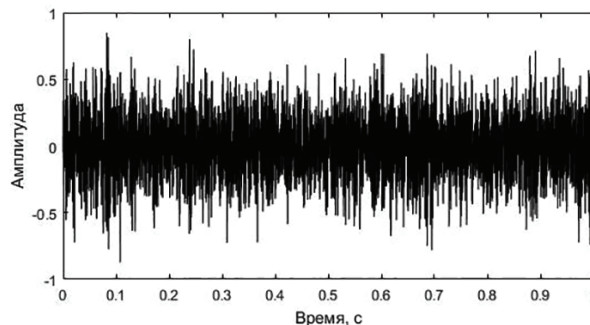


Рис. 3. Образец накладываемой помехи  $S(t)$

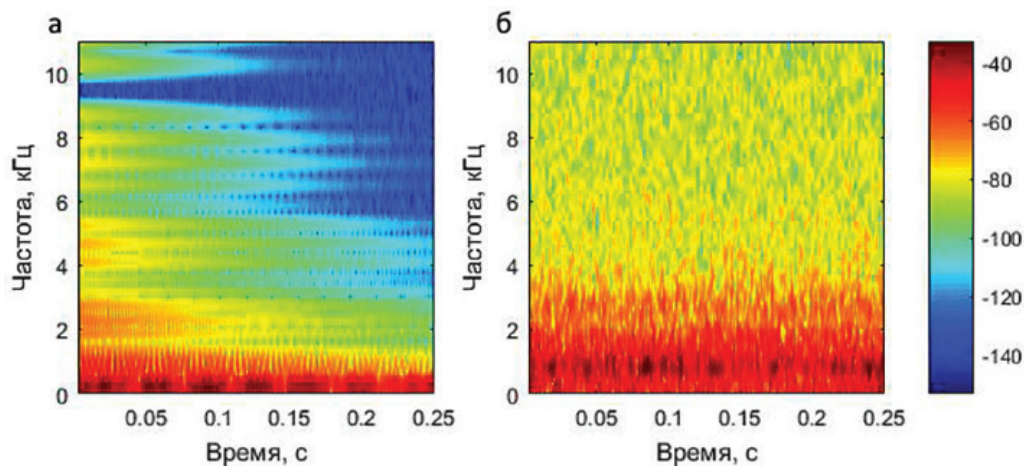


Рис. 4. Спектрограмма модели (а) и накладываемой помехи (б)

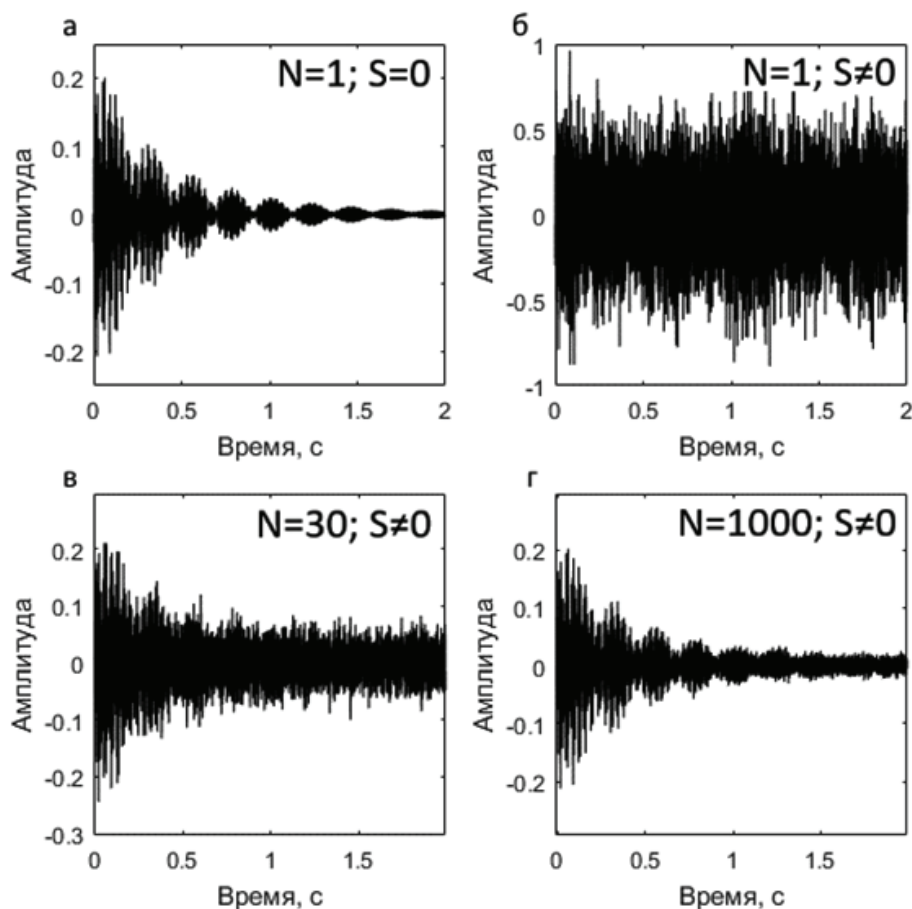


Рис. 5. Модель когерентного накопления сигнала:  
 а) без накопления, без помехи; б) без накопления, с помехой;  
 в) при накоплении 30 импульсов; г) при накоплении 1000 импульсов

Коэффициент повышения отношения сигнал/шум для получаемого сигнала будет равен:

$$\frac{SNR_{\text{накопл}}}{SNR_{\text{исх}}} = \frac{\sigma_{\text{исх}}}{\sigma_{\text{накопл}}} = \sqrt{N}.$$

Для оценки работоспособности метода в задаче повышения отношения сигнал/шум реализовано моделирование в среде Matlab процесса подачи импульсов упругих колебаний в трубу, используя модель на основе поперечных колебаний стержня [6, 8, 9]. Параметры модели приведены в табл. 1.

Для оценки результата накопления  $N$  импульсов к модели импульса (рис. 2) с экстремумом нормированной амплитуды 0,2 добавлена помеха  $S(t)$ , превышающая максимум сигнала по амплитуде в 4 раза (0,8), чтобы сигнал на фоне шума не фиксировался ни по амплитудно-временному представлению, ни по спектральному.

Образец накладываемой помехи  $S(t)$  изображен на рис. 3, он был получен на действующем трубопроводе с последующим умножением всех отсчетов шумового сигнала на константу для имитации интенсивного шумового фона.

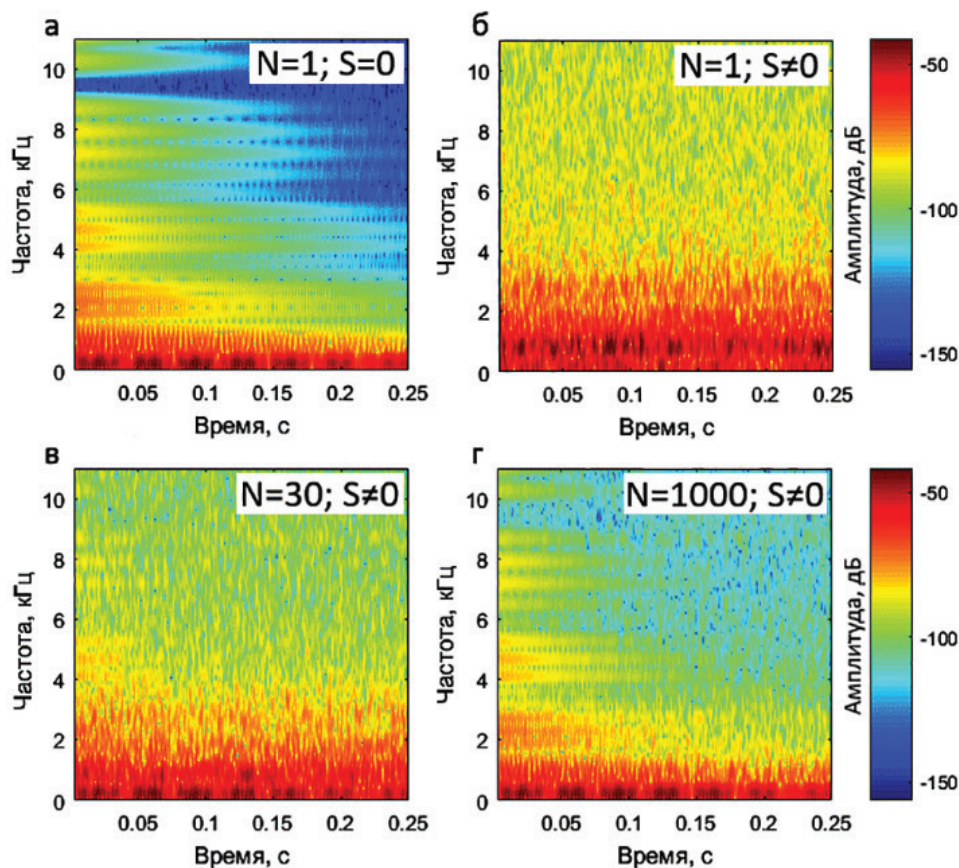


Рис. 6. Спектрограмма модели когерентного накопления сигнала:  
 а) без накопления, без помехи; б) без накопления, с помехой;  
 в) при накоплении 30 импульсов; г) при накоплении 1000 импульсов

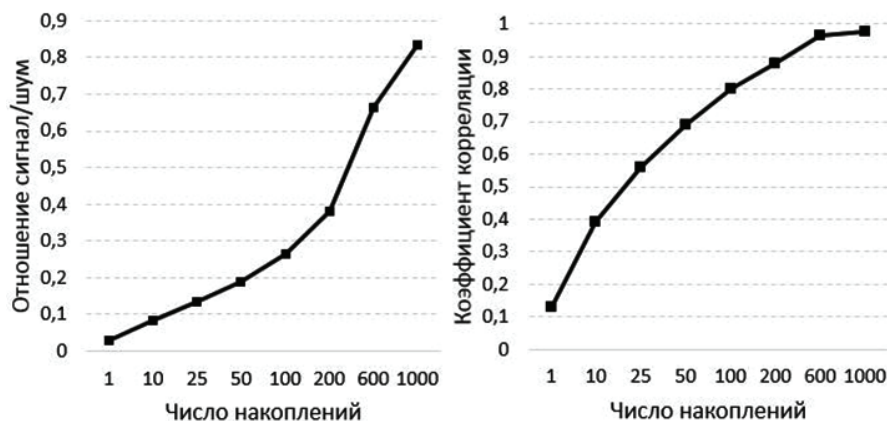


Рис. 7. SNR и R в зависимости от числа накоплений N

Алгоритм когерентного накопления позволяет повышать  $SNR$  в том случае, если отсчеты шума случайны [10]. Помеха, формируемая потоком жидкости и оборудованием, является гауссовским случайным процессом, так как для любого набора фиксированных моментов времени амплитуды сигнала подчиняются нормальному распределению.

Спектрограмма сигнала и помехи изображена на рис. 4.

Результат наложения помехи  $S(t)$ , а также сигнал при отсутствии накопления ( $N=1$ ), при  $N=30$  и  $N=1000$  изображен на рис. 5.

Отношение сигнал/шум при добавлении помехи к модели сигнала составило  $SNR_{исх} = 0,03$ . Ввиду низ-

кого значения данного параметра, сигналы на фоне помехи по рис. 5б и 6б не обнаруживаются, корреляция для сигналов без помехи и с помехой  $R = 0,13$ .

Значение  $SNR$  повышается с ростом числа накоплений. При накоплении 1000 изначально зашумленных импульсов отношение сигнал/шум повысилось более чем в 30 раз. По амплитудно-временному представлению на рис. 5г и по спектральному на рис. 6г сигнал стал обнаруживаться на фоне сниженной амплитуды помехи с коэффициентом корреляции для исходного незашумленного и накопленного сигнала, равным  $R = 0,98$ . Для других значений  $N$  отношение сигнал/шум и корреляция отражены на рис. 7.

Результаты моделирования работы алгоритма когерентного накопления сигнала

N	1	10	25	50	100	200	600	1000
R	0,130	0,390	0,560	0,690	0,800	0,880	0,962	0,978
P	0,0061							
$\sigma_{ш}$	0,224	0,072	0,0459	0,0326	0,0231	0,0161	0,0092	0,0073
$SNR_{накопл}$	0,0272	0,0847	0,1328	0,1871	0,2640	0,3788	0,6630	0,8356
$SNR_{накопл} / SNR_{исх}$	3,1111	4,8801	6,8711	9,6969	13,9130	24,3478	30,6849	—
$\sqrt{N}$	3,1622	5	7,0710	10	14,1421	24,4948	31,6227	—

Значение коэффициента повышения отношения сигнал/шум ( $SNR_{накопл}/SNR_{исх}$ ) согласуется с теоретическим и близко к зависимости от  $\sqrt{N}$  [10]. Со всеми результатами моделирования работы алгоритма когерентного накопления сигнала с использованием помехи, полученной на действующем трубопроводе, можно ознакомиться в табл. 2.

Результаты моделирования показали высокую эффективность алгоритма когерентного накопления сигнала с усреднением в задаче повышения отношения сигнал/шум при использовании помехи, полученной на действующем трубопроводе. Коэффициент повышения помехоустойчивости согласуется с теоретическим и дает основание для формирования выводов о перспективности внедрения когерентного накопления в разрабатываемых системах контроля состояния трубопроводов.

#### Библиографический список

1. Супрунчик В. В. Безопасность трубопроводного транспорта углеводородов // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2007. № 6. С. 51–54.
2. Копейкин С. А., Федотов А. А. Подход к нейтрализации угроз безопасности трубопроводного транспорта // Динамика систем, механизмов и машин: материалы IX Междунар. науч.-техн. конф., г. Омск. 2014. № 4. С. 231–234.
3. 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.
4. Пат. 2626853 Российская Федерация, МПК G01N 29/04. Способ обнаружения и классификации изменений параметров оболочки трубопровода и окружающей его среды / Нигрей Н. Н., Епифанцев Б. Н., Комаров В. А., Ищак Е. Р. № 2016135127; заявл. 29.08.2016; опубл. 28.07.2017, Бюл. № 22.
5. Рогожников Е. В., Великанова Е. П., Шибельгут А. А. [и др.]. Повышение дальности действия пассивных радиолокационных систем, использующих сигналы телекоммуникационных источников // Известия МГТУ. 2014. № 3 (21). С. 80–84.
6. Федотов А. А. Математическая модель упругих колебаний трубопровода при ударном воздействии / А. А. Федотов // Международный научно-технический журнал. 2017. № 5-3. С. 128–132.
7. Бабанов Н. Ю. О когерентном накоплении ответных сигналов от параметрических рассеивателей // Вестник ННГУ. 2011. № 6-1. С. 82–92.
8. 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.
9. 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.
10. Попов Дмитрий Иванович. Оптимизация цифровых систем обработки сигналов // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2017. № 1 (41). С. 96–105.

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

SPIN-код: 2511-2353

AuthorID (РИНЦ): 686080.

Адрес для переписки: fedotov1609@gmail.com

**АХМЕДЖАНОВ Равиль Абдрахманович**, кандидат технических наук, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Омского государственного университета путей сообщения.

AuthorID (РИНЦ): 533818

Адрес для переписки: ahmedjanov\_ra@gmail.com  
commailto:stepan.im@mail.ru

#### Для цитирования

Федотов А. А., Ахмеджанов Р. 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.

Статья поступила в редакцию 29.12.2017 г.

© А. А. Федотов, Р. А. Ахмеджанов