

## ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ СИСТЕМАМИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

В статье рассматриваются вопросы обнаружения дефектов на магистральных трубопроводах путем применения систем активного виброакустического контроля их состояния. Представлены описания и изложены принципы функционирования систем, базирующихся на использовании вероятностных методов распознавания технического состояния объекта. Приведены результаты численных экспериментов, получены зависимости оценок ошибок обнаружения дефектов от интенсивности акустической помехи. Показано, что применение систем активного виброакустического контроля позволяет эффективно обнаруживать дефект трубопровода (врезку, шурф) даже при малых значениях отношения сигнал/шум.

**Ключевые слова:** виброакустический сигнал, акустическая помеха, дефект трубопровода, врезка, момент распределения, идентификационный тестер, коэффициент корреляции, ошибка обнаружения.

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

**Введение.** На линейной части подземного магистрального продуктопровода главной операцией, подлежащей обнаружению, является формирование шурфа для доступа к стенке трубы. Его можно обнаружить с помощью виброакустической системы, основанной на возбуждении виброакустических сигналов в оболочке трубы с их последующим анализом на заданном удалении от места формирования акустических сигналов [1]. Каждый тестовый сигнал характеризуется малой порцией информации о состоянии участка исследуемого объекта, но совокупность таких сигналов позволяет выявить дефекты и оценить техническое состояние продуктопровода. При этом объект может быть отнесен к классу исправного или неисправного состояния с приемлемыми вероятностями ошибок 1-го (вероятность ложной тревоги) и 2-го (вероятность пропуска цели) рода [2].

Следует отметить, что виброакустические системы контроля подвержены влиянию внешних помех (вибрации грунтов) и (вследствие затухания сигнала на дальних дистанциях) нуждается в алгоритмах шумоподавления [2]. Имеющиеся оценки по дальности идентификации раскопок на трассе пролегания объекта контроля (включая утечки продукта) отдельным звеном «генератор—датчик» при использовании метода пропускания тестового сигнала по оболочке трубы колеблются в диапазоне от 800 до 1000 м. Экспертами установлено, что потребу-

ется около 0,5 млрд руб., чтобы охватить российские трубопроводы этим видом контроля. Однако, как отмечается, приведенная цифра в 25 раз ниже, чем оцениваемый экономический ущерб от потерь транспортируемого продукта [3].

Таким образом, решение задачи контроля состояния магистральных трубопроводов является важным и актуальным. В работе рассматриваются вопросы построения систем активного виброакустического контроля, приведено их описание и изложены принципы функционирования. Представлены результаты испытаний по обнаружению дефектов трубопроводов, выполненные с использованием трех предложенных систем контроля, а также вероятностных методов распознавания дефектов при диагностировании технического состояния объектов.

**Активная виброакустическая система диагностики состояния магистрального трубопровода на основе оценок линий регрессии моментов распределения.** Рассмотрим принцип работы первой системы контроля, являющейся предметом изобретения [4]. Виброакустические сигналы возбуждают в оболочке трубы воздействия на ее поверхность, следующие друг за другом через интервалы, превышающие интервал корреляции существующих виброакустических шумов  $\tau_k$ . Последовательность отсчетов  $\xi$  регистрируемых реакций на каждое воздействие на другом конце контролируемого

участка трубопровода суммируется с ранее получен-

ными аналогичными отсчетами  $N$  раз:  $\xi_N(\tau) = \sum_{k=1}^N \xi(\tau)$ .

Модуль результирующего сигнала нормируется

$\bar{\xi}_N(i) = \bar{\xi}_N(i) / \sum_{k=1}^{\tau_c} \bar{\xi}_N(k)$  и принимается за плотность

распределения временных интервалов отсчетов. По распределению вычисляют следующие моменты:

— взвешенное среднее

$$\bar{m} = \sum_{i=1}^{\tau_c} i \bar{\xi}_N(i) / \sum_{i=1}^{\tau_c} \bar{\xi}_N(i);$$

— взвешенное среднеквадратическое отклонение

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^{\tau_c} [(i - \bar{m})^2 \bar{\xi}_N(i)] / \sum_{i=1}^{\tau_c} \bar{\xi}_N(i)}.$$

После очередного воздействия на трубопровод определяются текущие значения  $\bar{m}$  и  $\bar{\sigma}$ . При достижении текущими значениями заданных пороговых значений  $\bar{m}_{zm}$  и  $\bar{\sigma}_{zm}$  с ошибками  $\varepsilon_{\bar{m}}$  и  $\varepsilon_{\bar{\sigma}}$  соответственно, принимают решение как о наличии, так и виде изменений в трубопроводной системе в текущий момент времени [4].

**Активная виброакустическая система диагностики состояния магистрального трубопровода на основе идентификационного  $S$ -тестера.** Вторая предлагаемая система контроля также является предметом изобретения [10] и основана на анализе случайных сигналов. В основе ее функционирования лежит использование  $S$ -тестера [6], оперирующего идентификационным параметром  $S$ , вычисляемым по функции сортированных по возрастанию амплитуд сигнала. При контроле объекта с помощью этого метода полученный сигнал можно отнести к определенному классу сигналов с использованием шкалы преобразования идентификационного параметра.  $S$ -тестер является идентификационным тестером, статическая характеристика которого описывается табл. 1.

Табл. 1 представляет шкалу, которая связывает порядковые индексы распределений с выходными числовыми параметрами  $S$  идентификационного тестера и качественными характеристиками распределений случайных сигналов. Имена распределений взяты из словаря имен случайных сигналов, принятых в области статистических измерений [5].

Алгоритм работы системы контроля состоит из следующих шагов:

1) отсортировать амплитуды принятого сигнала по возрастанию, получив функцию сортированных амплитуд  $F_{\xi}$ ;

2) вычислить идентификационный параметр  $S$  по формуле

$$S = \frac{F_{\xi}(\lfloor 0,8\tau_c + 0,5 \rfloor) - F_{\xi}(\lfloor 0,2\tau_c + 0,5 \rfloor)}{F_{\xi}(\lfloor 0,9\tau_c + 0,5 \rfloor) - F_{\xi}(\lfloor 0,1\tau_c + 0,5 \rfloor)} 100,$$

где  $F_{\xi}(n)$  —  $n$ -ое значение функции сортированных амплитуд;  $\tau_c$  — длительность сигнала в дискретных отсчетах;  $\lfloor x \rfloor$  — математический оператор определения наименьшего целого числа, ближайшего к  $x$ ;

3) остановить итерации накопления, когда показания идентификационного тестера достигнут заданного порогового уровня  $S_{zm}$  с заданной ошибкой  $\varepsilon_s$  [6].

**Активная виброакустическая система диагностики состояния магистрального трубопровода на основе корреляционного обнаружителя.**

Принцип работы третьей системы активного контроля обсуждался в [7]. Структурная схема системы приведена на рис. 1. Система состоит из следующих блоков: блока сравнения параметров контролируемого и эталонного объектов 1, блока адаптации системы фильтрации к изменениям формы информационных сигналов 2, блока принятия решений 3 и блока анализа структуры сопутствующих шумов 4.

Под воздействием генератора на эталонный и контролируемый объекты формируются отклики, разность которых на выходе блока вычитания, замаскированная шумом, поступает на блоки 2 и 3 для дальнейшего анализа и принятия решений.

В блоке 2 реализуется операция фильтрации случайного процесса. Сигнал со схемы вычитания заносится в накопитель. В накопителе реализуется операция суммирования реализаций сигнала. После проведения операции накопления полученная реализация случайного процесса коррелируется с возможными реализациями сигналов эталонных состояний трубопровода (дефект «шурф», дефект «врезка» и др.), записанных в базе эталонных сигналов. При превышении коэффициентом корреляции заданного порога сходства реализаций сигналов  $r$  с ошибкой  $\varepsilon_r$  формируется сигнал «Завершение автоподстройки обнаружителя» и блок 3 извещает (передает электрический импульс) блок 4 об окончании операции по оценке формы сигнала в шумовом процессе и приступает к формированию решения о состоянии объекта контроля. Анализатор по максимальному коэффициенту корреляции определяет форму присутствующего в регистрируемом

Таблица 1

Идентификационная характеристика  $S$ -тестера

Наименование параметра	Вид распределения амплитуд случайного сигнала								
	const	kosh	lapl	gaus	simp	trap	even	asin	2mod
Порядковый индекс	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$S$	0	1	15	32	51	63	75	92	100

Вид распределения: const — постоянный во времени сигнал, kosh — распределение Коши, lapl — двустороннее экспоненциальное, gaus — нормальное, simp — треугольное, trap — трапецидальное, even — равномерное, asin — арксинусное, 2mod — двумодальное

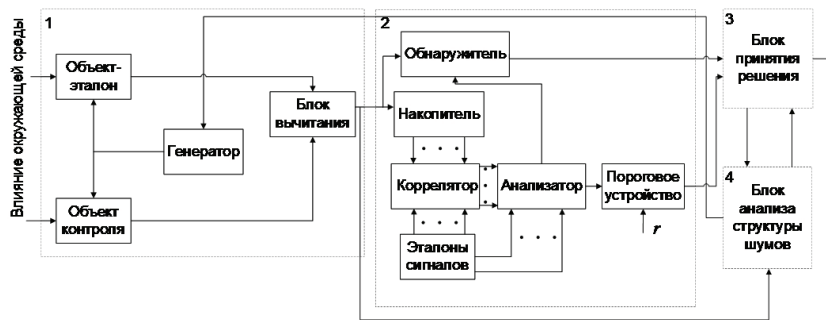


Рис. 1. Структурная схема системы активного контроля на основе корреляционного обнаружителя

процессе сигнала и переносит его в схему обнаружителя. Обнаружитель осуществляет операцию согласованной фильтрации (свёртки) периодического сигнала после блока вычитания с поступившей от анализатора реализацией сигнала наиболее вероятного состояния трубопровода.

Таким образом, предлагаются три системы активной виброакустической диагностики, предназначенные для определения текущего состояния трубопровода. Предложенные системы отличаются алгоритмами обработки виброакустических сигналов, а также количеством контролируемых участков трубопровода (в системе, рассматриваемой в [7], используется разность сигналов от двух участков трубопровода). Рассмотрим порядок проведения и результаты экспериментальных исследований, реализованных с целью получения оценок ошибок обнаружения дефектов на трубопроводе предложенными системами.

**Экспериментальное исследование.** С целью получения исходных данных был проведен натурный эксперимент на заглубленном трубопроводе [8], в результате которого были получены цифровые записи сигналов для различных состояний трубопровода (врезка, шурф). Полученные записи сигналов являлись основой для проведения модельного эксперимента. Целью модельного эксперимента являлось получение оценок средних, максимальных и минимальных ошибок обнаружения дефектов в программных моделях предлагаемых систем виброакустической диагностики. По полученным оценкам ошибок делался вывод об эффективности работы систем в различных условиях.

План модельного эксперимента состоял из нескольких этапов:

- 1) создание программных моделей систем виброакустической диагностики;
- 2) создание программных моделей шума и тестовых сигналов;
- 3) определение варьируемых факторов (тип системы, отношение сигнал/шум, форма сигнала);
- 4) для различных значений факторов в 30 опытах (210 накоплений сигнала с шумом в каждом) получение ошибок обнаружения сигнала (дефекта);
- 5) по результатам серии из 30 опытов вычисление оценок средних, минимальных и максимальных ошибок обнаружения сигнала (дефекта).

Для получения зависимостей ошибок обнаружения от количества накоплений сигнала использовались импульсы четырех видов:

- 1) с формой кривой нормального распределения

$$S_{gs}(t) = \begin{cases} \frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}} & \text{при } \tau_c \neq 0, \quad t \in [0, \tau_c]; \\ 0 & \text{при невыполнении условий,} \end{cases}$$

где  $A$  — коэффициент усиления амплитуды сигнала;  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение случайной величины с нормальным распределением;  $m$  — математическое ожидание случайной величины с нормальным распределением;  $\tau_c$  — длительность сигнала в дискретных отсчетах;

- 2) с формой кривой логнормального распределения

$$S_{lgn}(t) = \begin{cases} \frac{A}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(t)-m)^2}{2\sigma^2}} & \text{при } \tau_c \neq 0, \quad t \in [0, \tau_c]; \\ 0 & \text{при невыполнении условий,} \end{cases}$$

где  $A$  — коэффициент усиления амплитуды сигнала;  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение случайной величины с логнормальным распределением;  $m$  — математическое ожидание случайной величины с логнормальным распределением;  $\tau_c$  — длительность сигнала в дискретных отсчетах;

- 3) сигналы дефектов «врезка» и «шурф». Формы сигналов получены в результате натурального эксперимента на заглубленном трубопроводе [8]. При проведении эксперимента глубина залегания трубопровода была равна 30 см, расстояние между генератором и приемником сигнала составляло 25 м.

На основе полученных в результате натурального эксперимента исходных данных и программных моделей систем диагностики, реализованных на языке программирования C#, был проведен модельный эксперимент. В качестве помехи использовался программно сгенерированный шум с функцией автокорреляции вида  $R(n) = e^{-\alpha n} \cos \beta n$  [9] и параметрами: коэффициентом затухания автокорреляционной функции  $\alpha = 0,06$  и коэффициентом частоты периодической компоненты случайного процесса  $\beta = 0,1$ . Автокорреляционная функция с указанными параметрами характеризует случайный процесс, соответствующий шуму ветра.

На рис. 2 и 3 представлены графики зависимостей ошибок обнаружения имитации дефекта «врезка» от количества накоплений  $N$  при различном отношении сигнал/шум  $k_{SN}$ . На рис. 3 для наглядности отображено 60 накоплений. Получено, что при дальнейшем росте числа накоплений при использовании корреляционного обнаружителя ошибка  $\varepsilon$  не уменьшается. Во всех представленных случаях ошибка характеризуется колебательным снижением при росте числа накоплений сигнала. Как и предполагалось, повышение отношения сигнал/шум также снижает ошибку обнаружения.

По полученным оценкам сделан вывод о том, что, с точки зрения быстроты работы системы обнаружения при среднем отношении сигнал/шум, для обнаружения дефекта целесообразно исполь-

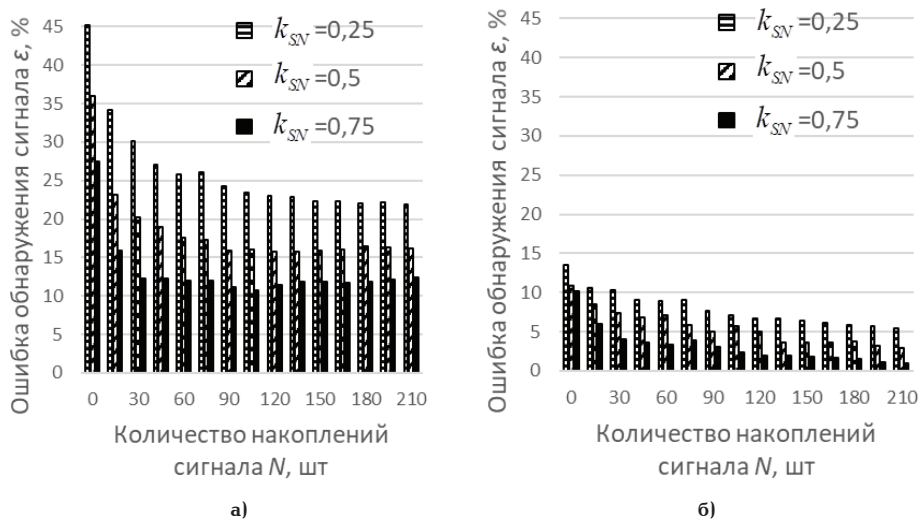


Рис. 2. Зависимость ошибки обнаружения  $\varepsilon$  от количества накоплений  $N$  сигнала имитации дефекта (врезки) для системы на основе оценок линий регрессии моментов распределения при оценках:

а) взвешенного среднего  $\bar{m}$ ; б) взвешенного среднеквадратического отклонения  $\bar{\sigma}$

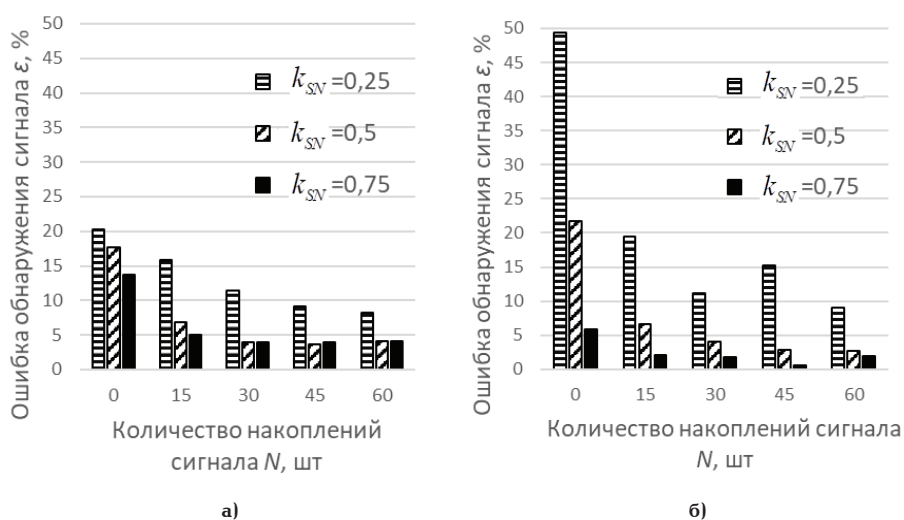


Рис. 3. Зависимость ошибки обнаружения  $\varepsilon$  от количества накоплений  $N$  сигнала имитации дефекта (врезки) при использовании:

а)  $S$ -тестера; б) корреляционного обнаружителя

зовать корреляционный обнаружитель. При его использовании низкая ошибка обнаружения  $\varepsilon = 0,02$  достигается уже при 15-ти накоплениях сигнала. Лучшие показатели при низком отношении сигнал/шум (т.е. при сильном зашумлении полезного сигнала) получены при использовании системы на основе  $S$ -тестера и системы на основе оценки взвешенного среднеквадратического отклонения. Максимальная ошибка при работе таких систем не превышает  $\varepsilon = 0,2$ .

Результаты экспериментального исследования представлены в табл. 2–5. Приведены средние, минимальные и максимальные ошибки обнаружения тестовых импульсов. При анализе результатов, приведенных в табл. 2, сделан вывод о том, что при оценке среднего взвешенного  $\bar{m}$  приемлемые вероятности ошибок  $\varepsilon \leq 0,05$  могут быть достигнуты только для импульса с формой кривой нормального распределения при любом отношении сигнал/шум.

Как видно из табл. 3, оценка параметра взвешенного среднеквадратического отклонения  $\bar{\sigma}$

подходит для обнаружения всех типов импульсов, за исключением логнормального, при отношении сигнал/шум  $k_{SV} \geq 0,5$  (т.е. при малом зашумлении полезного сигнала).

Как видно, при использовании  $S$ -тестера (табл. 4) и корреляционного обнаружителя (табл. 5) можно получить приемлемые минимальные ошибки обнаружения  $\varepsilon^{\min} \leq 0,05$  при среднем отношении сигнал/шум для всех типов тестовых импульсов (за исключением логнормального). Кроме того, получено, что при низком отношении сигнал/шум  $k_{SV} \leq 0,25$   $S$ -тестер показывает лучшие показатели ошибок обнаружения.

На рис. 4 показаны зависимости средних ошибок обнаружения от отношения сигнал/шум. По графикам видно, что наиболее трудным для обнаружения сигналом является импульс в форме логнормального распределения при любом отношении сигнал/шум.

Таким образом, обобщая информацию, представленную в табл. 2–5 и на рис. 4, можно сделать

Таблица 2

Ошибки обнаружения тестовых сигналов с использованием оценки момента распределения  $\bar{\mu}$ 

Форма тестового сигнала	Ошибка обнаружения сигнала $\varepsilon, \%$											
	$\bar{\varepsilon}_{\bar{\mu}}$				$\varepsilon_{\bar{\mu}}^{\max}$				$\varepsilon_{\bar{\mu}}^{\min}$			
	$k_{SN} = 0,25$	$k_{SN} = 0,5$	$k_{SN} = 0,75$	$k_{SN} = 0,25$	$k_{SN} = 0,5$	$k_{SN} = 0,75$	$k_{SN} = 0,25$	$k_{SN} = 0,5$	$k_{SN} = 0,75$	$k_{SN} = 0,25$	$k_{SN} = 0,5$	$k_{SN} = 0,75$
Импульс $S_{\text{ip}}(t)$	4,7	2,8	2,3	11,1	10,6	8,9	2,9	1,5	1,3			
Импульс $S_{\text{ip}}(t)$	64,5	33,9	21,7	179,5	150,7	127,1	32,1	13,2	7,1			
Имитация дефекта «врезка»	26,1	18,4	13,1	45,1	35,9	27,4	21,8	15,7	10,6			
Имитация дефекта «шурф и врезка»	26,7	17,9	13,3	47,1	37,4	28,5	21,3	15	11,1			

$\bar{\varepsilon}_{\bar{\mu}}$  — средняя ошибка обнаружения сигнала (дефекта) при оценке взвешенного среднего;  $\varepsilon_{\bar{\mu}}^{\max}$  — максимальная ошибка обнаружения сигнала (дефекта) при оценке взвешенного среднего;  $\varepsilon_{\bar{\mu}}^{\min}$  — минимальная ошибка обнаружения сигнала (дефекта) при оценке взвешенного среднего;  $k_{SN}$  — отношение сигнал/шум

Таблица 3

Ошибки обнаружения тестовых сигналов с использованием оценки момента распределения  $\bar{\sigma}$ 

Форма тестового сигнала	Ошибка обнаружения сигнала $\varepsilon, \%$											
	$\bar{\varepsilon}_{\bar{\sigma}}$				$\varepsilon_{\bar{\sigma}}^{\max}$				$\varepsilon_{\bar{\sigma}}^{\min}$			
	$k_{SN} = 0,25$	$k_{SN} = 0,5$	$k_{SN} = 0,75$	$k_{SN} = 0,25$	$k_{SN} = 0,5$	$k_{SN} = 0,75$	$k_{SN} = 0,25$	$k_{SN} = 0,5$	$k_{SN} = 0,75$	$k_{SN} = 0,25$	$k_{SN} = 0,5$	$k_{SN} = 0,75$
Импульс $S_{\text{ip}}(t)$	14,1	7,6	5,9	49,6	40,2	28,3	6,6	3,68	3,1			
Импульс $S_{\text{ip}}(t)$	54,9	34,7	21,7	82,5	71,1	55,8	38,4	19,9	10,9			
Имитация дефекта «врезка»	7,9	5,5	3,1	13,5	10,9	10,1	5,3	2,8	0,9			
Имитация дефекта «шурф и врезка»	11,3	8,2	6,2	16,1	14,7	13,9	8,6	5,9	3,7			

$\bar{\varepsilon}_{\bar{\sigma}}$  — средняя ошибка обнаружения сигнала (дефекта) при оценке взвешенного среднеквадратического отклонения;  $\varepsilon_{\bar{\sigma}}^{\max}$  — максимальная ошибка обнаружения сигнала (дефекта) при оценке взвешенного среднеквадратического отклонения;  $\varepsilon_{\bar{\sigma}}^{\min}$  — минимальная ошибка обнаружения сигнала (дефекта) при оценке взвешенного среднеквадратического отклонения

Таблица 4

## Ошибки обнаружения тестовых сигналов при использовании S-тестера

Форма тестового сигнала	Ошибка обнаружения сигнала $\varepsilon$ , %											
	$\bar{\varepsilon}_S$					$\varepsilon_S^{\max}$					$\varepsilon_S^{\min}$	
	$k_{SN} = 0,25$	$k_{SN} = 0,5$	$k_{SN} = 0,75$	$k_{SN} = 0,25$	$k_{SN} = 0,5$	$k_{SN} = 0,75$	$k_{SN} = 0,25$	$k_{SN} = 0,5$	$k_{SN} = 0,75$	$k_{SN} = 0,25$	$k_{SN} = 0,5$	$k_{SN} = 0,75$
Импульс $S_{\text{гпс}}(t)$	9,1	5,3	4,1	22,2	20,2	16,6	5,1	2,84			2,1	
Импульс $S_{\text{гпс}}(t)$	22,5	14,1	10,9	43,8	42,3	41,4	14,2	8,66			3,5	
Имитация дефекта «врезка»	8,2	5,3	5,3	20,2	17,6	13,7	5,28	3,1			3,5	
Имитация дефекта «шурф и врезка»	8,3	5,5	4,1	18,6	16,8	11,4	5	3,9			2,4	

$\bar{\varepsilon}_S$  — средняя ошибка обнаружения сигнала (дефекта) при оценке параметра  $S$ ;  $\varepsilon_S^{\max}$  — максимальная ошибка обнаружения сигнала (дефекта) при оценке параметра  $S$ ;  $\varepsilon_S^{\min}$  — минимальная ошибка обнаружения сигнала (дефекта) при оценке параметра  $S$

Таблица 5

## Ошибки обнаружения тестовых сигналов при использовании корреляционного обнаружителя с согласованной фильтрацией

Форма тестового сигнала	Ошибка обнаружения сигнала $\varepsilon$ , %											
	$\bar{\varepsilon}_r$					$\varepsilon_r^{\max}$					$\varepsilon_r^{\min}$	
	$k_{SN} = 0,25$	$k_{SN} = 0,5$	$k_{SN} = 0,75$	$k_{SN} = 0,25$	$k_{SN} = 0,5$	$k_{SN} = 0,75$	$k_{SN} = 0,25$	$k_{SN} = 0,5$	$k_{SN} = 0,75$	$k_{SN} = 0,25$	$k_{SN} = 0,5$	$k_{SN} = 0,75$
Импульс $S_{\text{гпс}}(t)$	25	11,9	7,2	72,5	51,7	34,1	5,8	0,3			0,01	
Импульс $S_{\text{гпс}}(t)$	24,7	11,4	7,2	69,5	46,8	33,3	5,8	0,6			0,05	
Имитация дефекта «врезка»	20,8	7,5	2,4	49,3	21,7	5,8	9	2,7			0,5	
Имитация дефекта «шурф и врезка»	23,8	7,1	5,2	59,4	20,5	15,1	5,6	3,2			2,5	

$\bar{\varepsilon}_r$  — средняя ошибка обнаружения сигнала (дефекта) при оценке коэффициента корреляции;  $\varepsilon_r^{\max}$  — максимальная ошибка обнаружения сигнала (дефекта) при оценке коэффициента корреляции;  $\varepsilon_r^{\min}$  — минимальная ошибка обнаружения сигнала (дефекта) при оценке коэффициента корреляции

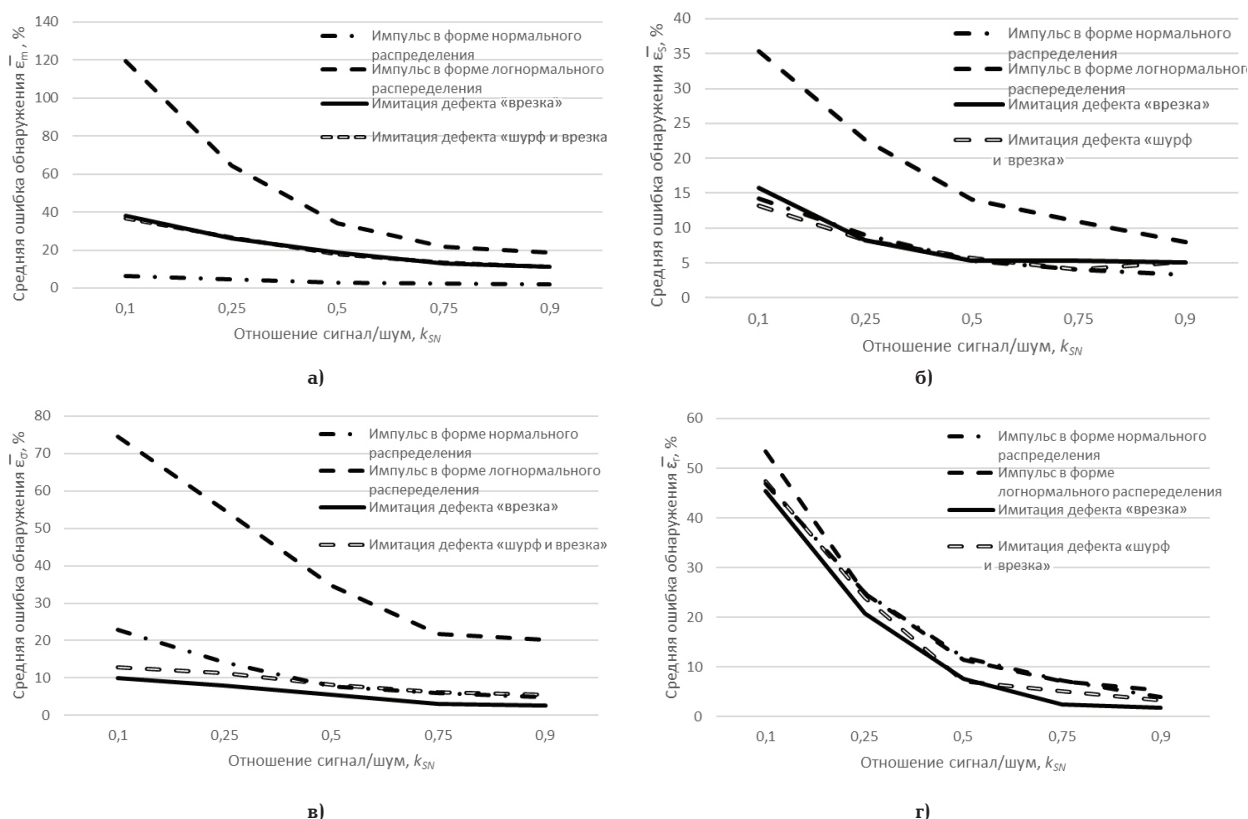


Рис. 4. Зависимости средних ошибок обнаружения тестовых импульсов от отношения сигнал/шум  $k_{SN}$  при использовании для обнаружения: а) взвешенного среднего  $\bar{m}$ ; б)  $S$ -тестера; в) взвешенного среднеквадратического отклонения  $\bar{\sigma}$ ; г) корреляционного обнаружителя

вывод о приоритетности использования  $S$ -тестера как наиболее универсального средства по обнаружению сигналов дефекта с наименьшей средней и приемлемой минимальной ошибками. При этом ошибки обнаружения реальных дефектов низки и лежат в диапазонах  $0,024 \leq \varepsilon_s^{\min} \leq 0,058$  и  $0,041 \leq \bar{\varepsilon}_s \leq 0,082$ .

**Заключение.** В результате проведенного исследования показана эффективность предложенных авторами систем активного виброакустического контроля по обнаружению тестовых и реальных сигналов. Предлагаемые системы виброакустического контроля позволяют эффективно проводить диагностику состояния трубопровода при малых временных затратах и с низкой ошибкой обнаружения полезного сигнала.

#### Библиографический список

1. Epiphantsev B. N. An acoustic method for diagnostics of the state of underground pipelines: new possibilities // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. Vol. 50, Issue 5. P. 254–257. DOI: 10.1134/S1061830914050039.
2. 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.
3. Краткий обзор о прорывах нефтепроводов и объемах разливов нефти в России. URL: [https://www.greenpeace.org/russia/Global/russia/report/Arctic-oil/Report\\_Russia\\_Spills\\_Oil.pdf](https://www.greenpeace.org/russia/Global/russia/report/Arctic-oil/Report_Russia_Spills_Oil.pdf) (дата обращения: 15.05.2018).
4. Пат. 2626583 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/04. Способ обнаружения и классификации изменений параметров оболочки трубопровода и окружающей его среды /

Епифанцев Б. Н., Комаров В. А., Нигрей Н. Н., Ищак Е. Р. № 2016135127; заявл. 29.08.16; опубл. 28.07.17, Бюл. № 22.

5. Дождиков В. Г., Лифанов Ю. С., Салтан М. И. Энциклопедический словарь по радиоэлектронике, оптоэлектронике и гидроакустике. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 2008. 611 с. ISBN 978-5-98420-026-4.

6. Кликушин Ю. Н., Комаров В. А., Федотов А. А., Шилер А. В. Модель виртуального фильтра // Омский научный вестник. 2018. № 5 (161). С. 139–142. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-161-139-142.

7. Епифанцев Б. Н., Комаров В. А. Об адаптации системы активного контроля к изменениям формы обнаруживаемых сигналов // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. № 4. С. 256–261.

8. Ахмеджанов Р. А., Федотов А. А., Комаров В. А., Кабанов С. В. Идентификация несанкционированных воздействий на трубопровод // Энергосбережение и водоподготовка. 2018. № 6 (116). С. 60–65.

9. Denisova L. A., Meshcheryakov V. A. Control systems design: the technology of stochastic perturbations simulation // Journal of Physics Conference Series. 2018. P. 012020. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012020.

10. Пат. 2687177 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/44 (2006.01). Способ обнаружения и классификации сигнала в системах контроля / Комаров В. А., Кликушин Ю. Н., Федотов А. А., Шилер А. В. № 2018126439; заявл. 17.07.18; опубл. 07.05.19, Бюл. № 13.

**КОМАРОВ Владимир Александрович**, аспирант кафедры «Автоматика и системы управления» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС).

SPIN-код: 1601-7297

ORCID: 0000-0003-1933-0045

ResearcherID: P-1903-2017

Адрес для переписки: reallkom@gmail.com

**ФЕДОТОВ Александр Анатольевич**, кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ОмГУПС.

SPIN-код: 2511-2353

Адрес для переписки: fedotov1609@gmail.com

**ДЕНИСОВА Людмила Альбертовна**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления» Омского государственного технического университета.

SPIN-код: 4926-3449

AuthorID (SCOPUS): 41460943300

ORCID: 0000-0001-7197-5460

ResearcherID: P-7286-2016.

Адрес для переписки: denisova@asoiu.com

#### Для цитирования

Комаров В. А., Федотов А. А., Денисова Л. А. Обнаружение дефектов магистральных трубопроводов системами виброакустического контроля // Омский научный вестник. 2019. № 4 (166). С. 89–96. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-166-89-96.

Статья поступила в редакцию 18.06.2019 г.

© В. А. Комаров, А. А. Федотов, Л. А. Денисова