

Алгоритм обнаружения несанкционированных воздействий на трубопровод

ФЕДОТОВ А. А.; fedotov1609@gmail.com

АХМЕДЖАНОВ Р. А.; ahmedjanov.ra@gmail.com

КОМАРОВ В. А., Омский государственный университет путей сообщения; reallkom@gmail.com

КОПЕЙКИН А. С., АО «Омское производственное объединение “Иртыш”» stepan.im@mail.ru



А. А. Федотов



Р. А. Ахмед-
жанов



В. А. Комаров



А. С. Копейкин

Несанкционированные подключения к нефтепроводам приводят к существенным экономическим и экологическим потерям. Предложено множество способов автоматизированного обнаружения хищений нефтепродуктов, тем не менее совершенствование систем и способов идентификации вида воздействия по-прежнему остаётся актуальной задачей. Приведён алгоритм определения вида несанкционированного вмешательства в трубопровод посредством периодического зондирования трубопровода упругими колебаниями, передаваемыми на его поверхность, с программной обработкой принимаемых сигналов. Получены результаты эксперимента по имитации воздействий и значения показателей, отражающих идентификационный потенциал представленного решения.

Ключевые слова: упругие колебания, поперечные колебания трубопровода, ударное воздействие, идентификация нарушения, обнаружение врезки в трубопровод.

По данным ПАО «Транснефть», на трубопроводах компании факты хищения нефти и нефтепродуктов составляют до 70 % всех противоправных действий. Несанкционированные подключения представляют угрозу для экологии, существуют определённые трудности при их обнаружении и ликвидации [1].

Разработано более десятка способов обнаружения и предотвращения несанкционированной деятельности на таких объектах [2], однако они не нашли повсеместного применения. Так, оптоволоконные системы [3, 4] позволяют выявлять и идентифицировать опасную активность в зоне пролегания трубопровода и обнаруживать утечки посредством выделения характерных для несанкционированной деятельности признаков. Применение разработок данного типа на действующих трубопроводах свидетельствует об их преимуществах перед остальными системами.

Вместе с тем, в оптоволоконных системах предлагается принимать решение о появлении нарушения по температурным изменениям и акустическим колебаниям [3]. Однако в зашумлённой среде эффективность подобных систем

может быть неудовлетворительной, а повреждение оптоволоконного кабеля может привести к невозможности контроля весьма протяжённого участка объекта [5].

В патентах [6, 7] представлены варианты активного виброакустического [8] способа обнаружения несанкционированного воздействия посредством зондирования трубопровода упругими колебаниями и когерентного накопления сигнала на его удалённом конце [9].

Цель данной работы — развитие активного виброакустического способа обнаружения несанкционированных воздействий и представление результатов модификации алгоритма и верификации функционирования программно-аппаратного комплекса AP99-1000 на действующем трубопроводе.

В основе способа лежит обработка амплитудно-частотных спектров с выделением информативных диапазонов [10], которые используются для реализации алгоритма распознавания. Схема участка трубопровода, на котором проводились экспериментальные исследования, приведена на рис. 1.

Вибропреобразователи 1 и 2 чувствительностью 1 В/г (Вольт на ускорение свободного падения) в связке с аналого-цифровым преобразователем АКМ АК5385 осуществляли синхронную запись в память компьютера колебаний заглублённого в грунт водопровода, на поверхность которого оказывали ударное воздействие с помощью соленоида 3 с частотой колебаний 1 Гц под управ-

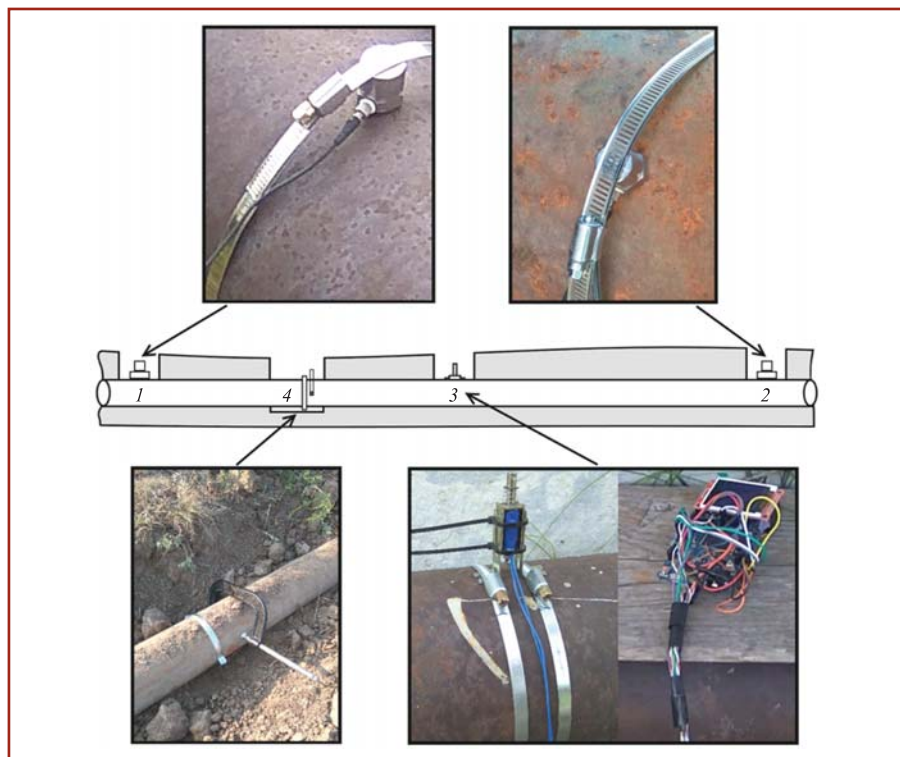


Рис. 1. Схема участка трубопровода:

1, 2 — вибропреобразователи; 3 — генератор импульсов; 4 — шурф и имитатор врезки

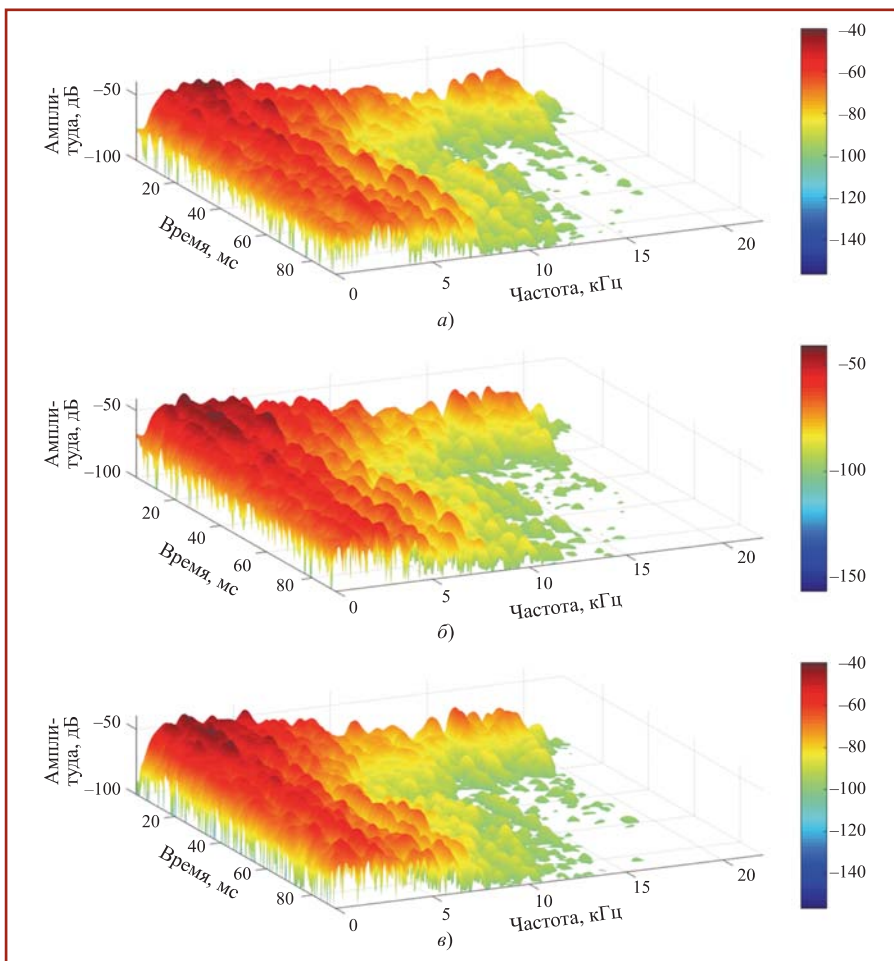


Рис. 2. Спектрограмма импульсов при разных состояниях трубопровода: а — штатное; б — шурф; в — шурф с имитатором врезки

лением микроконтроллера на базе процессора SAM3X8E ARM Cortex-M3.

Расстояние между чувствительными элементами сокращено до 20 м для упрощения проведения испытаний. В результате получены серии импульсов при различных воздействиях на трубопровод, представляющих возможные действия злоумышленника. Имитировались состояния «норма», «шурф», «шурф с имитатором врезки». Для создания

шурфа и имитатора врезки использовали металлический хомут на поверхности трубы (рис. 1, поз. 4).

Спектрограммы сигналов, построенные в среде MatLab для одного из приёмников, изображены на рис. 2.

Так как воздействие осуществлялось точно на одном из двух равных отрезков трубопровода, полученный разностный сигнал от равноудалённых приёмников позволил выделить полезную

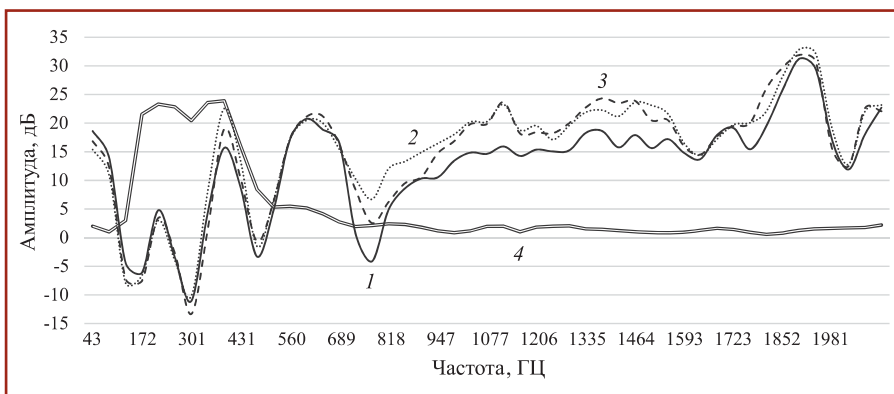


Рис. 3. Амплитудный спектр разности сигналов от двух приёмников: 1 — разность «Норма»; 2 — разность «Норма» и «Шурф»; 3 — разность «Норма» и «Шурф с имитатором врезки»; 4 — разность доверительных границ, $P = 0,95$

информацию о характере влияния имитатора. На рис. 3 представлены спектры, позволяющие зафиксировать различие сигналов в диапазоне частот от 732 до 1852 Гц.

Для каждого состояния трубопровода получено по 100 импульсов. Условия проведения эксперимента позволили сохранить записи с незначительной зашумлённостью, поэтому данное количество следует считать достаточным для получения необходимой статистической информации. Число накапливаемых импульсов, как рекомендовано в [11], равнялось 10. Разность между значениями верхних и нижних доверительных границ с доверительной вероятностью $P = 0,95$ при использовании t -распределения Стьюдента для каждой частоты приведена на рис. 3. Накопление 10 импульсов позволило использовать информативные диапазоны частот для повышения эффективности распознавания, что будет показано далее. Низкочастотный диапазон до 400 Гц не следует считать информативным, так как ширина доверительных границ прироста для сигналов с введением имитаторов воздействий в данной области на некоторых частотах превышает 20 дБ.

Файлы с записанными импульсами загружали в разработанное на языке программирования C# программное обеспечение, которое идентифицирует вид воздействия и функционирует в реальном времени синхронно с микроконтроллером, а также в режиме с нагрузкой имеющихся записей на накопителе.

Реализованный алгоритм идентификации заключается в следующем (рис. 4). В микроконтроллере задаётся число накоплений импульсов N , число распознаваемых состояний трубопровода n и объём обучающей выборки k , затем он переводится в режим приёма и накопления импульсов от генератора упругих колебаний. Накопленный импульс от одного вибропреобразователя, либо разность двух сигналов поступают на последовательный порт компьютера, контролируемый программным обеспечением, либо из загруженного файла формата WAVE. Программа сохраняет полученный импульс в буфере $Sig [Amp]$ и реализует проверку условия завершения построения обучающих выборок. Если оно не выполняется, используется быстрое преобразование Фурье с окном b и копирование спектра в двумерный массив $An [k, b]$, и цикл повторяется. Процесс обучения заканчивается после обработки всей обучающей выборки, т. е. при $i = k$.

При удовлетворении этого условия для каждой частоты амплитудного спектра рассчитывается значение математического ожидания M_n , среднеквадратического отклонения σ_n , верхней

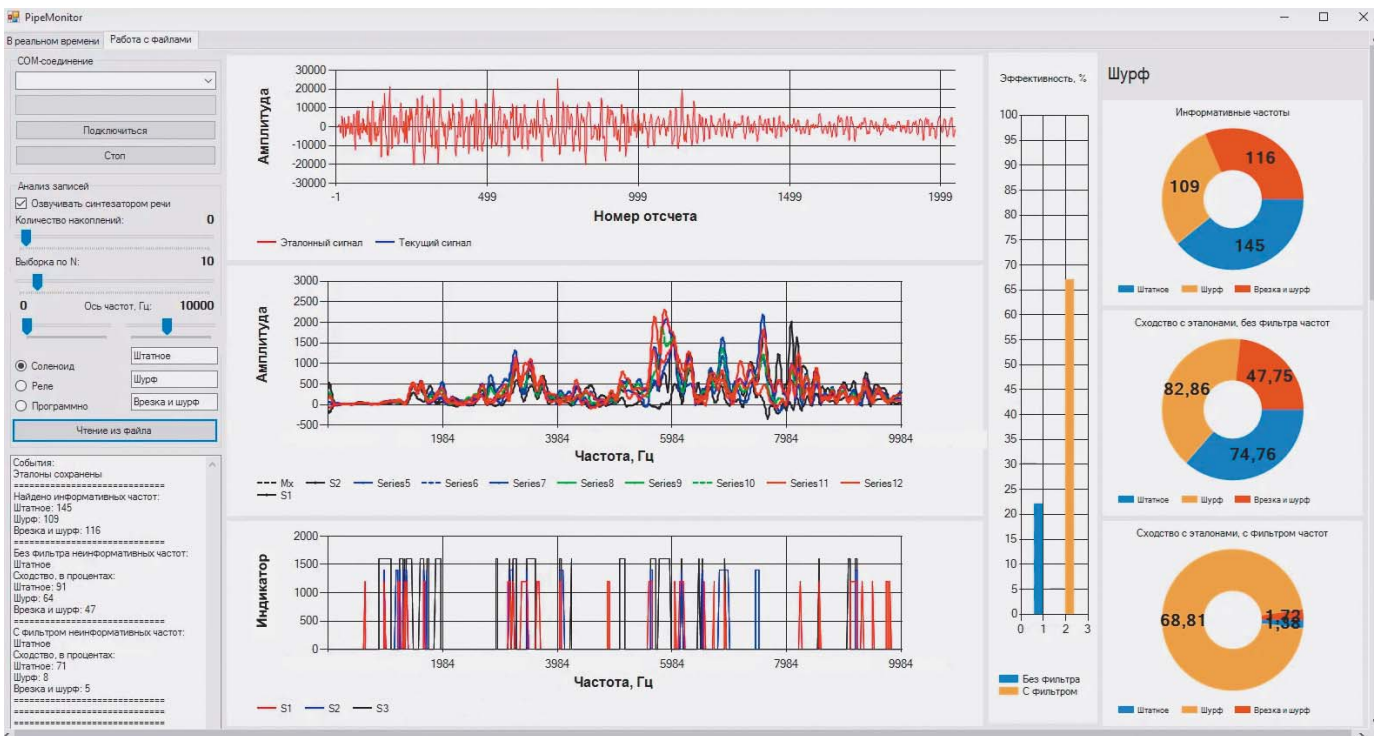


Рис. 5. Работа программы идентификации

Показатель $Sum[n]$ отражает степень соответствия текущего состояния имитаторам без учёта информативных частот, $Sum_inf[n]$ — с учётом последних. Из данных массивов выбираются максимальные значения, соответствующие состоянию, принимаемому в итоге как результат идентификации.

Работу программы иллюстрирует рис. 5. Принятое системой решение о виде воздействия, распределение информативных частот для каждого состояния и процент сходства текущего состояния с имеющимися в базе имитаторами озвучиваются синтезатором речи на русском языке. Также в окне программы строятся графики накопленного импульса, доверительные интервалы амплитудного спектра и диаграмма информативности частот.

Реализован расчёт эффективности идентификации на основе соотношений, в процентах:

$$Eff = \frac{State[n_1] - |State[n_2] + State[n_3]|}{2}$$

$$Eff_inf = \frac{State_inf[n_1] - |State_inf[n_2] + State_inf[n_3]|}{2}$$

где Eff — эффективность идентификации с использованием всех частот; Eff_inf — эффективность идентификации с использованием только информативных частот; $State[n_1]$ — интегральный показатель для идентифицированного состояния; $State[n_2]$, $State[n_3]$ — для остальных.

Таким образом, чем ближе показатели Eff и Eff_inf к значению 100, тем выше у системы потенциал корректной идентификации вида воздействия. Результаты идентификации отражены на рис. 6 и в таблице.

Состояние «Штатное-2» получено восстановлением исходных свойств трубопровода и окружающего его грунта обратной последовательностью действий: снятие хомута с заполнением шурфа грунтом. Полученные записи пред-

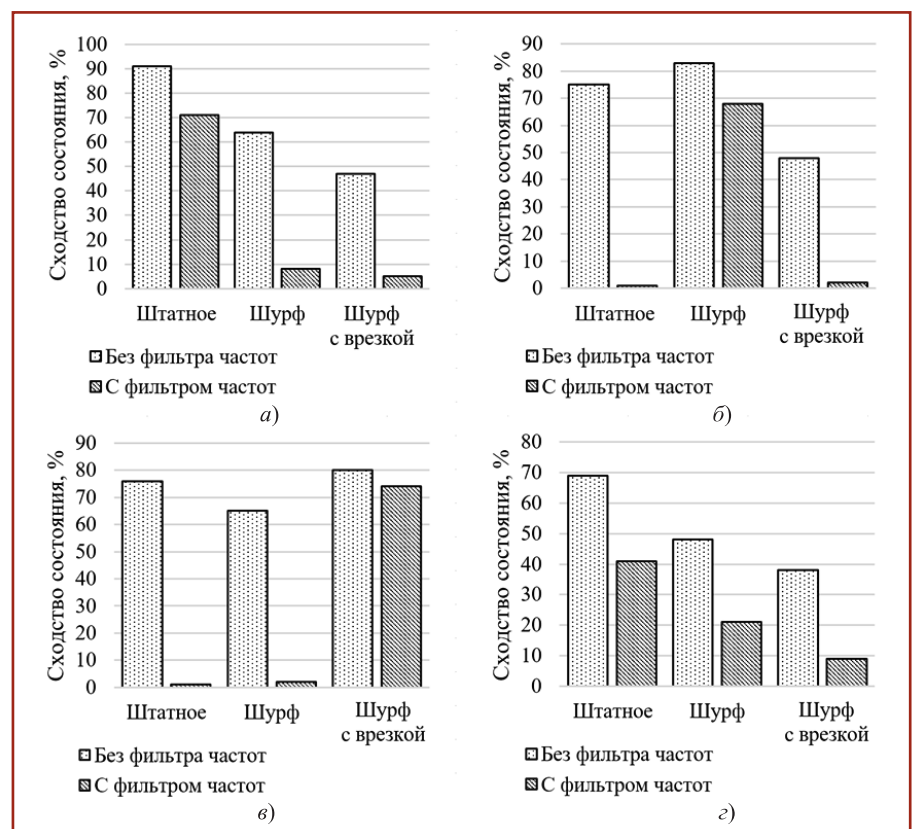


Рис. 6. Соответствие эмпирического сигнала имитаторам:

а — штатное; б — с шурфом; в — с шурфом и врезкой; г — восстановленное штатное

Исследуемое состояние	Соответствие состояниям	Итоговые коэффициенты соответствия			Эффективность идентификации	
		S_n	$State [n]$	$State_inf [n]$	Eff	Eff_inf
Штатное	Штатное	145	91	71	—	—
	Шурф	109	64	8	30	89
	Шурф с врезкой	116	47	5	48	93
Шурф	Штатное	145	75	1	10	99
	Шурф	109	83	68	—	—
	Шурф с врезкой	116	48	2	42	97
Шурф с врезкой	Штатное	145	76	1	5	99
	Шурф	109	65	2	19	97
	Шурф с врезкой	116	80	74	—	—
Штатное-2	Штатное	145	69	41	—	—
	Шурф	109	48	21	30	48
	Шурф с врезкой	116	38	9	45	78

ставляют интерес, так как работа системы идентификации с их использованием отражает её устойчивость при изменении характеристик среды с неполным соответствием имитаторам. Повторные операции по восстановлению исходных свойств трубопровода не позволяют воспроизвести его в точности, так как частицы грунта при каждом вмешательстве перераспределяются непредсказуемым образом.

Оценка эффективности алгоритма осуществлялась сравнением значений по таблице. В колонке S_n представлено число информативных частот в зависимости от состояния трубопровода, полученное по обучающим выборкам. Максимальное значение $State [n]$ во всех четырёх экспериментах позволило корректно идентифицировать все четыре состояния. Значения в первой колонке таблицы совпали с идентифицируемыми воздействиями во второй, соответствующими максимальным значениям $State [n]$.

Показатель $State_inf [n]$ аналогичным образом указывает на успешную идентификацию во всех случаях, но распределение его значений в зависимости от вида имитатора имеет отличия от $State [n]$. Разница между максимальным значением $State [n]$ и остальными при штатном состоянии для «шурф» и «шурф с врезкой» равна 30 и 48 соответственно. Значения $State_inf [n]$ составили 89 и 93, что указывает на существенное повышение эффективности идентификации (прирост на 59 и 45 %). Повышение разницы между значениями критериев наличия и отсутствия нарушения означает снижение ошибки первого и второго рода.

Если применить к оценке вероятностей ошибок распознавания критерий Котельникова [12], то данный эффект будет выражен в виде уменьшения площади пересечения плотностей распределения вероятностей значений установленного признака нарушения при их расположении на одной оси.

При действительном состоянии трубопровода «штатное-2» эффективность распознавания снизилась, но оно было идентифицировано верно. Прирост показателя сохранился и составил 18 и 33 % при использовании информативных частот.

Для получения значений ошибок первого и второго рода необходимо проведение большего числа испытаний с последующим построением плотностей распределения вероятностей значений признаков. Однако корректная идентификация даже при изменившихся условиях (обратное заполнение шурфа грунтом) указывает на потенциально высокую эффективность применения данного алгоритма совместно с оборудованием, обеспечивающим непрерывное зондирование трубопровода упругими колебаниями.

При неизменённых параметрах среды, когда сигнал стационарен, показатель $State_inf [n]$ при корректной идентификации превысил своё значение относительно отклонённого системой воздействия в 8,9 раза, что указывает на высокий идентификационный потенциал предложенного способа контроля трубопровода.

Выводы

В результате проведённых исследований на действующем трубопроводе экспериментально доказана состоятельность предложенной модификации виброакустического способа идентификации несанкционированных воздействий. Перспективным представляется применение данного алгоритма также на объектах, отличающихся по конфигурации от трубопроводов. Область применения может быть расширена включением в состав комплексных систем мониторинга состояния опасных производственных объектов [13].

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Незаконные врезки — основной фактор преступного вмешательства в деятельность магистральных трубопроводов. URL: <https://www.transneft.ru/press-Releases/view/id/11771/>.
2. Латышев Л. Н., Насырова З. Р. Система обнаружения несанкционированных врезок в магистральный нефтепровод // Нефтегазовое дело. 2006. № 1. С. 28–31.
3. Псёл Н. А. СОУиКА и «ОМЕГА»: безопасное обнаружение утечек с помощью распределённого акустического датчика. URL: http://omega.transneft.ru/u/articles_file/8951/ngn_5_psel_1_.pdf.
4. Система мониторинга протяжённых объектов. URL: <http://petrofbre.ru/products>.
5. Безопасность эксплуатации трубопроводов в 2010 г. URL: <http://www.torinsk.ru/publication/29-bt2010.html>.
6. Патент 2463590 РФ, МПК G 01 № 29/04 (2006.01). Способ обнаружения изменений параметров среды в окружающей заглуплённого магистрального продуктопровода / Б. Н. Епифанцев, А. А. Федотов // Бюл. Изобретения. 2012. № 28.
7. Патент 2523043 РФ, МПК G01N 29/04, F17D 5/02. Способ обнаружения предвестников чрезвычайных ситуаций на линейной части подземного магистрального продуктопровода / Б. Н. Епифанцев // Бюл. Изобретения. 2014. № 20.
8. Костюков В. Н., Науменко А. П. Виброакустическая диагностика как основа мониторинга технического состояния машин и механизмов // В мире неразрушающего контроля. 2017. Т. 20, № 3. С. 4 – 10.
9. Ахмеджанов Р. А., Федотов А. А. О помехоустойчивости активного виброакустического способа контроля состояния магистрального трубопровода // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 116 – 120.
10. Амплитудно-частотный спектр виброакустического сигнала при ударном воздействии на трубопровод / Р. А. Ахмеджанов, С. В. Кабанов, А. Е. Самотуга, А. А. Федотов // Энергосбережение и водоподготовка. 2018. № 1 (111). С. 67 – 72.
11. Ахмеджанов Р. А., Федотов А. А. О помехоустойчивости активного виброакустического способа контроля состояния магистрального трубопровода // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 116 – 120.
12. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники: 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1989. — 656 с.
13. Комплексный мониторинг технологических объектов опасных производств / В. Н. Костюков и др. // Контроль. Диагностика. 2008. № 12. С. 8 – 19.