

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕСАНКЦИОНИРОВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ТРУБОПРОВОД

Р.А. АХМЕДЖАНОВ<sup>1</sup>, к.т.н., профессор

А.А. ФЕДОТОВ<sup>1</sup>, к.т.н.

В.А. КОМАРОВ<sup>2</sup>, соискатель

С.В. КАБАНОВ<sup>2</sup>, соискатель

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей сообщения», 644046, г. Омск, пр-т Маркса, 35

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», 644050, г. Омск, пр-т Мира, 11

**Аннотация.** Представлен краткий обзор способов контроля состояния трубопроводов и предложен активный виброакустический способ идентификации вида несанкционированного воздействия на трубопровод. Приведены экспериментальные данные, доказывающие возможность определения вида воздействия с помощью анализа амплитудно-частотного спектра сигналов.

**Ключевые слова:** трубопроводы, несанкционированное воздействие, врезки в трубопроводы, способ обнаружения нарушений, контроль состояния

По оценкам специалистов предполагаемая сумма потерь Российской Федерации от украденных нефтепродуктов составляет от 55 млрд. руб. ежегодно, при этом на ликвидацию одной незаконной врезки требуется от 2.5 млн. руб. [1]. Злоумышленники создают многокилометровые подземные трубопроводные системы, позволяющие осуществлять хищение нефти, оставаясь незамеченными благодаря использованию современных технологий. В связи с этим актуальной задачей обеспечения безопасности эксплуатации трубопроводных систем является оперативное обнаружение несанкционированных воздействий [2].

В [3] предложен способ мониторинга виброакустических характеристик протяженного объекта, заключающийся в том, что вдоль трубопровода прокладывают волоконно-оптический кабель, один конец которого возбуждают импульсным излучением, регистрируемым на другом. При изменении виброакустических характеристик объекта (прорыв трубы, ее просадка и др.) судят о локальных или протяженных нарушениях в системе «жидкость – оболочка трубы – изоляция – окружающая среда».

Малая помехоустойчивость, обусловленная присутствием источников сопутствующих сейсмических сигналов на трассе пролегания трубопровода (корни деревьев при наличии ветра, движение техники в приле-

гающей местности и др.) [2] не позволяет данному решению стать перспективным.

Более совершенным является «способ обнаружения изменений параметров среды в окружении заглубленного магистрального продуктопровода» [4]. Если импульсы возбуждают в контролируемом трубопроводе на одном его конце, а каждый принимаемый на другом импульс совмещают с предыдущим, то можно получить текущий суммарный импульс, который коррелируют с эталонными, сформированными ранее на этом же участке трубопровода. Далее сравнение производят с имитированными состояниями, признанными опасными, и при превышении максимального коэффициента корреляции из числа полученных принимают решение о наличии изменения параметров трубопровода и вида этого изменения.

Однако изменения параметров окружающей среды (температура, атмосферные явления, ветровые воздействия и т. д.) также приводят к неконтролируемым изменениям принимаемых сигналов.

В способе обнаружения предвестников чрезвычайных ситуаций на линейной части подземного магистрального трубопровода [5] возбуждают трубу в заданном сечении периодической последовательностью виброакустических импульсов, которые регистрируют в двух сечениях трубы, удаленных на одинаковые расстояния по обе сто-

роны от сечения возбуждения, накапливают суммы отсчетов интегралов от разностей регистрируемых сигналов. В качестве эталонов используют уровни накопленного искомого нарушения, и решение о появлении последнего принимают при их превышении. Здесь в качестве информативного признака принято его среднеквадратическое значение, но без частотных его проявлений. Это ограничивает надежность обнаружения несанкционированного воздействия и возможность идентификации его вида.

С учетом перечисленных недостатков предлагается возбуждать трубопровод зондирующими периодическими виброимпульсами [6], формировать образцовые уровни сигналов, имитирующие несанкционированные воздействия и решение принимать по результатам сравнения накопленных сигналов, принимаемых в равноудаленных

от места зондирования трубопровода точках.

В ходе эксперимента на действующем трубопроводе устанавливались равноудаленные от источника приемники сигнала. В качестве источника использовался соленоид с частотой ударного воздействия 1 Гц. Приемник и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) фиксировали виброакустические импульсы на накопителе ноутбука (частота дискретизации 44100 Гц, разрядность 16 бит).

На первом этапе были получены более сотни импульсов в состоянии трубопровода без вмешательства в его структуру. Затем регистрировались импульсы при имитации шурфа длиной 1,5 метра и с установкой в нем имитатора врезки в виде металлического хомута.

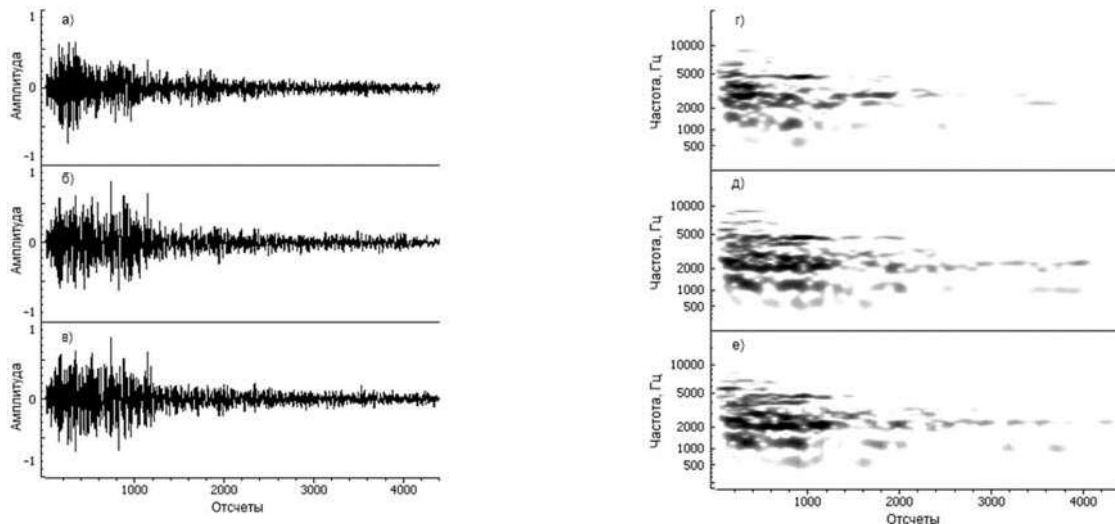


Рис.1. Импульсы для трех состояний трубопровода:  
а) «норма»; б) «шурф»; в) «шурф с имитатором врезки»

На рис.1 представлены виброакустические импульсы и спектрограмма состояний трубопровода: «норма», «шурф», «имитатор врезки», полученные на трубопроводе 170 мм. Разностный сигнал формируют путем сравнения предварительно преобразованных в спектры частот сигналов от равноудаленных точек, и образцовые уровни - в виде доверительных интервалов в предварительно выделенных частотных диапазонах рабочего спектра с привязкой каждого из

них к определенному виду несанкционированного воздействия. Решение по обнаружению последнего и его виде принимают по уровню разностного накопленного сигнала в соответствующем доверительном интервале.

На схеме реализации способа (рис. 2) обозначено: 1 – трубопровод; 2 – окружающий трубопровод грунт; 3 – микроконтроллер; 4 – генератор упругих колебаний; 5,6 – вибропреобразователи; 7 – двухканальный анало-

го-цифровой преобразователь (АЦП) со схемой вычитания на выходе; 8 – линия задержки; 9 – накопитель сигналов; 10 – блок быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Генератор 4, запускаемый импульсами от тактового генератора в микроконтроллере 3, возбуждает колебания в трубопроводе 1, которые воспринимаются вибропреобразователями 5 и 6, подключенными к АЦП 7. Преобразование аналогового сигнала в цифровой и вычитание амплитуд от вибропреобразователей осуществляется после поступления импульса от тактового генератора через линию задержки 8, компенсирующую время распространения упругих колебаний по трубопроводу.

Дискретизированные отсчеты разностей сигналов поступают на накопитель 9, реализующий когерентное накопление с усреднением заданного числа  $N$  импульсов, заданного в микро-контроллере 3. БПФ 10 преобразует накопленный сигнал в накопителе 9 в амплитудно-частотный спектр, который поступает в память микроконтроллера 3 и сохраняется в его накопителе.

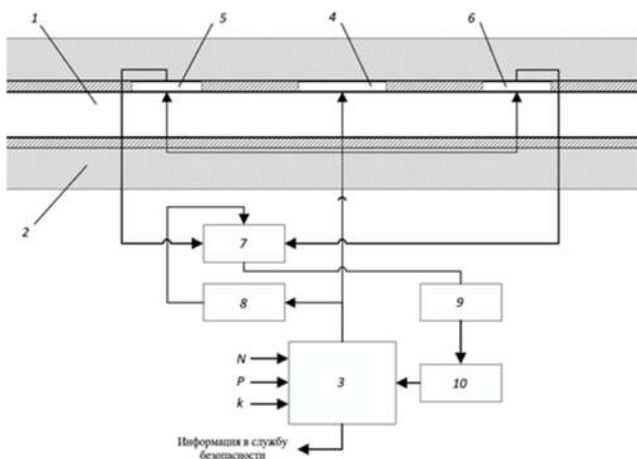


Рис.2. Структурная схема реализации способа обнаружения несанкционированных воздействий

Схема алгоритма работы микроконтроллера 3 показана на рис. 3. Приведенная выше последовательность операций повторяется  $N \cdot k$  раз, где  $N$  – число накопленных сигналов,  $k$  – требуемое количество итераций.

При достижении значения  $N \cdot k$  микроконтроллер 3 определяет по выборке из  $k$

полученных от БПФ 10 частотных спектров для каждой частоты  $n$  значение математического ожидания  $M_n$ , среднеквадратического отклонения  $\sigma_n$  и границ  $S_1, S_2$  доверительного интервала:

$$S_1 = M_n - \frac{t \cdot \sigma_n}{\sqrt{N}}; S_2 = M_n + \frac{t \cdot \sigma_n}{\sqrt{N}},$$

где  $t$  – коэффициент, определяемый по матрице таблицы Стьюдента в памяти микроконтроллера 3 по заданному числу  $N$  и доверительной вероятности  $P$ .

Массив из  $2n$  доверительных границ сохраняется в качестве эталонных в памяти микроконтроллера 3.

При достижении необходимого количества доверительных границ в памяти микроконтроллера 3, соответствующих установленным имитаторам, микроконтроллер вычисляет зоны амплитудно-частотного спектра, не имеющие по амплитуде общих пересечений и переходит в режим мониторинга. Текущий накопленный образец амплитудного спектра разницы сигналов от вибропреобразователей 5 и 6 накладывается на доверительные интервалы частотных диапазонов в зонах, обозначенных как информативные, и по расположению кривой спектра относительно данных частотных границ идентифицируют вид воздействия.

Информативные диапазоны спектра «привязаны» к состояниям трубопровода («без нарушения», «шурф», «шурф и имитатор врезки») [7]. Из выделенных частотных диапазонов можно выбрать, к примеру, тот, в котором разница между границей, соответствующей доверительному интервалу при состоянии «без нарушения», и границей – «шурф» будет наибольшей.

Разработано программное обеспечение на языке программирования C#, осуществляющее подключение к микроконтроллеру 4 посредством COM-соединения, получение от него импульсов, выделение информативных диапазонов частот при адаптации системы под текущее состояние объекта и, наконец, работу в режиме мониторинга, идентифицирующего состояние трубопровода (рис. 4).

Разностный экспериментальный сигнал для двух приемников при имитации нарушений приведен на рис. 5а. Разность является ненулевой даже при отсутствии нарушения. Это обусловлено неоднородностью трубопровода и условиями установки дат-

чиков. Для обнаружения нарушения необходимо фиксировать изменение разницы. Отклонения амплитуды при возникновении нарушений фиксируются в различных областях спектра и максимальное их них на частоте 775 Гц (11дБ).

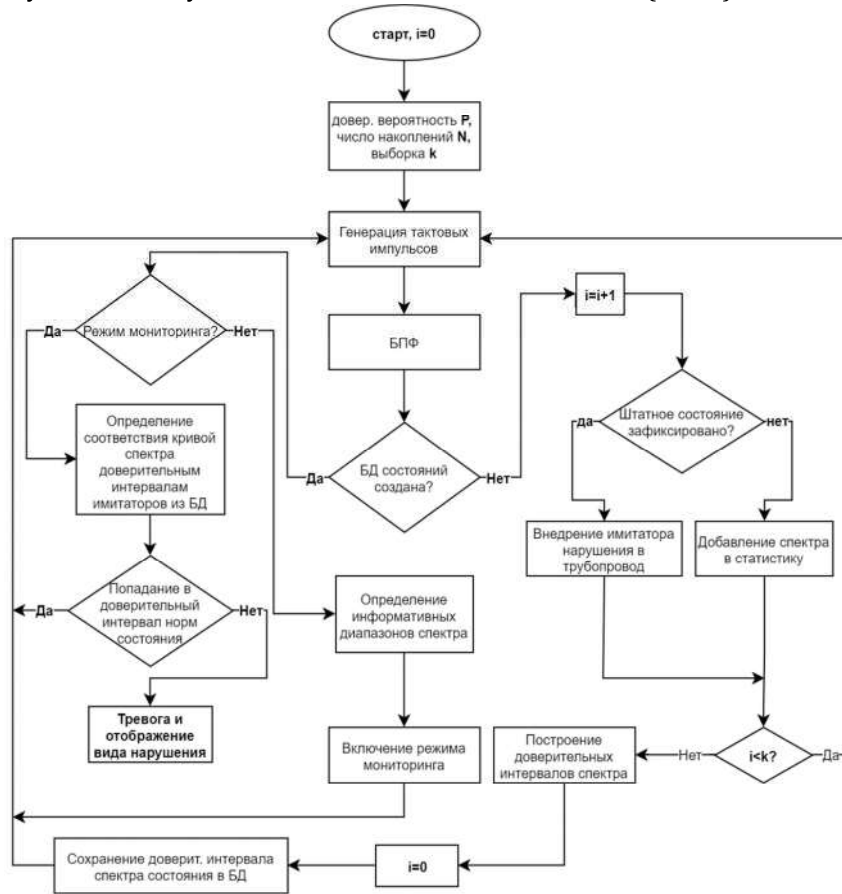


Рис.3. Алгоритм работы программы идентификации

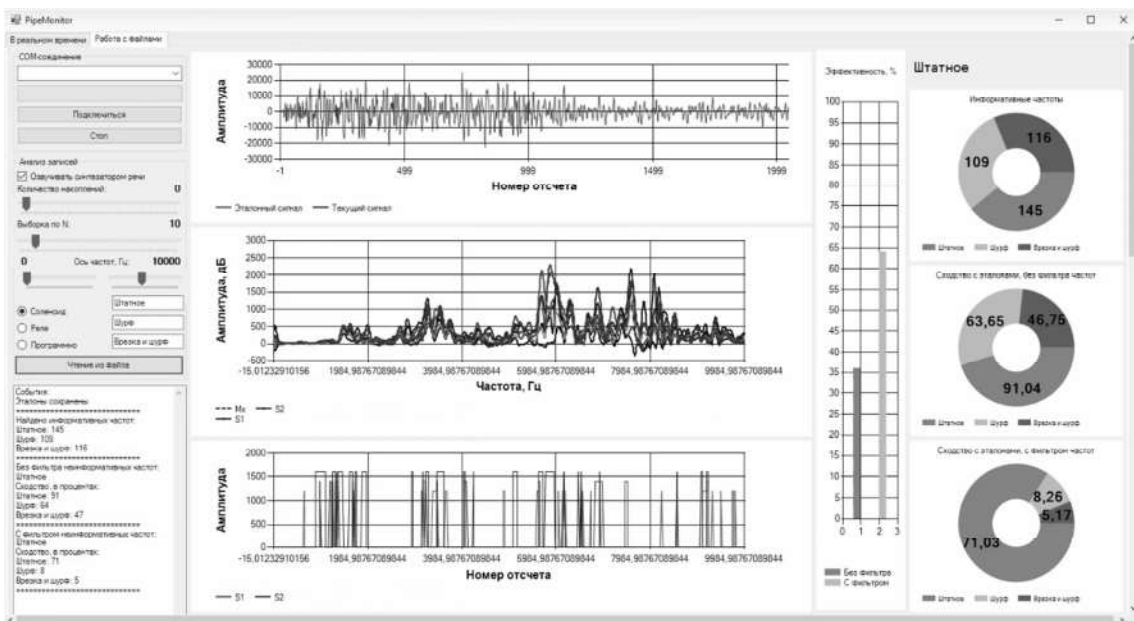


Рис.4. Программная реализация алгоритма идентификации

На рис. 5б представлено приращение амплитуды в зависимости от частоты при переходе трубопровода от состояния «норма» к состояниям «шурф» и «шурф с имитатором врезки». Кривая «стабильность амплитуды» получена разностью сигналов, но при одном и том же состоянии трубопровода и является оценкой влияния естественной помехи.

На определенных частотах амплитуда помехи превышает приращение при возникновении нарушения, что говорит о невозможности идентификации (без дополнительной обработки для повышения отношения сигнал/шум, например, когерентного накопления).

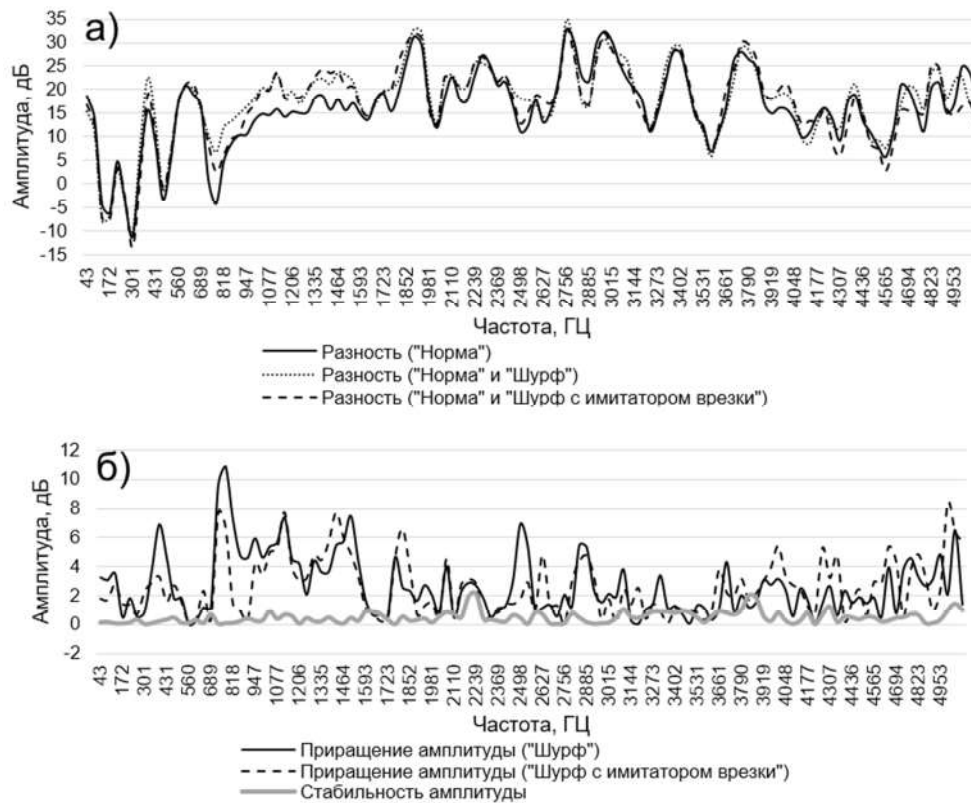


Рис.5. Амплитудно-частотный спектр: а) разность от двух равноудаленных датчиков; б) приращение разности амплитуды при возникновении нарушений

Амплитуды 35-ти частот из 117-ти (размер окна БПФ равен 1024 точки) для кривой «стабильность амплитуды» превышают амплитуду частот при возникновении нарушений, что составляет 29,9% от общего их количества. Из этого следует, что информативная доля частот, анализ которой позволяет обнаруживать нарушение, составляет 70,1%.

Таким образом, работа с частотным представлением сигнала позволяет повысить надежность обнаружения за счет исключения неинформативной составляющей и выделить (идентифицировать) вид несанкционированного воздействия.

#### ЛИТЕРАТУРА.

1. «Сейчас как врежу!» или проблема хищения нефти в России // «Добывающая промышленность».
2. Епифанцев, Б. Н. Концепция обеспечения безопасной работы магистральных трубопроводов в условиях внешних воздействий / Б. Н. Епифанцев, А. А. Пятков, А. А. Федотов // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – №12. – С. 42–49.
3. Пат. 2271446, Российская Федерация, МПК E21B 47/00, G01N 9/00. Устройство для мониторинга виброакустической характеристики протяженного объекта [текст] / Горшков Б. Г., Заирный М. В., Кулаков А. Т.
4. Пат. 2463590 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/04. Способ обнаружения изменений параметров среды в окружении заглубленного магистрального продуктопровода [текст] / Епифанцев Б. Н.,

Федотов А. А. № 2011121858/28; заявл. 30.05.2011; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 28.

5. Пат. 2523043, Российская Федерация, МПК G01N 29/04, F17D 5/02. Способ обнаружения предвестников чрезвычайных ситуаций на линейной части подземного магистрального продуктопровода [текст] / Епифанцев Б. Н. 2013115545/28; заявл. 05.04.2013г.; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20.

6. Ахмеджанов. Р.А., Кабанов С.В., Самотуга А.Е., Федотов А.А. Амплитудно-частотный спектр вибро-

акустического сигнала при ударном воздействии на трубопровод // Энергосбережение и водоподготовка. – 2018. – №1 (111). – С. 67-72.

7. Федотов, А.А. Активный помехоустойчивый виброакустический способ контроля состояния магистрального трубопровода : автореферат дис. кандидата технических наук : 05.11.13 / Федотов Александр Анатольевич; - Омск, 2017. - 23 с.

## IDENTIFICATION OF UNAUTHORIZED IMPACT ON PIPELINE

R.A. AKHMEDZHANOV<sup>1</sup>, Ph.D. (Tech.)

A.A. FEDOTOV<sup>1</sup>, Ph.D. (Tech.)

V.A. KOMAROV<sup>2</sup>, Eng

S.V. KABANOV<sup>2</sup>, Eng

<sup>1</sup>Omsk State Transport University, 35, Marks Str., Omsk, 644046, Russia

<sup>2</sup>Omsk State Technical University, 11, Mira Str., Omsk, 644050, Russia

**Abstract.** A brief overview of methods for monitoring the condition of pipelines is introduced and an active vibro-acoustic method for identifying the type of unauthorized impact on the pipeline is proposed. Experimental data are presented and prove the possibility of determining the type of impact using an analysis of the amplitude-frequency spectrum of signals.

**Key words:** pipelines, unauthorized exposure, inserts into pipelines, method for detecting irregularities, condition monitoring

### REFERENCES.

1. «Sejchas kak vrezhu!» ili problema hishhenija nefti v Rossii // «Dobывajushhaja promyshlennost'».
2. Epifancev, B. N. Koncepcija obespechenija bezopasnoj raboty magistral'nyh truboprovodov v uslovijah vneshnih vozdeystvij / B. N. Epifancev, A. A. Pjatkov, A. A. Fedotov // Bezopasnost' truda v promyshlennosti. – 2013. – №12. – С. 42–49.
3. Pat. 2271446, Rossijskaja Federacija, MPK E21V 47/00, G01N 9/00. Ustrojstvo dlja monitoringa vibroakusticheskoj harakteristiki protjazhennogo ob#ekta [tekst] / Gorshkov B. G., Zazirnyj M. V., Kulakov A. T.
4. Pat. 2463590 Rossijskaja Federacija, MPK G 01 N 29/04. Sposob obnaruzhenija izenenij parametrov srede v okruzhenii zaglublennogo magistral'nogo produktoproveda [tekst] / Epifancev B. N., Fedotov A. A. № 2011121858/28; zajavl. 30.05.2011; opubl. 10.10.2012, Bjul. № 28.
5. Pat. 2523043, Rossijskaja Federacija, MPK G01N 29/04, F17D 5/02. Sposob obnaruzhenija predvestnikov chrezvychajnyh situacij na linejnoj chasti podzemnogo magistral'nogo produktoproveda [tekst] / Epifancev B. N. 2013115545/28; zajavl. 05.04.2013g.; opubl. 20.07.2014, Bjul. № 20.
6. Ahmedzhanov. R.A., Kabanov S.V., Samotuga A.E., Fedotov A.A. Amplitudno-chastotnyj spektr vibroakusticheskogo signala pri udarnom vozdeystvii na truboprovod // Jenergoberezenie i vodopodgotovka. – 2018. – №1 (111). – С. 67-72.
7. Fedotov, A.A. Aktivnyj pomehoustojchivyy vibroakusticheskij sposob kontrolja sostojanija magistral'nogo truboproveda : avtoreferat dis. ... kandidata tehničkih nauk : 05.11.13 / Fedotov Aleksandr Anatol'evich; - Омск, 2017. - 23 s.