

АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЙ СПЕКТР ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ТРУБОПРОВОД¹

АХМЕДЖАНОВ Р.А., к.т.н., профессор

ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей сообщения»,

644046, г. Омск, Пр. Маркса, д. 35

КАБАНОВ С.В., соискатель

САМОТУГА А.Е., соискатель

ФЕДОТОВ А.А., соискатель

ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет (ОмГТУ)»

644050, г. Омск, Пр. Мира, д. 11

***Аннотация.** Рассмотрена реализация генератора упругих колебаний для функционирования активного виброакустического способа контроля состояния трубопровода с оценкой спектрального состава сигнала, принимаемого на удаленном конце трубы. Определен характер затухания колебаний и показана степень информативности диапазонов амплитудно-частотного спектра сигнала в задаче классификации состояний трубопровода.*

***Ключевые слова:** упругие колебания, амплитудный спектр, трубопровод, контроль состояния, затухание сигнала*

Перспективным направлением для решения задачи обеспечения безопасности магистральных трубопроводов является совершенствование активного метода виброакустического контроля [1].

Обнаружение отклонения состояния трубопровода от штатного возможно осуществить периодической генерацией упругих колебаний в трубу, накоплением виброакустических сигналов на ее поверхности и сравнением форм импульсов [2,3].

Рациональным решением для возбуждения колебаний в трубопроводе является применение генератора, возбуждающего колебания трубопровода не его собственных частотах.

В источнике колебаний использован втяжной электромагнит постоянного тока с ударным штоком, схема которого представлена на рис. 1. Периодическая подача тока в катушку индуктивности приводит к намагничиванию ферромагнитных частей ее магнитопровода. Якорь массой 36 г ударяет по неподвижному

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №17-08-01560)

штоку массой 6 г, который, в свою очередь, передает ударный импульс на исследуемый объект. При этом ход якоря

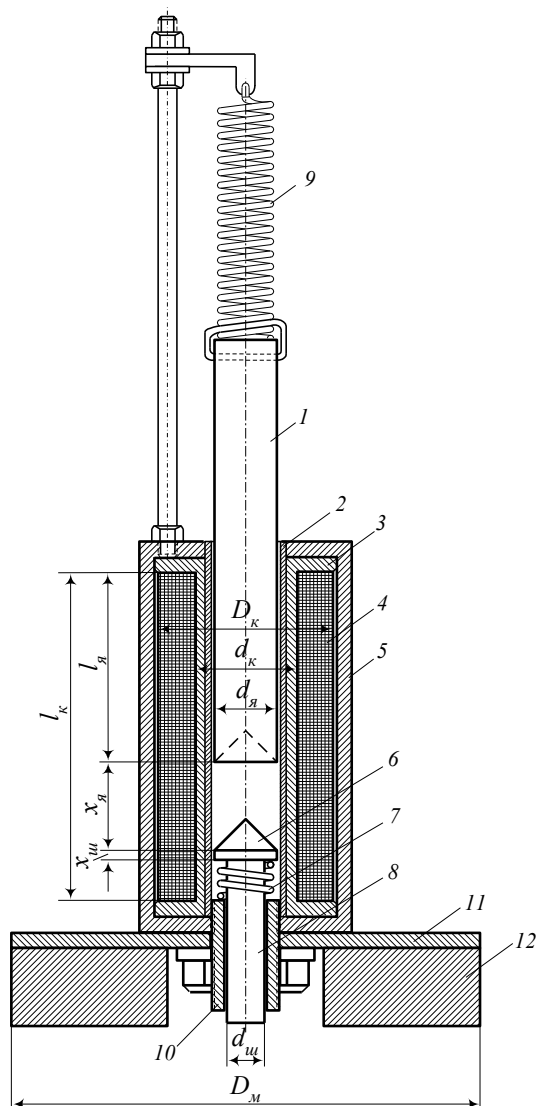


Рисунок 1 – Конструкция броневое электромагнита постоянного тока с втяжным якорем. 1 – втяжной якорь; 2 – латунная втулка; 3 – пластмассовый корпус катушки индуктивности; 4 – обмотка электромагнита; 5 – магнитопровод броневое электромагнита; 6 – медный наконечник ударного штока; 7 – пружина ударного штока; 8 – ударный шток; 9 – возвратная пружина втяжного якоря; 10 – крепежная и направляющая втулка ударного штока; 11 – крепежный фланец электромагнита; 12 – кольцевой магнит для крепления электромагнита к объекту

составляет $x_я = 15 \text{ мм}$, ход ударного штока – $x_щ = 1 \text{ мм}$.

Упрощенное выражение электромагнитной силы в ньютонах с учетом слагающей от потоков рассеяния, имеет вид:

$$P_э = -\frac{1}{2}(Iw)^2 \delta \left[\left| \frac{dG_\delta}{d\delta} \right| + g_s \left(\frac{l_я}{l_к} \right)^2 \right],$$

где Iw – намагничивающая сила обмотки индуктивности, А;

$\frac{dG_\delta}{d\delta}$ – производная магнитной проводимости рабочего зазора электромагнита,

$\Gamma / \text{м}$;

δ – величина рабочего зазора (ход якоря вместе со штоком - s), м;

g_s – удельная проводимость потоков рассеяния, $\Gamma / \text{м}$;

$l_я$ – длина якоря, погруженного в катушку электромагнита, м;

$l_к$ – длина катушки электромагнита, м.

Считая, что сталь сердечника не входит в состояние насыщения, намагничивающая сила F обмотки электромагнита при силе тока $I = 2 \text{ А}$:

$$F = Iw = 2 \cdot 750 = 1500 \text{ А}$$

Используя приведенное выражение, определим составляющие и суммарную величину электромагнитной силы $P_э$, действующей на подвижный сердечник:

$$\frac{dG_{\delta}}{d\delta} = \mu_0 \frac{\pi d^2}{4\delta^2} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\pi(10 \cdot 10^{-3})^2}{4(16 \cdot 10^{-3})^2} =$$

$$= 0,386 \cdot 10^{-6} \Gamma / \text{м};$$

$$g_s = \mu_0 \frac{2\pi}{\ln(D_K / d_K)} =$$

$$= 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{2\pi}{\ln(27 \cdot 10^{-3}) / (16 \cdot 10^{-3})} =$$

$$= 15,09 \cdot 10^{-6} \Gamma / \text{м}$$

$$P_3 = \frac{1500^2}{2} \left[0,386 \cdot 10^{-6} + 15,09 \cdot 10^{-6} \left(\frac{28 \cdot 10^{-3}}{52 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \right] =$$

$$= 5,36 \text{ Н}$$

Импульс данной системы складывается из импульсов якоря ($m_{\text{я}} v_{\text{я}}$) и импульса штока ($m_{\text{ш}} v_{\text{ш}}$). Согласно закону сохранения импульса импульс системы: $m_{\text{я}} v_{\text{я}} + m_{\text{ш}} v_{\text{ш}} = v_{\Sigma} (m_{\text{я}} + m_{\text{ш}})$. При $v_{\text{ш}} = 0$ скорость, с которой шток ударяет по объекту, меньше расчетной скорости якоря

$$v_{\Sigma} = \frac{m_{\text{я}} v_{\text{я}} + m_{\text{ш}} v_{\text{ш}}}{m_{\text{я}} + m_{\text{ш}}} = \frac{m_{\text{я}} v_{\text{я}}}{m_{\text{я}} + m_{\text{ш}}} = \frac{36 \cdot 10^{-3}}{42 \cdot 10^{-3}} v_{\text{я}} = 0,857 v_{\text{я}}$$

При подсчете силы, реально действующей на сердечник, следует учитывать силу сопротивления возвратной пружины якоря, силу сопротивления возвратной пружины ударного штока и силы трения скольжения для обоих подвижных элементов системы, которые противодействуют электромагнитной силе обмотки и существенно уменьшают ее. Произведем приближенную оценку этой величины. Если допустить, что реально действующая на систему сила вдвое меньше расчетной, то энергия удара $E_{\text{у}}$

будет равна произведению силы $P_{\Sigma} / 2$ на пройденный путь S .

$$E_{\text{у}} = 0,5 P_{\Sigma} S = 0,5 \cdot 5,36 \cdot 0,016 = 0,043 \text{ Дж},$$

где $S = (x_{\text{я}} + x_{\text{ш}}) = 16 \text{ мм}$ – ход якоря вместе со штоком.

Кинетическая энергия в момент удара по объекту будет равна энергии $E_{\text{у}}$, следовательно,

$$E_{\text{к}} = \frac{(m_{\text{я}} + m_{\text{ш}}) v_{\Sigma}^2}{2} = E_{\text{у}} = 0,5 \cdot P_{\Sigma} \cdot s =$$

$$= 0,043 \text{ Дж}$$

Из этого выражения можно определить скорость удара штока по объекту

$$v_{\Sigma} = \sqrt{\frac{2E_{\text{к}}}{(m_{\text{я}} + m_{\text{ш}})}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,043}{42 \cdot 10^{-3}}} = 1,43 \text{ м/с}$$

Во время испытаний на протяженном металлическом объекте сравнивались сигналы, полученные при одинаковых возмущающих воздействиях, создаваемых с помощью ударного механизма и падающего на объект шарика массой 32 г. Одинаковый отклик наблюдался при падении шарика с высоты 13 см. Подсчитано, что при этом потенциальная энергия шарика равна

$$E_{\text{п}} = mgh = 0,032 \cdot 9,8 \cdot 0,13 = 0,041 \text{ Дж},$$

что подтверждает корректность определения энергии удара используемого генератора.

Виброакустический сигнал фиксировался:

- виброакустическим преобразователем «АР99-1000»;

- аналого-цифровой преобразователь «QMBox15-16» с регистрацией данных на ноутбуке Lenovo ThinkPad T510 (запись данных на носитель в несжатом формате WAVE).

В результате поверки у вибропреобразователя предел относительной погрешности при измерении виброускорения в рабочих диапазонах амплитуд и частот составил 7%. Основная погрешность аналого-цифрового преобразователя, приведенная к рабочему диапазону $\pm 1,5$ В, составила 0,04% (разрешающая способность 0,2 мВ). Следовательно, суммарную погрешность можно определить как:

$$\sigma_o = \sqrt{\sigma_{II}^2 + \sigma_{АЦП}^2} = \sqrt{49 + 0,0016} \approx 7\%$$

Эксперимент проводился на трубопроводе с жидкостью (вода). Изоляция трубы – стекловата, диаметр – 400 мм.

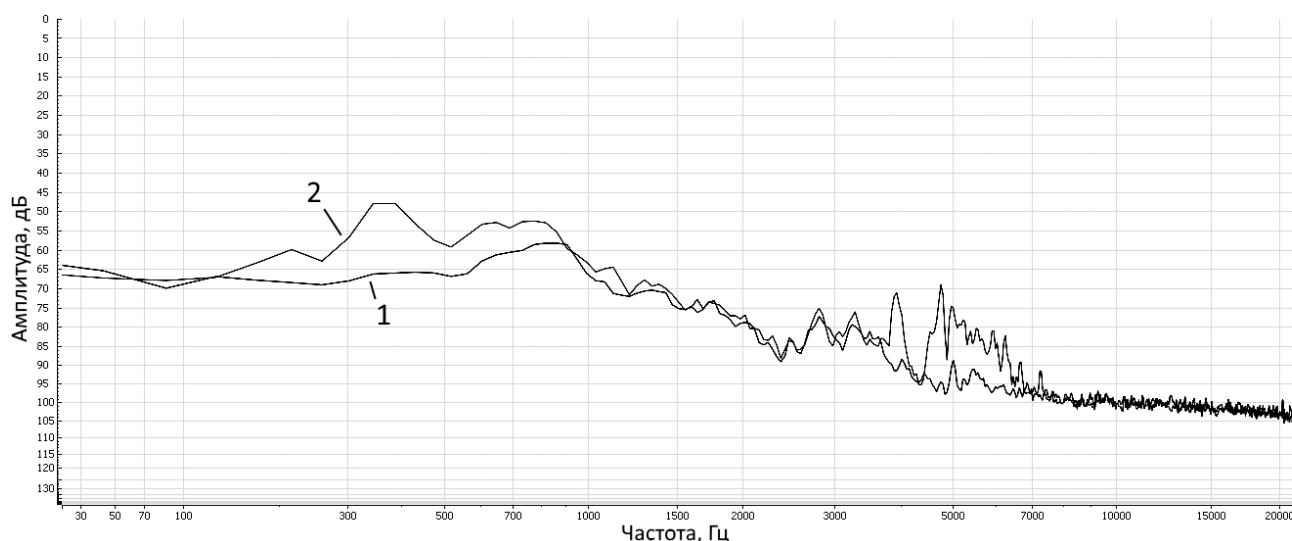


Рисунок 2 – Амплитудно-частотный спектр шума (1) и сигнала с шумом (2).

На рисунке 3 изображены исследуемые частоты на 4-х реализациях в двух

Для оценки затухания сигналов при распространении по действующему трубопроводу на исследуемом объекте устанавливались два датчика на расстоянии 200 м и 450 м от генератора импульсов. Получение спектра сигнала и шума проведено с окном быстрого преобразования Фурье в 1024 отсчета (шаг сетки частот равен $\frac{44100}{1024} = 43$ Гц). Результат преобразования показан на рис. 2.

На расстоянии 450 м от генератора спектр сигнала выделяется на фоне шума в областях 200-900 Гц и 2800-6000 Гц.

Выбраны четыре частоты: 226 Гц, 370 Гц, 824 Гц, 3883 Гц (выраженные пики).

точках при различном удалении от генератора импульсов. Дисперсия, вызван-

ная флуктуацией амплитуды при генерации импульсов, а также шумовой составляющей от воды в трубе и внешними факторами невелика, что подтверждается графиками, близко прилегающими

друг к другу. Максимальное среднеквадратичное отклонение для всех четырех областей частот оказалось равным 2 дБ.

По результатам экспериментов следует вывод, что затухание сигнала,

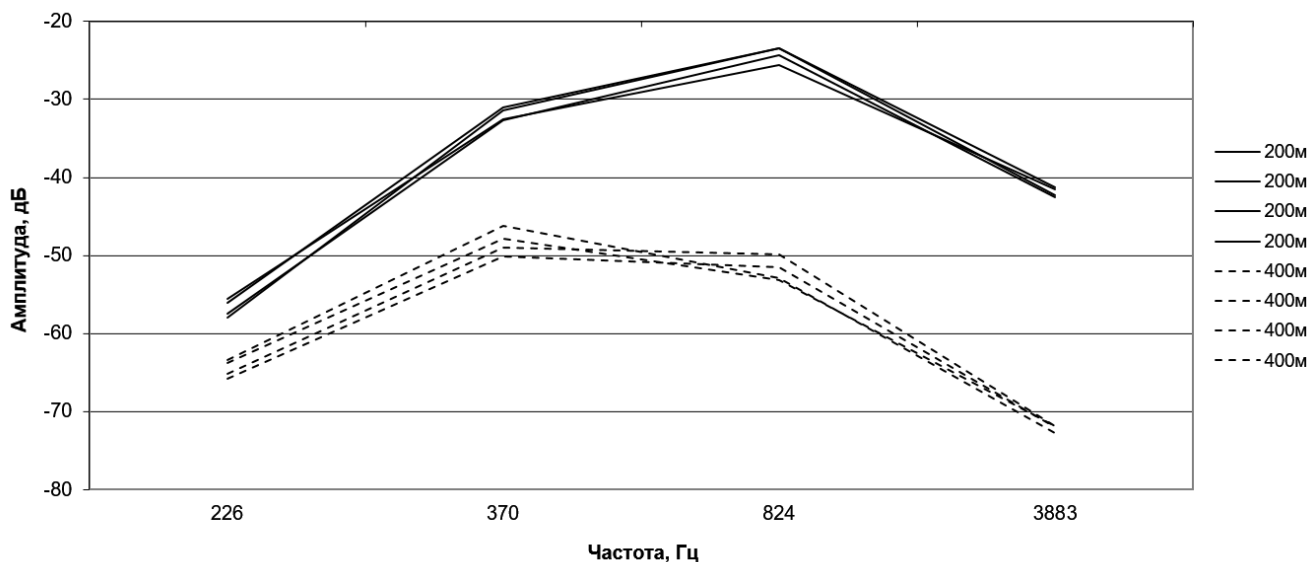


Рисунок 3 – Амплитуда частот импульсов на расстоянии 200 м и 450 м

распространяющегося по наземному трубопроводу, усиливается с повышением частоты, что согласуется с теоретическими основами распространения упругих колебаний. Показана возможность передачи сигнала на расстояние 450 м при использовании генератора упругих колебаний со значительным запасом по энергии импульса исключая деформацию трубы.

Эксперимент на заглубленном в грунт трубопроводе показал, что энергия удара 0,041 Дж является достаточной, чтобы обеспечить отношение сигнал/шум, равное 6 на расстоянии 125 м.

Применение когерентного накопления сигнала позволяет увеличивать данное отношение в зависимости от \sqrt{N} , где N - число накоплений сигнала.

Интерес представляют частотные области сигналов, чувствительные к изменению свойств среды. На рис. 4, 5 изображен доверительный интервал для частот амплитудного спектра, полученный на действующем трубопроводе с дистанцией между источником и приемником в 500 м для обычного состояния и с имитатором «шурф». Площадь шурфа относительно площади трубопровода составила 0,5%.

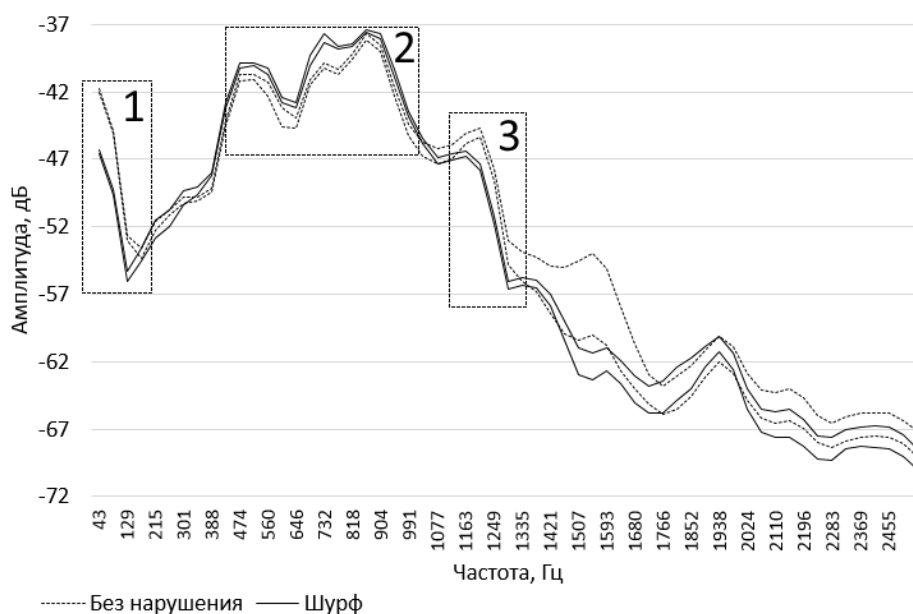


Рисунок 4 – Доверительный интервал для амплитудного спектра состояний трубопровода (диапазон 43 – 2498 Гц, 180 импульсов, $P = 0,99$)

Доверительный интервал построен с использованием значения t -критерия Стьюдента на основе 30 амплитудных спектров, каждый из которых определялся как среднее значение амплитудного спектра, полученное по 488 реализациям с окном БПФ, равным 1024 точки (240 импульсов, шаг частотной сетки 43 Гц). Доверительная вероятность $P = 0,99$, коэффициент $t = 2,75$.

Для наиболее наглядного представления о характере влияния шурфа накопление сигналов не производилось. По рис. 4, 5 можно утверждать, что с вероятностью $P = 0,99$ значения отмеченных номерами диапазонов частот расположены в границах интервалов, не имеющих взаимное пересечение для двух состояний исследуемого трубопровода.

Обнаружено восемь информативных диапазонов. В каждом из диапазонов выделялась самая информативная частота, определяемая как максимум разницы амплитуд между соседними границами интервалов для двух состояний трубопровода. Разница приведена в табл. 1.

Таблица 1 – Информативность частот амплитудного спектра

Диапазон	Частота, Гц	Амплитуда, дБ
1	43	4,16
2	732	1,52
3	1163	1,99
4	3359	2,26
5	3833	1,61
6	4565	2,59
7	4996	3,01
8	5513	1,23

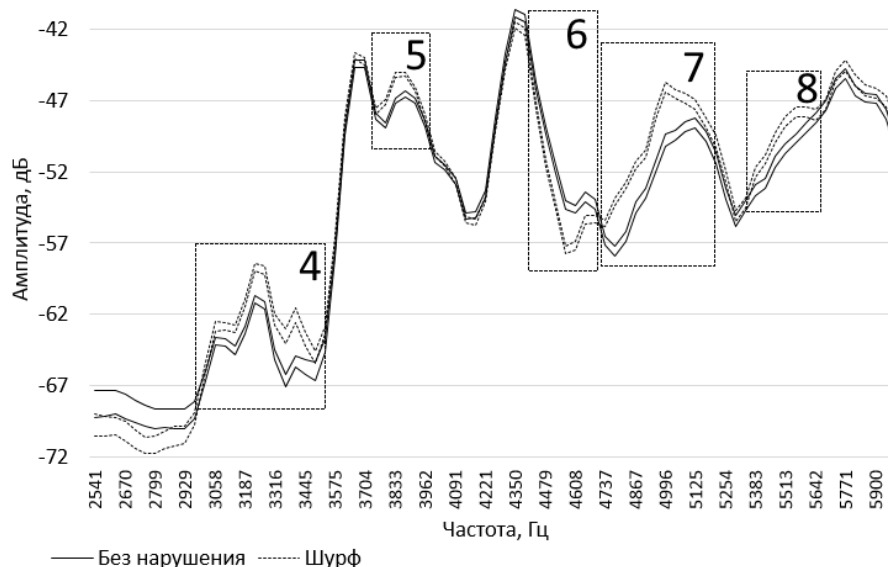


Рисунок 5 – Доверительный интервал для амплитудного спектра состояний трубопровода (диапазон 2541 – 6000 Гц, 180 импульсов, $P = 0,99$)

На макет трубы длиной 3 м диаметром 50 мм устанавливался в качестве несанкционированного воздействия металлический брусок с площадью контакта 0,16% от всей площади трубы. Обнаружены три информативные частотные зоны. Зафиксировано максимальное снижение амплитуды в первой частотной зоне (474-1335 Гц) на 9,2 дБ для частоты 947 Гц. Полученные спектральные характеристики соответствуют конкретным образцам и могут отличаться от полученных для объектов с другими параметрами.

Вышеприведенные исследования дают основания для разработки методики выявления информативных диапазонов частот виброакустического сигнала на действующих трубопроводах с последующей корректировкой настроек системы контроля под предполагаемые нарушения для их идентификации.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Федотов, А. А. Аналитическое исследование проблемы обнаружения и предотвращения хищений продуктов из магистральных продуктопроводов / А. А. Федотов // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2013. – № 9. – С. 43–48.
2. Епифанцев Б.Н., Федотов А.А. Способ обнаружения изменений параметров среды в окружении заглубленного магистрального трубопровода. – Патент 2463590 РФ МПК G01N29/04, опуб. 10.10.2012.
3. Федотов А. А. Математическая модель упругих колебаний трубопровода при ударном воздействии / А. А. Федотов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 5 (59). – С. 132–138.

AMPLITUDE-FREQUENCY SPECTRUM OF VIBROACOUSTIC SIGNAL AT SHOCK IMPACT ON PIPELINE

AKHMEDZHANOV R.A., Prof.

Omsk State Transport University

Pr. Marksa, 35, Omsk, 644046, Russia

KABANOV S.V., aspirant

SAMOTUGA A.E., aspirant

FEDOTOV A.A., aspirant

Omsk State Technical University

Pr. Mira, 11, Omsk, 644050, Russia

Abstract. *The implementation of the generator of elastic oscillations for the functioning of an active vibro-acoustic method for monitoring the pipeline condition with an estimate of the spectral composition of the signal received at the remote end of the pipe is considered. The nature of the damping of the oscillations is determined and the degree of informativeness of the ranges of the amplitude-frequency spectrum of the signal in the problem of automatic classification of pipeline conditions is shown.*

Key words: *elastic oscillations, amplitude spectrum, pipeline, state control, signal attenuation*

REFERENCES.

1. Fedotov, A. A. Analiticheskoe issledovanie problemy obnaruzhenija i predotvrashhenija hishhenij produktov iz magistral'nyh produktoprovodov / A. A. Fedotov // Mir nefteproduktov. Vestnik nef tjanyh kompanij. – 2013. – № 9. – S. 43–48.
2. Epifancev B.N., Fedotov A.A. Sposob obnaruzhenija izmenenij para-metrov sredy v okruzhenii zaglublenno-go magistral'nogo truboprovoda. – Pa-tent 2463590 RF MPK G01N29/04, opub. 10.10.2012.
3. Fedotov A. A. Matematicheskaja model' uprugih kolebanij truboprovoda pri udarnom vozdejstvii / A. A. Fedotov // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. – 2017. – № 5 (59). – S. 132–138.