

МОДЕЛЬ КОЛЕБАНИЙ ТРУБОПРОВОДА ПРИ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В статье представлена модель расчета упругих колебаний, фиксируемых на поверхности трубопровода в результате ударного воздействия. Использование эмпирической уточняющей характеристики совместно с аналитическим выражением позволило синтезировать сигнал, соответствующий несанкционированному воздействию на трубопровод. Приведена оценка адекватности предложенного решения путем сравнения расчетного сигнала с эмпирическим. Модели сигналов могут быть использованы для разработки и тестирования алгоритмов идентификации воздействий на трубопровод.

Ключевые слова: модель колебаний трубопровода, поперечные колебания трубопровода, ударное воздействие, несанкционированные подключения.

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

Несанкционированные подключения к магистральным трубопроводам по-прежнему приводят к значительным экономическим и экологическим потерям. Согласно официальным данным ПАО «Транснефть» [1], в некоторых регионах наблюдается сокращение количества незаконных врезок, например, в Самарской области. При этом в Московской области за последние 10 лет количество незаконных врезок увеличилось в 59 раз. Наряду с нефтепроводами, злоумышленники стали подключаться к нефтепродуктопроводам. Сегодня врезка в трубы с дизельным топливом совершается в 3,5 раза чаще, чем к нефтепроводам [1].

Моделирование колебаний трубопровода может применяться для синтеза сигналов, регистрируемых акселерометрами на поверхности трубопровода, с целью реализации и тестирования алгоритмов обнаружения и идентификации несанкционированного отбора перекачиваемого продукта активным виброакустическим способом [2].

Первые научные работы, посвященные изучению и описанию колебаний трубопроводов, вышли в свет около 70 лет назад. Авторами (Дж. Хевиленд, Х. Эшли, В.И. Федосьев и др.) предложено использовать стержневую модель для описания колебаний трубопровода [3, 4]. Ими были представлены расчетные формулы для колебаний труб с протекающей в них жидкостью. Дальнейшие работы подтвердили достоверность полученных аналитических выражений с возможностью принимать во внимание жесткость упругого основания под трубопроводом [5, 6].

Существующие подходы к определению частот колебаний имеют комплексный характер и опреде-

ленные ограничения. Трубопровод находится под влиянием множества факторов, таких как внутреннее рабочее давление, сжимающие силы, особенности конструкции и грунта, что не позволяет достоверно воспроизводить его колебания с учетом перечисленных явлений.

Наряду со стержневой теорией, авторами представлены дифференциальные уравнения колебаний трубопроводов с позиции теории цилиндрических оболочек [7–10].

Стержневая теория для моделирования колебаний сигналов на поверхности трубопровода является менее точной, так как не учитывает деформацию сечения трубы, влияния внутреннего давления жидкости, геометрических характеристик трубы и скорости потока нефтепродукта. При этом представление трубы в качестве стержня для моделирования сигналов остается более подходящим ввиду простоты реализации [11].

Например, теория цилиндрических оболочек предполагает решение дифференциальных уравнений четвертого порядка. Даже с преимуществом в виде возможности использования вышеприведенных параметров, их значения необходимо оценивать экспериментально, что с учетом такого множества факторов приведет лишь к усложнению моделирования.

Ранее были получены зависимости амплитудно-частотной характеристики получаемых сигналов от вида воздействия на трубопровод [12], используя которые стало возможным идентифицировать вид несанкционированной деятельности. В нее входят воздействия: создание шурфа; установка приспособ-

бления для создания «врезки»; подключение отвода — трубы для отбора продукта.

Представленные ранее выражения для расчета колебаний трубопровода позволили реализовать генерацию импульсов для трубопровода с заданными параметрами [13]. Одним из направлений развития данного исследования является проработка возможности моделировать сигналы, соответствующие не только параметрам трубопровода и источника колебаний, но и внешним воздействиям.

В результатах экспериментов [14] обнаружена взаимосвязь между частотными характеристиками зондирующих импульсов, принимаемых на поверхности трубопровода вибропреобразователями, и воздействиями на трубопровод, схожими с действиями злоумышленника при попытке несанкционированного подключения для отбора перекачиваемого продукта.

Учитывая наличие специфического влияния воздействия на характеристики импульса можно выделить подход к созданию гибридной модели сигнала с совместным использованием теоретической модели [13] и экспериментальных сигналов. Реализация идеи включения нарушения в характеристики

моделируемого сигнала становится возможной при выделении характеристики, соответствующей конкретным нарушениям, и добавлением ее в теоретическую модель.

Использовать эмпирический сигнал для моделирования нарушения в математической модели представляется возможным, если найти разностную функцию:

$$F(t) = V(t) - W(t), \quad (1)$$

где t — время импульса; $V(t)$ — сигнал, полученный с трубы с нарушением; $W(t)$ — сигнал, полученный с трубы без нарушения.

Характеристику $F(t)$ можно применить для моделирования нарушения в виде суммы амплитуд $Y(t)$, используя ее совместно с аналитическим выражением для расчета поперечных колебаний стержня $G(t)$:

$$Y(t) = G(t) + F(t).$$

Тогда итоговый результат модели, учитывающий характеристику нарушения, представится в виде:

$$Y(t_k) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{i-1}{2}} \sin \frac{i\pi x}{L}}{\left(\omega_i^2 - \frac{\pi^2}{\tau^2}\right)^2 + \frac{4\pi^2 \delta_i^2}{\tau^2}} \times \left\{ \begin{aligned} & \left[2e^{\delta_i \tau} \frac{\delta_i \pi}{\tau} \cos \theta_i \tau - \frac{\pi e^{\delta_i \tau}}{\tau \theta_i} \left(2\delta_i^2 - \omega_i^2 + \frac{\pi^2}{\tau^2} \right) \times \sin \theta_i \tau + \frac{2\pi \delta_i}{\tau} \right] \cos \theta_i t_i + \\ & + \left[\frac{\pi e^{\delta_i \tau}}{\tau \theta_i} \left(2\delta_i^2 - \omega_i^2 + \frac{\pi^2}{\tau^2} \right) \times \cos \theta_i \tau + 2e^{\delta_i \tau} \times \right. \\ & \left. \times \frac{\delta_i \pi}{\tau} \sin \theta_i \tau + \frac{\pi}{\tau \theta_i} \times \left(2\delta_i^2 - \omega_i^2 + \frac{\pi^2}{\tau^2} \right) \right] \sin \theta_i t \end{aligned} \right\} + S(t_k) + F(t_k),$$

где k — номер амплитуды; t_k — момент времени для амплитуды k ; i — номер моды; L — длина трубопровода; ω_i — собственная частота колебаний трубы; τ — длительность контакта источника колебаний с трубой; $S(t)$ — помеха.

Набор частот определяется по формулам:

$$\omega_i = \sqrt{\frac{EJ}{ML^4} C_i^4};$$

$$\delta_i = \frac{1}{2} \left(A_1 \frac{i^4 \pi^4}{L^4} + A_2 \right);$$

$$\theta = \sqrt{\omega_i^2 - \delta_i^2},$$

где $C_i = \frac{i\pi}{2}$ — корни частотного уравнения для i моды; E — модуль Юнга материала стенки трубы; M — погонная масса трубы; $J = \frac{\pi}{8} d^3 h$ — момент инерции стенки трубы диаметра d с толщиной стенки h ; A_1 — коэффициент демпфирования в высокочастотной области; A_2 — коэффициент демпфирования в низкочастотной области; A_3 — коэффициент жесткости основания.

Разность сигналов по формуле (1) вносит корректировку в частотную характеристику модели (2) в соответствии с видом воздействия, присутствующим

в сигнале $Z(w)$, что позволяет в дальнейшем работать с моделью импульса как с экспериментальным.

Для оценки результатов моделирования была получена характеристика $F(t)$ с использованием экспериментального стенда с параметрами, указанными в табл. 1.

О сходстве импульсов можно судить по рис. 1. Расчетный импульс $F(t)$ имеет менее существенные отличия от эмпирически полученного $V(t)$, так как использование разностной функции $F(t)$ при расчете обогащает высокочастотную область, что приводит к повышению коэффициента корреляции с действительным сигналом. На рис. 2 представлены зависимости коэффициентов корреляции $R(G, V)$ и $R(Y, V)$ от номера блока, отсчитываемого от начала импульса и обладающего размером в 50 отсчетов сигнала.

Таким образом графики характеризуют взаимосвязь моделируемых сигналов с наличием и отсутствием уточняющей характеристики нарушения $F(t)$ при сдвиге выборок во временной области вплоть до 2500 отсчетов.

Как представлено на рис. 2, $R(Y, V)$ существенно ближе к единице, чем $R(G, V)$, что свидетельствует о повышении достоверности модели сигнала, представляющего собой предполагаемый импульс при соответствующем изменении состояния трубопровода, определяемого функцией $F(t)$.

Таблица 1

Параметры модели

Длина трубы, м	$L = 2,37$	Диаметр трубы, м	$d = 0,06$
Координата источника, м	$x_1 = 2,09$	Частота дискретизации сигнала, Гц	44100
Координата приемника, м	$x_2 = 1,185$	Коэффициенты затухания	$A_1 = 5 \cdot 10^{-5}$ $A_2 = 70$
Толщина стенки трубы, м	$h = 0,001$	Коэффициент жесткости основания	0
Модуль Юнга для стали, Па	$E = 200 \cdot 10^9$	Длительность контакта, с	$4 \cdot 10^{-5}$

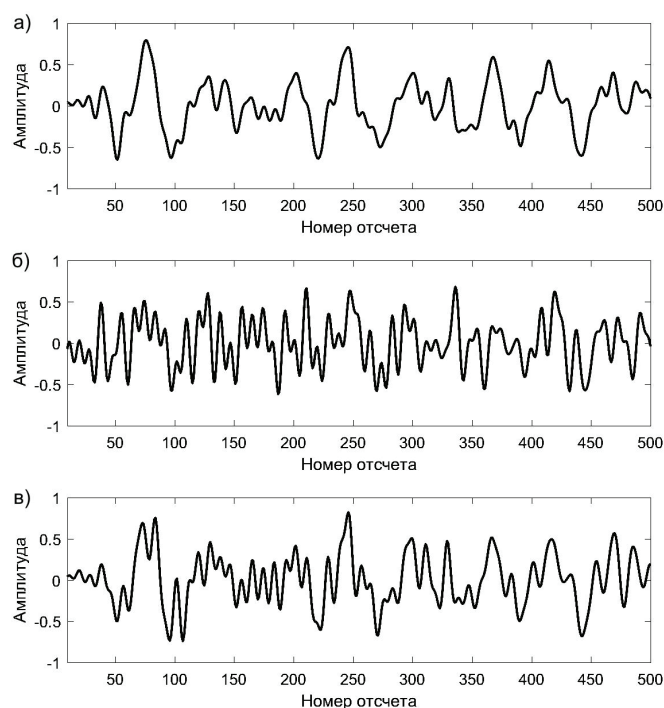


Рис. 1. Сигналы в амплитудно-временном представлении:
 а) аналитическая модель $G(t)$; б) сигнал $V(t)$;
 в) аналитическая модель $Y(t)$ с корректировкой

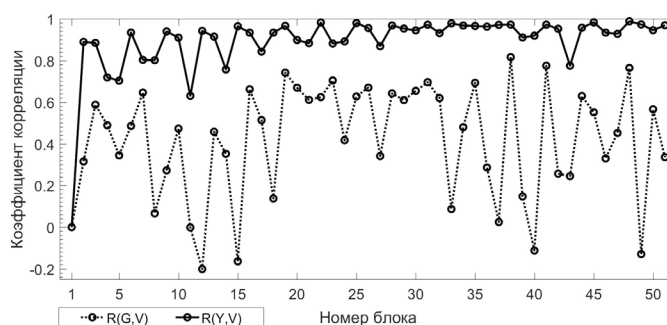


Рис. 2. Зависимости коэффициентов корреляции наборов отсчетов импульсов

Алгоритм идентификации вида воздействия [14] предполагает выделение информативных признаков в амплитудном спектре сигналов и принятие решения о состоянии трубопровода на основе работы классификатора, поэтому особый интерес представляют амплитудно-частотные зависимости.

Амплитудный спектр для сигналов определялся по известной формуле быстрого преобразования Фурье [15]:

$$\text{Re}_k = \sum_{k=0}^{N-1} x_i \cos \frac{2\pi k i}{N};$$

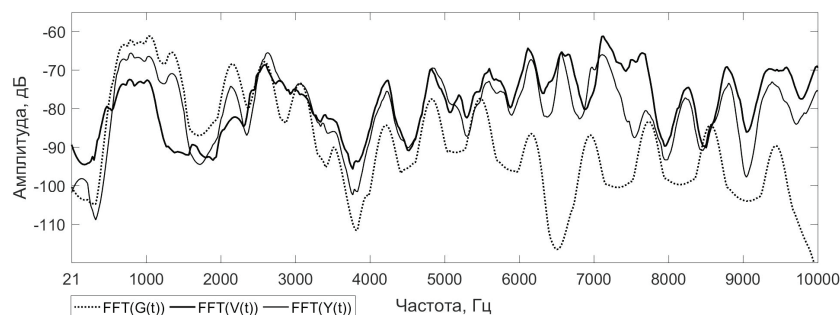
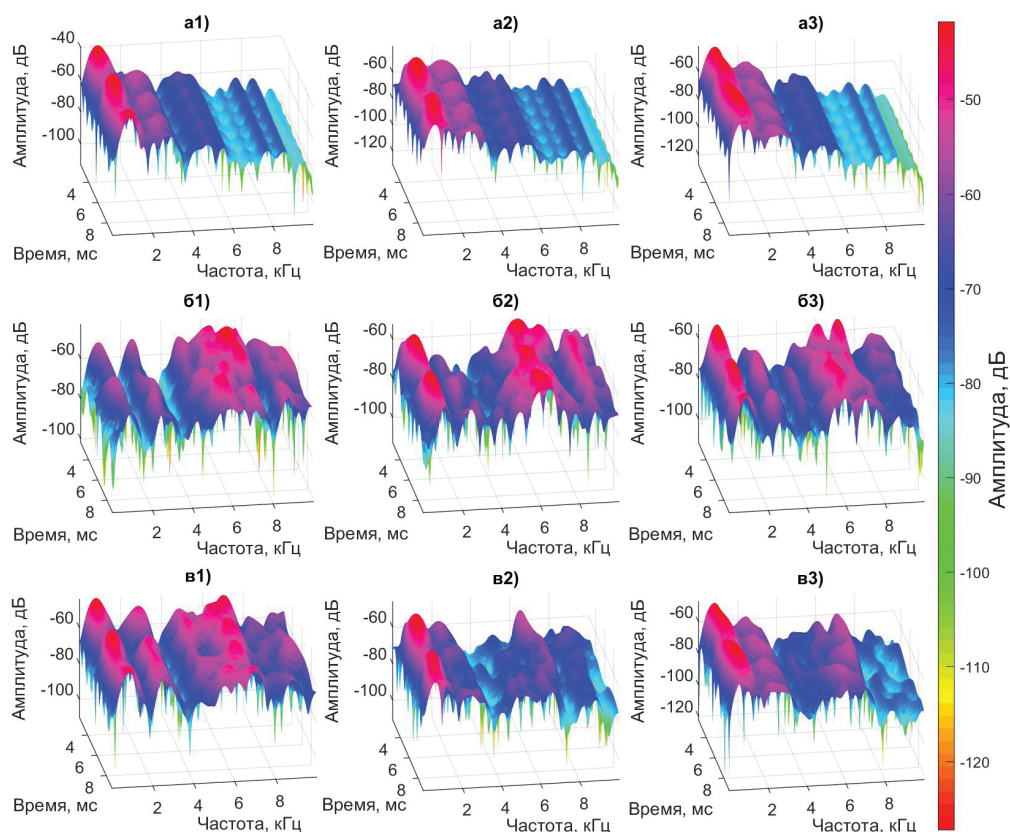


Рис. 3. Амплитудный спектр сигналов

Рис. 4. Спектрограммы сигналов со смещением от начала импульса по три блока длительностью $t = \Delta t = 6$ мс: 1) $G(t)$ (a1–a3); 2) $V(t)$ (б1–б3); 3) $Y(t)$ (в1–в3)

$$\text{Im}_k = -\sum_{k=1}^{N-1} x_i \sin \frac{2\pi k i}{N},$$

где Re_k — амплитуда косинусной составляющей; Im_k — амплитуда синусной составляющей; N — количество отсчетов дискретной последовательности; k — номер гармоники; i — номер отсчета входного сигнала.

Результирующие амплитуды частот:

$$\text{FFT}_k = 20 \log_{10} \frac{2}{N} \sqrt{\text{Re}_k^2 + \text{Im}_k^2}.$$

К амплитудным спектрам был применен цифровой фильтр Савицкого–Голея с полиномом порядка 1 и окном размера в 21 отсчет, что позволило сгладить кривые, устранив выбросы амплитуды и упростить визуальный анализ, при этом сохранив

основные зависимости без существенного искажения сигнала.

Модель $Y(t)$, учитывающая характеристику (1), наиболее достоверно воспроизводит сигнал, соответствующий полученному на трубопроводе с нарушением. Такой вывод можно сделать основываясь на сравнении кривых по рис. 3, на котором представлен результат быстрого преобразования Фурье для первых 2048 значений функций $G(t)$, $V(t)$ и $Y(t)$.

Частотный анализ сигналов, принимаемых на действующем трубопроводе, имеет смысл в частотном диапазоне до 10 кГц. Эксперименты подтверждают невозможность обнаружения сигналов на дистанции 500 м в диапазоне более 10 кГц.

Существенные отклонения моделируемого сигнала без учета характеристики $F(t)$ фиксируются на частотах свыше 3 кГц. Максимальная разница составила 49 дБ на частоте 6525 Гц, что указывает на невозможность использования модели без уточняющей характеристики. Разностная эмпирическая

функция вносит корректировку в модель, снижая ошибку амплитуды на этой частоте до 1,8 дБ.

Наглядным представлением результата моделирования является анализ по спектрограммам, позволяющий учесть изменение частотной характеристики во времени. На рис. 4 представлены спектрограммы-срезы для вышеприведенных функций в цветовом пространстве HSV, построенные с временным сдвигом по три блока размером в 512 точек. Диапазоны спектрограмм имеют длительность 6 мс при частоте дискретизации 44100 Гц и построены с умножением на окно Кайзера с коэффициентом формы $\beta = 18$, размером окна $N = 200$ точек и перекрытием в 191 отсчет:

$$w_n = \frac{I_0 \beta \sqrt{1 - \left(\frac{2n - N + 1}{N - 1} \right)^2}}{|I_0(\beta)|},$$

где I_0 — модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка; β — коэффициент, определяющий компромисс между уровнем боковых лепестков и шириной главного лепестка на спектре

Рис. 4 аналогичным образом иллюстрирует преимущество модели $Y(t)$ перед исходной $G(t)$ в виде повышенной достоверности синтеза сигнала на частотах более 3 кГц. Посредством характеристики $F(t)$ реализуется передача в аналитический импульс информативной составляющей о наличии воздействия на трубопровод.

В качестве заключения следует отметить, что, несмотря на лучшие показатели при использовании гибридной модели, появляется необходимость эмпирического получения уточняющей характеристики нарушения, что является недостатком представленного подхода к построению модели сигнала. Результат гибридного моделирования зависит от соответствия уточняющей характеристики действительным явлениям. Одним из решений может послужить создание базы данных — обучающей выборки сигналов, регистрируемых при работе трубопровода в различных условиях с введением имитаторов нарушений, которые предполагается идентифицировать.

Библиографический список

1. Сливной бизнес // Пресс-центр ПАО «Транснефть». URL: <https://www.transneft.ru/pressReleases/view/id/11871/> (дата обращения: 21.08.2019).
2. Пат. 2676386 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/04. Способ обнаружения несанкционированных воздействий на трубопровод / Р. А. Ахмеджанов, А. А. Федотов; № 2018102654; заявл. 23.01.18; опубл. 28.12.18; Бюл. № 1.
3. Ashley H., Haviland G. Bending vibrations of a pipe line, containing flowing fluid // Journal of Applied Mechanics. 1950. Vol. 72. P. 229–232.
4. Феодосьев В. И. О колебаниях и устойчивости трубы при протекании через нее жидкости // Инженерный сборник. 1952. Т. 10. С. 169–170.
5. Гладких П. А., Хачатурян С. А. Вибрации в трубопроводах и методы их устранения. М.: Машгиз, 1959. 243 с.
6. Ковревский А. П. Экспериментальное и теоретическое исследование колебаний труб, содержащих протекающую жидкость // Известия высших учебных заведений. Энергетика. 1964. № 4. С. 89–94.
7. Шакирьянов М. М. Пространственные хаотические колебания трубопровода в сплошной среде под действием переменного внутреннего давления // Известия Уфимского научного центра Российской академии наук. 2016. № 4. С. 35–47.
8. Березнев А. В. Влияние внутреннего рабочего давления на частоты свободных колебаний криволинейных участков полиэтиленовых трубопроводов // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 3 (50). С. 101–104.
9. Соколов В. Г., Разов И. О., Пассек В. В. Влияние параметра тонкостенности поперечного сечения на параметрические колебания магистральных нефте- и газопроводов при наземной прокладке // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 12. С. 92–96.
10. Khudayarov B. A., Turaev F. Z. Nonlinear vibrations of fluid transporting pipelines on a viscoelastic foundation // Инженерно-строительный журнал. 2019. № 2 (86). С. 30–45. DOI: 10.18720/MCE.86.4.
11. Федотов А. А. Математическая модель упругих колебаний трубопровода при ударном воздействии // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 5-3 (59). С. 128–132. DOI: 10.23670/IRJ.2017.59.039.
12. Ахмеджанов Р. А., Кабанов С. В., Самотуга А. Е., Федотов А. А. Амплитудно-частотный спектр виброакустического сигнала при ударном воздействии на трубопровод // Энергосбережение и водоподготовка. 2018. № 1 (111). С. 67–72.
13. Самотуга А. Е., Ахмеджанов Р. А., Федотов А. А., Пятков А. А. Полная модель колебаний трубопровода при ударном воздействии // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 201–205. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-201-205.
14. Федотов А. А., Ахмеджанов Р. А., Комаров В. А., Копейкин А. С. Алгоритм обнаружения несанкционированных воздействий на трубопровод // Энергетик. 2019. № 4. С. 7–11.
15. Блинов А. В., Максимов П. В., Шиверский А. В., Горохов А. Ю. Определение дефектов и повреждений трубопровода путем анализа волновых процессов методом дискретного преобразования Фурье // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-3. С. 1.

ФЕДОТОВ Александр Анатольевич, кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС).

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» ОмГУПС.

AuthorID (РИНЦ): 533818

Адрес для переписки: ahmedjanov.ra@gmail.com

ПЯТКОВ Артем Анатольевич, кандидат технических наук, инженер-программист ЗАО «СиСофт Омск».

SPIN-код: 9104-6804

AuthorID (РИНЦ): 631613

Адрес для переписки: artoymyp@gmail.com

Для цитирования

Федотов А. А., Ахмеджанов Р. А., Пятков А. А. Модель колебаний трубопровода при несанкционированном воздействии // Омский научный вестник. 2019. № 5 (167). С. 106–110. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-106-110.

Статья поступила в редакцию 26.09.2019 г.

© А. А. Федотов, Р. А. Ахмеджанов, А. А. Пятков