

## **ВОЗМОЖНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОПОР ТРУБОПРОВОДОВ ПО ЗАПИСЯМ АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ**

### ***Юрий Иванович Колесников***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии, тел. (383)333-31-38, e-mail: KolesnikovYI@ipgg.sbras.ru; Сейсмологический филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, ведущий геофизик

### ***Константин Владимирович Федин***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии, тел. (383)333-34-19, e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, старший преподаватель кафедры геофизики; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, доцент кафедры геофизических систем

### ***Лакиморе Нгомайезве***

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, магистрант геолого-геофизического факультета, e-mail: Lngomayezwe@gmail.com

На результатах натурных экспериментов показано, что по акустическим шумам можно диагностировать техническое состояние опор трубопроводов. Накопление амплитудных спектров акустических шумов, записанных на поверхности трубы, позволяет определять частоты и формы формирующихся в ней изгибных стоячих волн. Резкое увеличение числа таких волн в изучаемом частотном диапазоне и появление пучностей в местах крепления трубы свидетельствуют о возможной потере устойчивости исследуемого участка трубопровода.

**Ключевые слова:** надземный трубопровод, диагностирование, акустический шум, изгибные стоячие волны, натурный эксперимент, компьютерное моделирование.

## **THE POSSIBILITIES FOR DIAGNOSING TECHNICAL STATE OF PIPELINE SUPPORTS USING ACOUSTIC NOISE**

### ***Yury I. Kolesnikov***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Associate Professor, Chief Researcher of Laboratory of Seismic Dynamic Analysis, phone: (383)333-31-38, e-mail: KolesnikovYI@ipgg.sbras.ru; Seismological Branch of Federal Research Center «United Geophysical Survey RAS», 3, Prospect Akademik Koptyug, Novosibirsk, 630090, Russia, Lead Geophysicist

### ***Konstantin V. Fedin***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher of Laboratory of Seismic Dynamic Analysis, phone: (383)333-34-19, e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk National Research State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, Senior Lecturer of Geophysics Department; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Associate Professor of Department of Geophysical Systems

### ***Luckyomore Ngomayezwe***

Novosibirsk National Research State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, Graduate of Department of Geology and Geophysics, e-mail: Lngomayezwe@gmail.com

The results of field experiments show that acoustic noise can be used to diagnose the technical state of pipeline supports. The accumulating amplitude spectra of acoustic noise recorded on the pipe surface, allows you to determine frequency and shape of flexural standing waves formed in it. A sharp increase of number of such waves in the studied frequency range and the appearance of antinodes at the pipe fixing points indicate a possible instability of the investigated section of the pipeline.

**Key words:** above-ground pipeline, diagnosing, acoustic noise, flexural standing waves, field experiment, computer simulation.

Периодически происходящие на трубопроводах аварии наносят ущерб окружающей среде, приводят к большим материальным, а иногда и людским потерям. Актуальной задачей поэтому является разработка методов диагностирования и мониторинга состояния объектов трубопроводного транспорта.

Часть трубопроводов (или их отдельные участки) сооружаются в надземном исполнении. Трубы в этом случае укладываются на опоры на некоторой высоте над земной поверхностью. Расстояние между опорами (длина пролетов) выбирается так, чтобы заведомо обеспечивалась прочность и устойчивость трубопровода. В то же время жесткость крепления пролетов труб со временем может существенно снижаться, например, из-за сезонных просадок или выпучивания грунтов.

Значительное снижение жесткости крепления трубы к опоре (или опоры к грунтовому основанию) приводит к фактическому увеличению длины пролета трубопровода, что может привести к повреждению или даже разрушению данного участка трубопровода. С другой стороны, такое увеличение длины пролета должно понижать его собственные частоты, что может служить индикатором снижения устойчивости участка трубопровода на ранней стадии этого процесса, когда визуально его последствия еще не проявляются.

Для определения собственных частот элементов трубопроводов применяются различные приемы. Например, это можно делать, возбуждая колебания с помощью искусственных источников, таких как ударные воздействия [3-6] или механические вибрации [3, 2]. Ниже приведены результаты натурных экспериментов, которые иллюстрируют возможность определения частот и геометрических форм изгибных стоячих волн в пролетах надземных трубопроводов, не прибегая к использованию искусственных источников.

В работе [1] на результатах физического моделирования было показано, что по записям акустического шума, зарегистрированным на поверхности как пустых, так и заполненных жидкостью труб, можно определять частоты и формы колебаний образующихся между их опорами изгибных стоячих волн. Для этого достаточно накапливать амплитудные спектры большого числа записей акустического шума. Эта информация позволяет однозначно диагностировать отсутствие жесткого крепления трубы к опоре, так как в местах жесткого крепления должны отсутствовать колебания стоячих волн (это их узловые точки), а при нарушении жесткого контакта в таких местах могут наблюдаться колебания хотя бы на некоторых собственных частотах трубы.

При физическом моделировании [1] акустический шум в трубах генерировался с помощью искусственного источника. В описанном ниже натурном эксперименте были использованы записи шумов, возникающих при движении жидкости в трубе.

Для проведения опытных экспериментальных работ были выбраны два пролета действующего надземного трубопровода (теплотрассы). Трубопровод состоит из двух параллельных стальных труб диаметром 46 см, частично покрытых теплоизоляционными материалами. Через каждые 10 м трубы жестко приварены к массивным стальным опорам (рис. 1, а), между которыми они приподняты в среднем на 25-30 см над поверхностью земли, за исключением мест пересечения резких локальных понижений рельефа. В таких местах трубы уложены на более высокие стальные стойки (рис. 1, б). Поскольку жесткое крепление трубы к таким стойкам отсутствовало, их можно рассматривать как некоторый аналог опор с пониженной устойчивостью.



Рис. 1. Участок трубопровода с жестким креплением труб к опоре (а);  
трубы, уложенные на стойку без жесткого крепления (б);  
регистратор и установленный на трубе геофон (в)

Для измерений была выбрана труба, заполненная текущей под напором горячей водой (вторая труба была пустой). В одном пролете труба жестко прикреплена с двух сторон к опорам, как показано на рис. 1, *а*. Во втором пролете с одной стороны было такое же жесткое крепление, а с другой труба лежала на стойке, показанной на рис. 1, *б*. Измерения проводились с помощью вертикальных геофонов GS-20DX и одноканальных цифровых регистраторов RefTek-125A (рис. 1, *в*) с частотой дискретизации 1 кГц. Геофоны крепились к трубе с помощью магнитных дисков. На каждом пролете непрерывная регистрация шумов велась в течение 10 минут в точках, расположенных вдоль верхней образующей трубы с шагом 20 см по всей длине пролета.

При обработке зарегистрированные в каждой точке наблюдений шумовые записи разбивались на фрагменты длительностью примерно по 8 секунд (8192 отсчета), вычислялись амплитудные спектры этих фрагментов и проводилось их осреднение. В результате на осредненных амплитудных спектрах появляются резкие квазирегулярные пики, которые, как будет показано ниже, соответствуют изгибным стоячим волнам. Для более точного определения частот этих пиков также строились обобщенные спектры, осредненные по всем точкам профиля. Обобщенный спектр для пролета трубы между двумя жесткими опорами приведен на рис. 2.

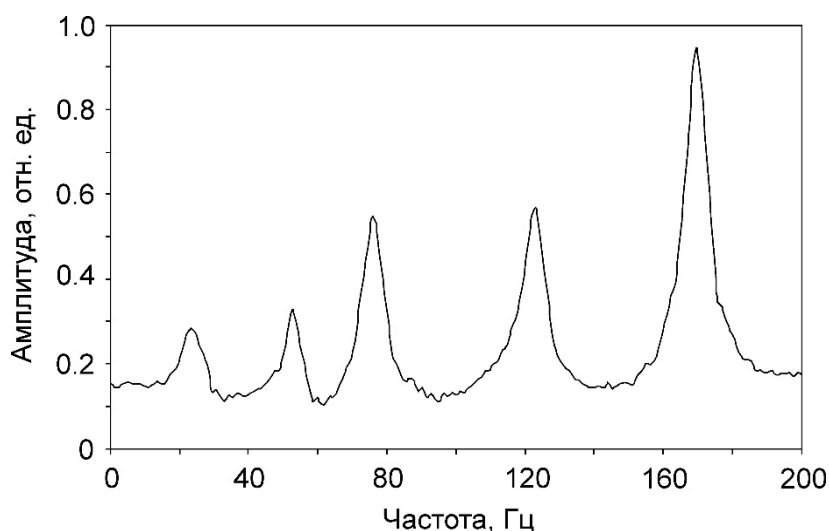


Рис. 2. Обобщенный амплитудный спектр шумовых записей, зарегистрированных на поверхности трубы между двумя жесткими опорами

Совместная визуализация осредненных спектров, полученных для всех точек наблюдений в каждом пролете трубы (рис. 3), позволяет убедиться, что наблюдаемые на амплитудных спектрах пики соответствуют именно стоячим волнам. Как можно видеть, на частотах спектральных пиков (собственных частотах трубы) наблюдается чередование вдоль пролетов максимумов и минимумов спектральных амплитуд. При этом с возрастанием собственных частот чис-

ло максимумов в каждом пролете растет. Это типичное распределение пучностей и узлов стоячих волн вдоль протяженных объектов (струн, балок, труб и т. д.).

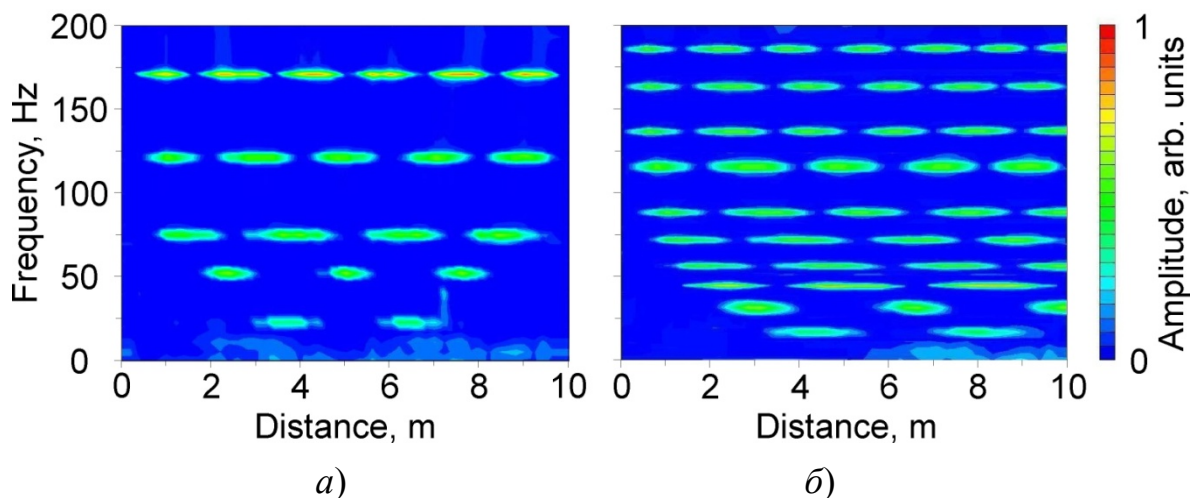


Рис. 3. Распределение осредненных амплитудных спектров шумовых записей на жестко закрепленном опорами с двух сторон участке трубы (а) и на участке трубы, жестко закрепленном с одной и свободно лежащим на стойке с другой стороны (б)

Поскольку в общем случае в трубах могут образовываться стоячие волны разных типов, мы сравнили экспериментальные результаты для пролета с жестко закрепленной с двух сторон трубой (рис. 2 и рис. 3, а) с результатами численного моделирования в конечно-элементной системе MSC Nastran (рис. 4). Сравнение показало, что наблюдающиеся в эксперименте чередования максимумов и минимумов спектральных амплитуд соответствует узлам и пучностям пяти мод (со второй по шестую) изгибных стоячих волн. Как можно видеть (таблица), отличия частот стоячих волн, полученных в натурном эксперименте и в результате численного моделирования, не превышают 5.5%.

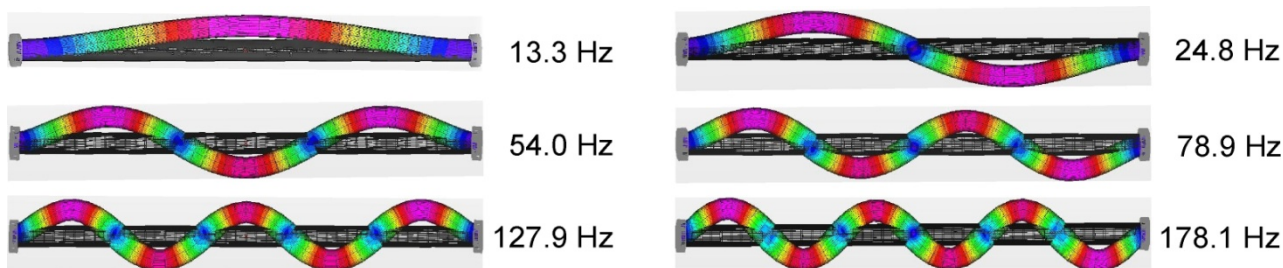


Рис. 4. Формы первых шести мод изгибных стоячих волн, полученные при численном моделировании методом конечных элементов (амплитуды многократно увеличены)

Сравнение полученных экспериментально  
и при компьютерном моделировании собственных частот  
жестко закрепленного с двух сторон отрезка трубы

Номер изгибной моды	1	2	3	4	5	6
Частота, Гц (натурный эксперимент)	–	23.4	52.7	76.2	123.0	169.9
Частота, Гц (численное моделирование)	13.3	24.8	54.0	78.9	127.9	178.1

Возвращаясь к экспериментальным результатам, отметим, что характер распределения узлов и пучностей на длине пролетов для рассматриваемых двух случаев существенно различен. Резкие квазирегулярные пики на спектре для трубы с двумя жесткими креплениями (рис. 3, *а*) расположены на оси частот примерно в два раза реже, чем для трубы, жестко закрепленной только с одной стороны (рис. 3, *б*).

Такая закономерность означает, что во втором случае (при отсутствии одного из жестких креплений) генерируемые шумами изгибные стоячие волны образуются в двойном пролете. Это подтверждают и особенности расположения пучностей и узлов стоячих волн вдоль пролетов. Так из рис. 3, *а* следует, что в крайних точках профиля наблюдений, соответствующих местам жесткого крепления трубы к опорам, колебания практически отсутствуют, то есть это узловые точки всех образующихся в пролете изгибных стоячих волн. В других точках на частотах, соответствующих пяти модам изгибных стоячих волн, вдоль профиля наблюдается чередование минимумов и максимумов амплитуд колебаний, то есть узлов и пучностей стоячих волн. Числом максимумов на каждой собственной частоте определяется номер моды – в данном случае это моды со второй по шестую.

Рис. 3, *б* существенно отличается от рис. 3, *а*. Кроме удвоения числа собственных частот, распределение амплитудных максимумов и минимумов на этих частотах указывает на отсутствие жесткого контакта в точке на отметке 10 м, соответствующей месту, где труба опирается без жесткого крепления на стойку, показанную на рис. 1, *б*. Об этом свидетельствует наличие в этом месте пучностей у каждой второй моды стоячих волн, чего не могло бы быть в случае жесткого крепления в этом месте.

Такие же отличия собственных частот и особенностей распределения узлов и пучностей изгибных стоячих волн в пролетах труб с разными типами их крепления к опорам наблюдались ранее в экспериментах по физическому моделированию [1]. Таким образом, можно констатировать, что отмеченные особенности изгибных стоячих волн позволяют оценивать качество закрепления труб в пролетах надземных трубопроводов.

Полученные результаты показали, что записи акустических шумов можно с успехом использовать для диагностирования потери устойчивости участков надземных трубопроводов, вызванной снижением жесткости закрепления про-

летов трубы. Осреднение большого числа амплитудных спектров акустических шумов, записанных на поверхности трубы, позволяет определять собственные частоты пролетов трубы и формы образующихся в них изгибных стоячих волн. Резкое увеличение числа собственных частот в изучаемом диапазоне и появление пучностей в местах крепления трубы свидетельствует о возможной потере устойчивости исследуемого участка трубопровода.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О диагностировании потери устойчивости опор трубопроводов по акустическим шумам / Ю.И. Колесников, К.В. Федин, А.А. Каргаполов, А.Ф. Еманов // Физ.-тех. пробл. разр. полезн. ископ. – 2012. – № 4. – С. 59-67.
2. Investigation into the Vibration Characteristics and Stability of a Welded Pipe Conveying Fluid / N.K.A. Al-Sahib, A.N. Jameel, O.F. Abdulateef // Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. – 2010. – Vol. 4, № 3. – P. 378-387.
3. Li T.-X., Guo B.-L. Natural frequencies of U-shaped bellows // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 1990. – Vol. 42, № 1. – P. 61-74.
4. Salley L., Pan J. A study of the modal characteristics of curved pipes // Applied Acoustics. – 2002. – Vol. 63, № 2. – P. 189-202.
5. Efficient dynamic structural response modelling of bolted flange piping systems / W.H. Semke, G.D. Bibel, S. Jerath, S.B. Gurav, A.L. Webster // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2006. – Vol. 83, № 10. – P. 767-776.
6. Modal experiment research on fluid-solid coupling vibration of hydraulic long-straight pipeline of shield machine / J.H. Xie, K. Tian, L. He, T.R. Yang, X.H. Zhu // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – № 105-107. – P. 286-293.

© Ю. И. Колесников, К. В. Федин, Л. Нгомайезве, 2019