РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

2019

УДК: 550.834; 621.64

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НАДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Ю. И. Колесников¹, К. В. Федин^{1,2}, Л. Нгомайезве²

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, E-mail: KolesnikovYI@ipgg.sbras.ru, просп. Академика Коптюга, 3, 630090, г. Новосибирск, Россия ²Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 1, 630090, г. Новосибирск, Россия

Проведены натурные эксперименты по регистрации акустических шумов на поверхности надземного трубопровода (действующей теплотрассы). Исследования выполнялись на участках трубопровода с разными типами крепления труб к опорам — жестким (труба приварена к опоре) и нежестким (теплоизолированная труба свободно лежит на подпирающей стойке). Эксперименты показали, что накопление амплитудных спектров шумовых записей позволяет определять собственные частоты и формы изгибных стоячих волн, генерируемых шумами в пролетах трубопровода. Как частоты, так и формы этих волн зависят от типа крепления трубы на концах пролетов, что может быть использовано для диагностирования участков трубопроводов по акустическим шумам на предмет нарушения жесткости крепления трубы к опорам и/или устойчивости самих опор. При компьютерном моделировании методом конечных элементов получены частоты изгибных волн, близкие к определенным экспериментально. Закономерности распределения узлов и пучностей изгибных стоячих волн вдоль пролетов трубы при разных типах крепления к опорам на качественном уровне согласуются с результатами проведенных ранее лабораторных экспериментов.

Надземный трубопровод, диагностирование, акустический шум, изгибные стоячие волны, натурный эксперимент, компьютерное моделирование

DOI: 10.15372/FTPRPI20190206

Трубопроводы широко применяются в различных сферах человеческой деятельности: для снабжения населения и промышленных предприятий водой, транспортировки других жидких и газообразных веществ, отвода промышленных стоков и отходов жизнедеятельности. При разработке твердых полезных ископаемых различные виды трубопроводов используются в системах вентиляции и пожаротушения, а также в качестве гидро- и пневмотранспорта для перемещения полезных ископаемых, отходов их обогащения, породы для закладки выработанного пространства и т.д. [1, 2]. В нефтегазовой промышленности трубопроводный транспорт является одним из важнейших компонентов, обеспечивающих ее нормальное функционирование и развитие [3].

Периодически происходящие на трубопроводах аварии наносят ущерб окружающей среде, приводят к большим материальным, а иногда и людским потерям. Так, согласно статистическим данным, только на трубопроводах газораспределительной системы США ежегодно фик-

№ 2

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ (№ гос. регистрации № 0331-2019-0009).

сируется от 50 до 100 крупных аварий, к которым относятся события, приводящие к существенному экономическому ущербу, травматизму, смертельным случаям и т. д. [4]. Актуальной задачей поэтому является разработка методов диагностирования и мониторинга состояния объектов трубопроводного транспорта.

Для выявления опасных факторов, которые могут привести к авариям на трубопроводах, применяются различные подходы. Основные из них — прямые методы — от визуального осмотра до анализа спутниковых снимков, а для обнаружения неявных, но потенциально опасных дефектов применяются, как правило, косвенные методы, основанные на различных физических принципах [5]. К ним относятся анализ разного рода вибраций в трубах, вызванных работой насосов, турбулентностью потока жидкости или газа, кавитацией, гидроударами и т. д. [6], а также активные и пассивные акустические методы [7–12].

Часть трубопроводов (или их отдельные участки) сооружаются в надземном исполнении. Трубы в этом случае укладываются на опоры на некоторой высоте над земной поверхностью. В условиях горных выработок опоры трубопроводов устанавливаются на подошве, а также могут крепиться к их стенкам или кровле, но в целом конструкция трубопроводов подобна надземным. Расстояние между опорами (длина пролетов) выбирается так, чтобы заведомо обеспечивалась прочность и устойчивость трубопровода. В то же время устойчивость отдельных участков со временем может существенно снижаться. Например, это может быть вызвано просадками или выпучиванием грунтов при сезонных протаиваниях и промерзаниях, карстовыми и суффозионными процессами и т. д.

Значительное снижение жесткости крепления трубы или потеря устойчивости опоры приводят к фактическому увеличению длины пролета трубопровода и возрастанию изгибных напряжений в трубе. Это может стать причиной повреждения или даже разрушения данного участка трубопровода. Дополнительным фактором, повышающим вероятность возникновения аварийных ситуаций, является понижение собственных частот изгибных колебаний участков трубы с недостаточно жестким закреплением. Очевидно, что такое изменение собственных частот может служить индикатором частичной потери устойчивости участка трубопровода на ранней стадии этого процесса, когда визуально его последствия еще не проявляются. Теоретически показано, что собственные частоты изгибных колебаний трубопровода можно использовать для определения краевых условий (т. е. вида закрепления трубы) на концах пролетов [13, 14].

Для определения собственных частот элементов трубопроводов могут применяться различные приемы. Например, можно возбуждать в них колебания с помощью искусственных источников, таких как ударные воздействия [15-21], механические вибрации [22-25] и др. Однако только по собственным частотам изгибных колебаний трубопровода невозможно однозначно диагностировать, на каком конце пролета трубы произошло снижение жесткости закрепления. Действительно, одинаковое изменение условий крепления на любом из двух концов участка трубы должно приводить к одинаковым изменениям собственных частот участка.

В [26, 27] на результатах физического моделирования показано, что по записям акустических шумов, зарегистрированных на поверхности как пустых, так и заполненных жидкостью труб, можно определять не только собственные частоты, но и геометрические формы изгибных колебаний (стоячих волн), образующихся под воздействием шума в трубе между жесткими опорами. Для этого достаточно накапливать амплитудные спектры большого числа записей акустического шума. Эта информация позволяет однозначно диагностировать нарушение жесткого крепления трубы к любой опоре исследуемого участка надземного трубопровода. В лабораторных экспериментах акустический шум в трубах генерировался с помощью искусственного источника [26, 27]. Цель настоящей работы — оценить применимость такого метода диагностирования технического состояния опор надземных трубопроводов в натурных условиях, не прибегая к искусственным источникам шума.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

В качестве объекта исследования выбраны несколько участков надземного трубопровода (теплотрассы), состоящего из двух параллельных стальных труб диаметром 46 см, покрытых теплоизоляционными материалами. Через каждые 10 м трубы жестко приварены к массивным стальным опорам (рис. 1a), 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 без нарушения теплоизоляции и без закрепления на более высокие стальные стойки (рис. 16). Поскольку жесткое крепление труб к стойкам отсутствовало, их можно рассматривать как некоторый аналог опор с пониженной устойчивостью.



Рис. 1. Жесткое крепление труб к опоре (a); трубы, уложенные на стойку без жесткого крепления (δ); установленные на трубе регистратор 1 и геофон 2 (s)

Для регистрации акустических шумов выбраны три пролета одной из труб. В одном из них труба жестко прикреплена с двух сторон к опорам (рис. 1*a*), в то время как в двух других пролетах с одной стороны такое же жесткое крепление, а с другой труба лежит на стойках (рис. 1*b*). Измерения проводились с помощью одноканальных цифровых регистраторов Texan (RefTek-125A) и вертикальных геофонов GS-20DX (рис. 1*b*) Частота дискретизации при регистрации равнялась 1 кГц. Геофоны крепились к трубе с помощью магнитных дисков. На каждом пролете непрерывная регистрация шумов велась в течение 10 мин в точках, расположенных вдоль верхней образующей трубы с шагом 20 см по всей длине пролета.

Теплоснабжение по данному трубопроводу проводится по открытой схеме, при которой в зимний период задействованы обе трубы, а в летний только одна — по ней потребителям поставляется горячая вода. Поскольку работы выполнялись летом, для измерений была выбрана функционирующая труба. Шумовое воздействие от текущей по ней воды позволило существенно сократить время наблюдений — десятиминутной регистрации шумовых записей оказалось достаточно для уверенного выделения генерируемых в трубе шумами изгибных стоячих волн.

ИЗГИБНЫЕ ВОЛНЫ В ТРУБЕ, ЖЕСТКО ЗАКРЕПЛЕННОЙ С ДВУХ СТОРОН

В жестко закрепленной с двух сторон трубе могут образовываться стоячие волны разных типов. Примеры форм нескольких мод собственных колебаний такой трубы, полученные при компьютерном моделировании методом конечных элементов в программной среде MSC Nastran [28], приведены на рис. 2. Кроме изгибных мод (рис. 2a-e), в таком отрезке трубы могут образовываться моды и других типов (рис. 2e-e). Как показали результаты моделирования, амплитуды изгибных мод намного превышают амплитуды мод других типов в том же частотном диапазоне (на рис. 2 для наглядности амплитуды колебаний многократно увеличены, причем непропорционально для разных мод). Естественно предположить, что и в натурных условиях моды изгибных стоячих волн будут доминировать над модами других типов, что и подтвердилось в дальнейшем.



Рис. 2. Примеры рассчитанных методом конечных элементов форм собственных колебаний жестко закрепленной с двух сторон трубы

При обработке экспериментальных данных зарегистрированные в каждой точке наблюдений шумовые записи разбивались на фрагменты длительностью примерно по 8 с (8192 отсчета), вычислялись амплитудные спектры этих фрагментов и проводилось их накопление. В результате на осредненных спектрах появлялись резкие квазирегулярные пики, которые соответствуют изгибным стоячим волнам. Для более точного определения частот этих пиков строился обобщенный спектр, осредненный по всем точкам профиля. Обобщенный спектр для пролета трубы между двумя жесткими опорами приведен на рис. 3.



Рис. 3. Обобщенный амплитудный спектр, полученный при осреднении по времени и по всем точкам наблюдений спектров шумовых записей, зарегистрированных на поверхности трубы между двумя жесткими опорами

Совместная визуализация осредненных спектров, полученных для всех точек наблюдений в жестко закрепленном с двух сторон пролете трубы (рис. 4), позволяет убедиться, что наблюдаемые на амплитудных спектрах пики соответствуют именно стоячим волнам. На некоторых ча-

стотах (собственных частотах закрепленного участка трубы) отмечается чередование вдоль пролета максимумов и минимумов спектральных амплитуд. При этом с возрастанием собственных частот число максимумов и минимумов в каждом пролете растет. Это типичное распределение пучностей и узлов стоячих волн вдоль протяженных объектов, таких как струны, балки, трубы и т. д. (примеры для изгибных колебаний трубы показаны на рис. 2a-s). Можно с уверенностью утверждать, что это изгибные стоячие волны, поскольку в трубах именно они доминируют над стоячими волнами других типов.



Рис. 4. Распределение осредненных амплитудных спектров шумовых записей в жестко прикрепленном к опорам с двух сторон участке трубы

Числом максимумов на каждой собственной частоте определяется номер моды стоячих волн. В данном случае хорошо выделяются пять мод изгибных стоячих волн со второй по шестую (первая мода на осредненных спектрах не наблюдается). Как и следовало ожидать, на жестко закрепленных краях пролета трубы (отметки 0 и 10 м) колебания практически отсутствуют, так как в этих местах находятся узловые точки всех мод стоячих волн. Подобное распределение пучностей и узлов на жестко закрепленном с двух сторон отрезке трубы наблюдалось ранее в экспериментах по физическому моделированию генерируемых шумами изгибных стоячих волн в пустых и заполненных водой трубах [26, 27].

ИЗГИБНЫЕ ВОЛНЫ В ПРОЛЕТАХ ТРУБ, ЖЕСТКО ЗАКРЕПЛЕННЫХ С ОДНОЙ И СВОБОДНО ЛЕЖАЩИХ НА СТОЙКАХ С ДРУГОЙ СТОРОНЫ

В случаях, когда одно из креплений пролета трубы ослаблено (труба лежит без жесткого закрепления на стойке так, как показано на рис. 1 δ), полученное по осредненным спектрам распределение амплитуд колебаний в плоскости "частота–расстояние" существенно меняется. Пример для одного из двух таких исследованных пролетов приведен на рис. 5*a*. Сравнивая это распределение с показанным на рис. 4, можно отметить, что резкие квазирегулярные пики на спектрах для трубы с двумя жесткими креплениями (рис. 4) расположены на оси частот примерно в 2 раза реже, чем для трубы, жестко закрепленной только с одной стороны (рис. 5*a*).

Такая закономерность означает, что во втором случае, когда одно из креплений ослаблено, генерируемые шумами изгибные стоячие волны образуются в двойном (двадцатиметровом) пролете, а на рис. 5a фактически представлено распределение спектров в его половине. Это подтверждают и особенности распределения пучностей и узлов стоячих волн в рассматриваемом десятиметровом пролете. Так, в отличие от рис. 4, на рис. 5a кроме удвоения числа собственных частот наблюдается иной характер распределения амплитудных максимумов и минимумов вдоль пролета. На отметку 10 м, где труба опирается на стойку без жесткого крепления, приходятся

пучности каждой второй моды стоячих волн, чего не могло быть при жестком креплении 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 [26, 27].

Для второго из двух исследованных пролетов трубы с одним жестким и другим "ослабленным" креплениями к опорам распределение амплитудных спектров вдоль пролета имеет еще более сложный вид (рис. 5 δ). В общих чертах распределения на рис. 5 похожи, но на рис. 5 δ отмечается своего рода раздвоение спектральных пиков, частоты которых, тем не менее, близки к частотам пиков, представленных на рис. 5a. Одно из возможных объяснений этих отличий состоит в том, что в первом случае (рис. 5a) труба практически не взаимодействует со стойкой, над которой она проходит, а во втором случае (рис. 5 δ) между трубой и стойкой имеется некоторый, пусть не жесткий, но влияющий на собственные частоты двойного пролета контакт. В результате в двойном пролете могут образоваться моды изгибных стоячих волн одного и того же порядка на близких, но отличающихся собственных частотах (если определять порядок числом узлов в двойном пролете трубы).



Рис. 5. Распределение осредненных амплитудных спектров шумовых записей на первом (*a*) и втором (*б*) участках трубы, жестко закрепленной с одной (отметка 0) и свободно лежащей на стойке с другой (отметка 10 м) стороны

Распределения спектров рис. 5 кардинально отличаются от приведенного на рис. 4, вопервых, резким увеличением числа мод изгибных стоячих волн в одном и том же частотном диапазоне, и, во-вторых, наличием пучностей у части волн в месте контакта с "нестабильной" опорой. Таким образом, эти отличия являются надежным признаком пониженной жесткости крепления трубы к опоре, что может быть использовано для диагностирования частичной потери устойчивости соответствующего участка надземного трубопровода.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С РЕЗУЛЬТАТАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Способ визуализации амплитудных спектров (рис. 4, 5) позволяет оценивать распределение узлов и пучностей стоячих волн в пролете трубы, но не дает однозначного ответа о типе этих волн. Так, распределение узлов и пучностей, подобное показанному на рис. 4, могут иметь не только изгибные, но и стоячие волны других типов, например волны, формы двух низших мод которых приведены на рис. $2e - \partial$. И хотя амплитуды изгибных стоячих волн должны быть намного больше амплитуд стоячих волн других типов, интересно провести более детальное сопоставление полученных экспериментальных данных с результатами компьютерного моделирования. При моделировании жестко закрепленного с двух сторон одинарного пролета трубы ее внешние размеры задавались равными размерам исследуемого натурного объекта (диаметр трубы 46 см, расстояние между опорами 10 м). По данным измерений ультразвуковым толщиномером Leptoskop 2042 толщина стенки в разных местах трубы меняется в диапазоне от 17 до 20 мм, что связано, по-видимому, с влиянием коррозии и накипи на внутренних стенках трубы. Задавалась средняя толщина стенки 18.5 мм. Элементы расчетной сетки — параллелепипеды размером 4.6 × 4.6 мм² в плоскости сечения трубы и 10 мм в ее продольном направлении. Для модели трубы выбрана широко применяемая, в том числе при производстве труб, сталь. Параметры этой стали: скорость продольных волн $V_p = 5910$ м/с, скорость поперечных волн $V_s = 3220$ м/с, плотность $\rho = 7.81$ г/см³. Результаты сравнения частот пяти пиков обобщенного экспериментального спектра (рис. 3) и собственных частот, рассчитанных методом конечных элементов, показаны на рис. 6*a*.



Рис. 6. Сравнение определенных экспериментально и в результате компьютерного моделирования частот мод изгибных стоячих волн для одинарного (*a*) и двойного (*б*) пролетов трубы

Экспериментально определенные и полученные в результате компьютерного моделирования частоты хорошо согласуются, различия не превышают 5 %. Анализ форм колебаний для приведенных на рис. 6*a* собственных частот, рассчитанных при компьютерном моделировании, показал, что это именно изгибные моды (формы трех низших мод показаны на рис. 2a - 6). Моды других типов колебаний соответствующих порядков имеют намного меньшие амплитуды и отмечаются на более высоких частотах. Например, моды 1-го и 2-го порядков (рис. 2z - d), имеют частоты 61.1 и 122.6 Гц, т. е. попадают в диапазон частот третьей – пятой мод, наблюдаемых в эксперименте.

На рис. 66 приведены результаты аналогичного сравнения частот мод, показанных на рис. 5a, с рассчитанными при компьютерном моделировании собственными частотами двойного пролета с жестким креплением трубы с двух сторон. Частоты, полученные экспериментально и в результате моделирования, хорошо согласуются. Как и в случае одинарного пролета, определенные при компьютерном моделировании собственные частоты двойного пролета соответствуют изгибным колебаниям. Таким образом, подтверждается предположение о том, что наблюдаемые на рис. 5a пучности и узлы отражают формы изгибных стоячих волн, образующихся не в одинарном, а в двойном пролете, т. е. ослабленная опора (стойка) практически не взаимодействует с трубой.

В третьей компьютерной модели в середине жестко закрепленного с двух сторон двойного пролета трубы снизу на нее оказывалось вертикальное демпфирующее воздействие. Расчеты показали, что на частотах, близких к собственным частотам двойного пролета, могут возбуждаться одна вертикально ориентированная изгибная мода и еще две симметричные относительно вертикальной плоскости "наклонные" изгибные моды, с одинаковыми частотами, несколько превышающими частоту вертикально ориентированной моды. Отличия частот по-разному ориентированных изгибных мод невелики, что затрудняет их графическое представление. Поэтому значения частот этих волн, полученных при компьютерном моделировании, приводятся в табличном виде. Для сравнения в таблице даны также собственные частоты двойного пролета без демпфирования.

Без демпфера	С демпфером посередине	
	вертикальная мода	наклонные моды
5.3	4.1	5.6
8.7	8.0	9.9
13.4	12.1	13.8
18.5	18.4	20.2
28.7	34.8	37.1
42.3	42.0	44.2
59.0	56.1	58.2
74.3	74.3	77.2
89.4	91.5	94.5
118.4	118.8	121.7
140.0	138.1	143.8
164.8	161.9	166.2
187.2	184.9	188.7

Сравнение частот изгибных мод двойного пролета трубопровода (компьютерное моделирование), Гц

Параметры демпфирующего элемента при компьютерном моделировании выбирались произвольно из стандартных установок системы MSC Nastran, так как реальные параметры, описывающие нежесткий контакт трубы с подпирающей ее стойкой, оценить было невозможно. Тем не менее результаты моделирования на качественном уровне показали, что кажущееся "раздвоение" мод, наблюдаемое на экспериментальных спектрах на рис. 56, может объясняться демпфированием трубы, обмотанной теплоизоляцией и опирающейся на стойку в средней части двойного пролета.

выводы

Установлено, что частоты и геометрические формы изгибных стоячих волн в пролетах трубопровода могут быть определены по зарегистрированным на поверхности трубы акустическим шумам накоплением их амплитудных спектров. Эта информация может быть использована для оценки качества закрепления пролетов трубы. Ослабление крепления трубы к опорам или снижение устойчивости самих опор, фактически увеличивающие расстояние между местами жесткого крепления трубы, кардинально изменяют структуру поля изгибных стоячих волн, формирующихся в трубе под действием акустических шумов.

Число мод в одном и том же частотном диапазоне при этом резко увеличивается — примерно пропорционально увеличению фактической длины проема. В местах жесткого крепления трубы всегда образуются узлы стоячих мод, в то время как в местах, где жесткость крепления существенно снижена, некоторые моды изгибных стоячих волн могут иметь конечные амплитуды, в том числе и пучности. Резкое изменение частот и форм изгибных стоячих волн, генерируемых акустическими шумами в трубопроводе, позволяет однозначно определять снижение жесткости крепления трубы к опоре, что может быть использовано для диагностирования потери устойчивости соответствующего участка надземного трубопровода. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами компьютерного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Блюсс Б. А., Лившиц М. Н., Семененко Е. В. Методика определения параметров систем карьерного трубопроводного транспорта с учетом пульпообразования // ФТПРПИ. — 2009. — № 1. — С. 73-82
- 2. Тапсиев А. П., Анушенков А. Н., Усков В. А., Артеменко Ю. В., Плиев Б. З. Развитие технологии трубопроводного транспорта закладочных смесей на большие расстояния на руднике "Октябрьский" // ФТПРПИ. — 2009. — № 3. — С. 81–91.
- **3.** Трубопроводный транспорт нефти и газа: учебник для вузов / Р. А. Алиев, В. Д. Белоусов, А. Г. Немудров и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1988. 368 с.
- **4. Bianchini A., Guzzini A., Pellegrini M., and Saccani C.** Natural gas distribution system: A statistical analysis of accidents data, Int. J. of Pressure Vessels and Piping, 2018, Vol. 168. P. 24–38.
- Datta S. and Sarkar S. A review on different pipeline fault detection methods, J. of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, Vol. 41. — P. 97–106.
- Olson D. E. Pipe vibration testing and analysis, Am. Soc. of Mechanical Engineers. 10.11151, 2008, Chapter 37. — P. 659–692.
- Lowe M. J. S., Alleyne D. N., and Cawley P. Defect detection in pipes using guided waves, Ultrasonics, 1998, Vol. 36, No. 1-5. — P. 147-154.
- 8. Lowe P. S., Sanderson R., Pedram S. K., Boulgouris N. V., and Mudge P. Inspection of pipelines using the first longitudinal guided wave mode, Physics Procedia, 2015, Vol. 70. P. 338–342.
- **9.** Ahadi M. and Bakhtiar M. S. Leak detection in water-filled plastic pipes through the application of tuned wavelet transforms to acoustic emission signals, Applied Acoustics, 2010, Vol. 71, No. 7. P. 634–639.
- Ozevin D. and Harding J. Novel leak localization in pressurized pipeline networks using acoustic emission and geometric connectivity, Int. J. of Pressure Vessels and Piping, 2012, Vol. 92. — P. 63–69.
- Jin H., Zhang L., Liang W., and Ding Q. Integrated leakage detection and localization model for gas pipelines based on the acoustic wave method, J. of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, Vol. 27. — P. 74–88.
- 12. Duan W., Kirby R., Prisutova J., and Horoshenkov K. V. On the use of power reflection ratio and phase change to determine the geometry of a blockage in a pipe, Applied Acoustics, 2015, Vol. 87. P. 190–197.
- **13.** Ахтямов А. М., Шагиев В. Р. Идентификация неупругих видов закреплений трубопроводов // Вестн. БГУ. 2016. Т. 21. № 1. С. 21–26.
- 14. Шагиев В. Р., Ахтямов А. М. Идентификация закрепления трубопровода с использованием минимального количества собственных частот // Математические структуры и моделирование. — 2018. — № 1 (45). — С. 95–107.
- **15.** Li T.-X., Guo B.-L., and Li T.-X. Natural frequencies of U-shaped bellows, Int. J. of Pressure Vessels and Piping, 1990, Vol. 42, No. 1. P. 61–74.
- 16. Прокофьев А. Б. Расчет собственных частот и форм колебаний трубопроводов с помощью программного комплекса // Изв. СамНЦ РАН. — 1999. — № 2. — С. 335-342.
- Salley L. and Pan J. A study of the modal characteristics of curved pipes, Applied Acoustics, 2002, Vol. 63, No. 2. P. 189–202.

- 18. Tijsseling A. S. and Vardy A. E. Fluid-structure interaction and transient cavitation tests in a T-piece pipe, J. of Fluids and Structures, 2005, Vol. 20, No. 6. P. 753-762.
- Qing M., Jinghui Z., Yushan L., Haijun W., and Quan D. Experimental studies of orifice-induced wall pressure fluctuations and pipe vibration, Int. J. of Pressure Vessels and Piping, 2006, Vol. 83, No. 7. — P. 505-511.
- Semke W. H., Bibel G. D., Jerath S., Gurav S. B., and Webster A. L. Efficient dynamic structural response modelling of bolted flange piping systems, Int. J. of Pressure Vessels and Piping, 2006, Vol. 83, No. 10. P. 767–776.
- Xie J. H., Tian K., He L., Yang T. R., and Zhu X. H. Modal experiment research on fluid-solid coupling vibration of hydraulic long-straight pipeline of shield machine, Applied Mechanics and Materials, 2012, Vol. 105–107. — P. 286–293.
- 22. Комаров С. Ю., Прокофьев А. Б., Шапошников Ю. Н., Щеглов Ю. Д. Исследование колебаний трубопровода методом цифровой спекл-интерферометрии // Изв. СамНЦ РАН. 2002. Т. 4. № 1. С. 87–90.
- 23. Bu N., Ueno N., Koyanagi S., Ichiki M., Fukuda O., and Akiyama M. Experimental studies on vibration testing of pipe joints using metal gaskets, Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Instrumentation, Measurement, Circuits & Systems, Hangzhou, China, April 15–17, 2007. P. 204–209.
- Bagchi K., Gupta S. K., Kushari A., and Iyengar N. G. R. Experimental study of pressure fluctuations and flow perturbations in air flow through vibrating pipes, J. of Sound and Vibration, 2009, Vol. 328, No. 4–5. — P. 441–455.
- **25.** Al-Sahib N. K. A., Jameel A. N., and Abdulateef O. F. Investigation into the Vibration Characteristics and Stability of a Welded Pipe Conveying Fluid, Jordan J. of Mechanical and Industrial Engineering, 2010, Vol. 4, No. 3. P. 378–387.
- 26. Колесников Ю. И., Федин К. В., Каргаполов А. А., Еманов А. Ф. О диагностировании потери устойчивости опор трубопроводов по акустическим шумам // ФТПРПИ. — 2012. — № 4. — С. 59–67.
- 27. Еманов А. Ф., Каргаполов А. А., Колесников Ю. И., Федин К. В. Диагностирование потери устойчивости опор трубопроводов по акустическим шумам: лабораторный эксперимент // Вестн. НГУ. Серия: Математика, механика, информатика. — 2013. — № 4. — С. 84–90.
- **28.** Рычков С. П. MSC.visualNASTRAN для Windows. Москва: НТ Пресс, 2004. 552 с.

Поступила в редакцию 19/II 2019 После доработки 25/III 2019 Принята к публикации 26/III 2019