

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

К. В. ФЕДИН

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ  
СТОЯЧИХ ВОЛН  
НА ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

Учебно-методическое пособие

НОВОСИБИРСК  
2022

УДК 550.344.33 : 550.8(075.8)

Ф 326

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук *Г. М. Митрофанов*

канд. техн. наук, ст. науч. сотр. *И. В. Михайлов*

Работа подготовлена на кафедре геофизических систем и утверждена Редакционно-издательским советом университета в качестве учебно-методического пособия для студентов старших курсов, специализирующихся в геофизике и геофизических методах разведки полезных ископаемых

**Федин К. В.**

Ф 326

Практическое применение стоячих волн на инженерных сооружениях : учебно-методическое пособие / К. В. Федин. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2022. – 44 с.

ISBN 978-5-7782-4622-5

Излагается введение в теорию и практику экспериментальных методов геофизики.

Рассматривается теория и практика геофизических методов исследования, а именно выделение стоячих волн из микросейсм, измерение скоростей на образцах, математическое моделирование методом конечных элементов, определение потери устойчивости опор трубопроводов и колонн газовых скважин.

Приведена область применения данных методов. Обсуждаются результаты, которые необходимо получить в ходе данного курса.

Предназначено для студентов старших курсов, изучающих геофизические методы разведки полезных ископаемых.

УДК 550.344.33 : 550.8(075.8)

ISBN 978-5-7782-4622-5

© Федин К. В., 2022

© Новосибирский государственный  
технический университет, 2022

## ВВЕДЕНИЕ

Упругие стоячие волны широко используются в сейсмоакустических исследованиях разного масштаба. На «микроуровне» в резонансных измерениях используются стоячие волны различных типов (продольные стержни, кручения, изгибы), которые долгое время были основным методом исследования упругих и впитывающих свойств горных пород в лабораторных условиях. Упругие стоячие волны на планетарном уровне – это естественные колебания Земли, изучение которых дает информацию о ее внутренней структуре, вещественном составе, характеристиках вращения и т. д.

На промежуточных уровнях стоячие волны наиболее широко используются в инженерной сейсмологии, где, в частности, они используются при обследовании зданий и сооружений в основном для оценки их технического состояния и сейсмостойкости. В большинстве случаев в этих исследованиях колебания в тестируемых конструкциях стимулируются с помощью искусственных источников, что позволяет изучать собственные частоты, уменьшение затухания колебаний и в некоторых случаях – форму стоячих волн. Однако обследование сооружений с искусственными источниками – трудоемкая операция, требующая больших временных и материальных затрат.

В последние годы прорывной методикой стало применение инженерной сейсмологии – в сейсмическом микрорайонировании [20, 21, 22, 23, 34, 35]. Выделение из зарегистрированного на исследуемом участке микросейсмического поля его когерентных составляющих (стоячих волн) позволяет определять резонансные частоты верхней части разреза (ВЧР), строить карты усиления колебаний на собственных частотах, оценивать точность определения коэффициентов усиления.

Несмотря на то, что эта методика в настоящее время достаточно активно используется в практике инженерных сейсмологических исследований, перспективы ее применения для решения многих задач инженерной сейсмологии еще полностью не изучены. В связи с этим становится актуальным экспериментальное исследование возможностей методики на модельных объектах с хорошо управляемой геометрией и физическими характеристиками. Кроме того, такое моделирование позволяет изучить характер влияния определенных факторов на поле стоячей волны. На основе теории подобия волновых явлений результаты физического моделирования могут быть в дальнейшем экстраполированы на реальные объекты.

Настоящее пособие предназначено для студентов старших курсов, которые специализируются по геофизике и геофизическим методам разведки полезных ископаемых. Приводится ряд экспериментальных работ, каждая из которых решает важные задачи в геофизике.

# **1. ДИАГНОСТИКА ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ОПОР ТРУБОПРОВОДОВ ПО АКУСТИЧЕСКИМ ШУМАМ (ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)**

Трубопроводы широко применяются при обустройстве и эксплуатации месторождений полезных ископаемых. На предприятиях, связанных с разработкой твердых полезных ископаемых, различные виды трубопроводов используются в системах вентиляции и пожаротушения в качестве гидро- и пневмотранспорта для перемещения полезных ископаемых, отходов их обогащения, породы для закладки выработанного пространства и т. д. В нефтегазовом комплексе трубопроводный транспорт является одним из важнейших элементов, без нормального функционирования которого развитие этой отрасли народного хозяйства невозможно.

Значительная часть трубопроводов сооружается в надземном исполнении – на опорах или эстакадах, обеспечивающих некоторый зазор между трубой и грунтом. В таких трубопроводах создаются благоприятные условия для формирования стоячих волн в пролетах трубы между соседними креплениями, которые характеризуются набором собственных частот, зависящих от длины пролетов, материала и диаметра трубы, толщины ее стенок и др. При определенных условиях на этих частотах могут возникать резонансы, повышающие вероятность повреждения участка трубопровода. К возникновению резонансов могут приводить как природные (ветровая нагрузка, осадки, сейсмические воздействия и т. д.), так и техногенные (движение транспорта, различные технологические процессы, воздействие на трубу потока транспортируемого вещества и др.) факторы. Особенно опасны низкочастотные резонансы,

вызываемые мощными периодическими или квазипериодическими воздействиями – динамическими нагрузками трубопроводов от вращающихся неуравновешенных роторов насосов и турбоагрегатов, мощными вибрациями различных механизмов, например, в процессе интенсификации добычи нефти и т. д.

Частичная или полная потеря устойчивости опор трубопровода, например вследствие выпучивания или просадки грунта под ними, приводит наряду с возрастанием изгибных напряжений в трубах к фактическому увеличению длины пролетов и, как следствие, к понижению их собственных частот. Это еще больше увеличивает опасность возникновения низкочастотных резонансов, которые могут привести к повреждению или даже к разрушению участка трубы [1].

Документами, регламентирующими строительство и эксплуатацию трубопроводов, предусмотрено проведение расчетов их собственных частот и форм колебаний [2]. Методам таких расчетов при разных условиях закрепления участков трубы посвящено много работ, например [4, 12]. В то же время стандартные методы инструментального контроля трубопроводных систем, данные которых можно было бы сравнивать с расчетами, не ориентированы на определение собственных частот и форм колебаний [2].

В лабораторных экспериментах исследование влияния различных факторов на динамические характеристики трубопроводов, в том числе на их собственные частоты и формы колебаний, проводят, как правило, путем возбуждения в моделях или отдельных элементах трубопроводов колебания с помощью искусственных источников. Такими источниками могут быть ударные воздействия [3, 10, 13, 14, 15], осциллирующие механические колебания [10, 16, 17], резкое изменение давления в трубе [18, 19] и др. Однако для изучения колебаний трубопроводов *in situ* и тем более для создания систем их мониторинга применение искусственных источников во многих случаях затруднено или даже невозможно.

В настоящей работе на результатах физического моделирования иллюстрируется возможность оценки собственных частот и форм колебаний участков трубопроводов по зарегистрированным на поверхности трубы акустическим шумам. Кроме того, показано, что анализ форм колебаний позволяет однозначно диагностировать потерю устойчивости любой из опор исследуемого участка трубопровода.



в ее радиальном направлении. После установки передвижного датчика в каждой точке профиля производилась синхронная цифровая запись шумовых сигналов от обоих датчиков. Длительность регистрации при каждом положении передвижного датчика составляла примерно 6,5 с при частоте дискретизации 100 кГц.

## 1.2. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Вначале была проведена оценка собственных частот участка трубы между вторым и третьим хомутом. Для этого по записям, зарегистрированным передвижным датчиком, был рассчитан осредненный по времени (после разбиения исходных записей на отрезки по 4096 отсчетов) и по всем точкам профиля амплитудный спектр (рис. 2). На спектре отчетливо выделяются семь пиков, которые, как показало сопоставление с результатами расчетов методом конечных элементов с помощью программного комплекса MSC Nastran, соответствуют частотам первых семи мод изгибных стоячих волн в отрезке трубы длиной 50 см с закрепленными концами. Отличие определенных экспериментально собственных частот от рассчитанных методом конечных элементов не превышало 2 %.

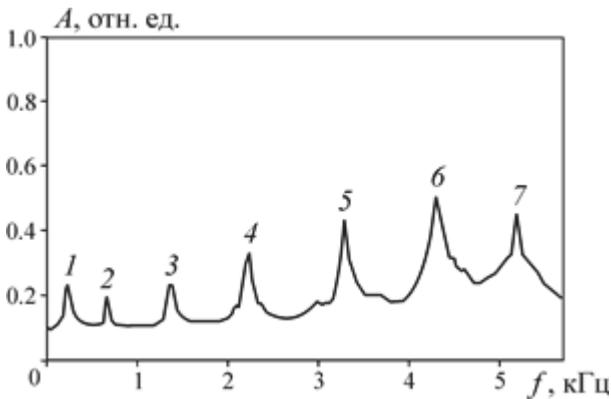


Рис. 2. Амплитудный спектр, осредненный по времени и по всем точкам профиля, при жестком закреплении пролета трубы:

$A$  – амплитуда;  $f$  – частота. Цифрами отмечены пики, соответствующие первым семи модам изгибных стоячих волн

Определение форм колебаний по данным, полученным в разных точках трубы в разные периоды времени, осложнено тем, что шумовое поле как в реальных объектах, так и в рассматриваемой модели в общем случае не является стационарным. Даже для одной и той же точки наблюдений при разных реализациях шумового воздействия форма спектров зарегистрированных сигналов может существенно меняться. Поэтому непосредственно по записям, полученным в разных точках профиля в разное время, определить геометрические формы стоячих волн, как правило, невозможно.

Однако при наличии синхронных пар записей, зарегистрированных в передвижной и опорной точках наблюдений, можно решить эту проблему применением специальных методов обработки данных. В частности, для обработки было использовано программное обеспечение, разработанное и применяемое в Геофизической службе СО РАН как часть ориентированной на использование малоканальной аппаратуры методики обследования зданий и сооружений. Эта методика позволяет по данным, полученным при разновременных наблюдениях в разных точках исследуемого объекта, и дополнительным данным, синхронно записанным в одной или нескольких неподвижных опорных точках, выделять когерентные колебания, связанные со стоячими волнами, на фоне некогерентного шума. Подробно методика описана в [20, 21, 22].

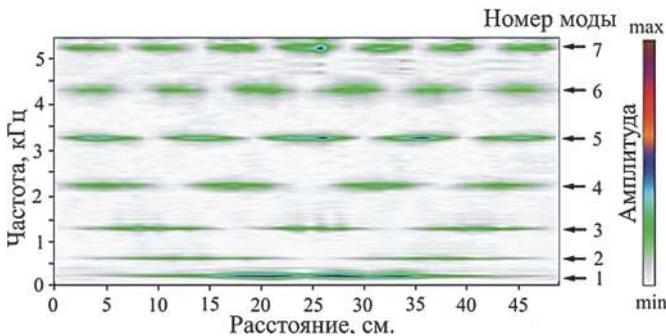


Рис. 3. Поле изгибных стоячих волн на участке трубы с жестко закрепленными краями:

$f$  – частота;  $R$  – расстояние вдоль профиля;  $N$  – номер моды изгибных стоячих волн

Совместная визуализация амплитудных спектров (рис. 3), полученных при обработке по данной методике шумовых записей для каждой

передвижной точки, позволяет убедиться, что наблюдаемые на осредненном спектре (см. рис. 2) пики соответствуют именно первым семи модам изгибных стоячих волн. Как можно видеть из рисунка, каждый номер моды совпадает с числом пучностей на соответствующей собственной частоте, т. е. с числом полудлин изгибных волн, укладываемых на профиле между местами жесткого крепления трубы. Для всех мод на краях рисунка наблюдаются минимумы амплитуд, что и следовало ожидать, так как это узловые точки, соответствующие местам крепления трубы.

### 1.3. ВЛИЯНИЕ СНИЖЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ОПОР НА ПОЛЕ СТОЯЧИХ ВОЛН В ТРУБЕ

Частичная потеря устойчивости одной из опор трубопровода имитировалась с помощью тонкой резиновой прокладки, подложенной на жесткое основание под хомут (третий хомут, см. рис. 2) и трубу. На рис. 4, а показано, как изменилось поле изгибных стоячих волн на том же профиле наблюдений (между вторым и третьим хомутом). Хотя низшую моду выделить не удастся, отчетливо видно, что структура поля резко отличается от случая жесткого крепления всех опор (рис. 4).

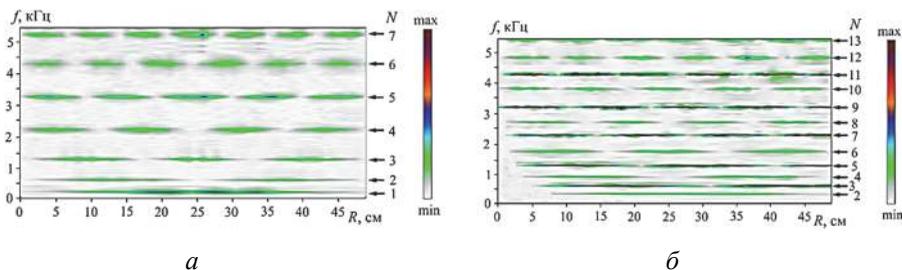


Рис. 4. Поле изгибных стоячих волн на участке трубы с жестко закрепленными краями (а) и с потерей устойчивости (б):

$f$  – частота;  $R$  – расстояние вдоль профиля;  $N$  – номер моды изгибных стоячих волн

Число мод изгибных колебаний в том же частотном диапазоне возросло почти вдвое, из чего следует, что в данном случае колебания происходят на участке с двойным пролетом. Снижение жесткости одного из креплений привело к тому, что в этом месте (соответствующем правому краю, рис. 5, а) только для четных мод наблюдаются узловые

точки, да и то лишь потому, что первоначальные пролеты имели одинаковую длину. Поэтому в образовавшемся двойном пролете, хотя и демпфированном в середине нежестким креплением, узловые точки четных мод приходятся как раз на середину пролета. Нечетные же моды двойного пролета в его середине имеют пучности. Еще одна интересная особенность: по сравнению с четными модами, для которых ослабленное крепление попадает в одну из узловых точек, нечетные амплитуды имеют более высокие значения.

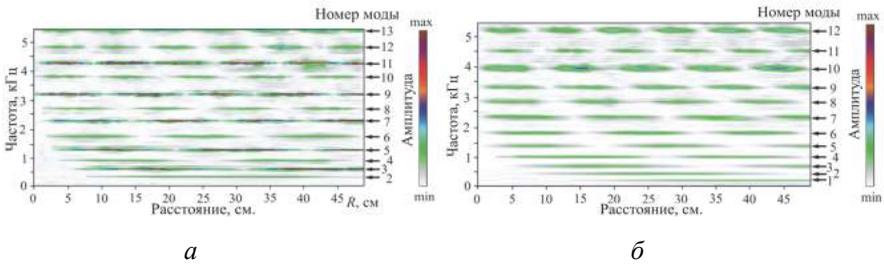


Рис. 5. Поле изгибных стоячих волн для того же (см. на рис. 4) участка трубы в случае пониженной жесткости крепления (*а*) и при его отсутствии (*б*)

Нужно также отметить, что моды с одинаковой примерно полудлиной изгибной волны, которая определяется расстоянием между соседними узлами или соседними пучностями на профиле наблюдений, имеют повышенные частоты в случае нежесткого крепления одного из хомутов по сравнению со случаем двух жестких креплений. Например, если четвертой моде, изображенной на рис. 3, имеющей четыре пучности на отрезке трубы 50 см, соответствует частота примерно 2,2 кГц, то восьмая мода, представленная на рис. 5, *а*, имеющая то же число пучностей на том же отрезке, наблюдается на частоте около 2,7 кГц. Более детально этот эффект иллюстрируется графиком (рис. 6), на котором частоты шести низших мод жестко закрепленного одинарного пролета трубы обозначены ромбическими маркерами, а частоты шести низших **четных** мод двойного пролета, демпфированного посередине ослабленным креплением, – квадратными маркерами.

Тот факт, что снижение жесткости крепления хомута, имитирующее частичную потерю устойчивости опоры трубопровода, фактически приводит к увеличению длины колеблющегося между жесткими опорами

участка трубы, подтверждается экспериментом, в котором средняя опора (третий хомут, изображенный на рис. 2) была полностью удалена. Поле изгибных стоячих волн для этого случая приведено на рис. 5, б. Как можно видеть, в целом картина подобна изображенной на рис. 5, а, за исключением того, что частоты одноименных мод здесь несколько выше (см. рис. 6, треугольные маркеры), а амплитуды четных и нечетных мод сопоставимы по величине.

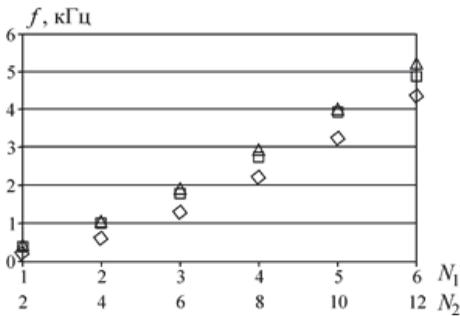


Рис. 6. Сравнение собственных частот для первых шести мод изгибных колебаний жестко закрепленного одинарного пролета трубы (номера мод  $N_1$ , ромбические маркеры) и для первых шести четных мод изгибных колебаний пролета двойной длины (номера мод  $N_2$ , квадратные маркеры – двойной пролет в средней точке демпфирован ослабленным креплением, треугольные маркеры – это крепление отсутствует)

Из результатов экспериментов также следует, что если бы первоначально соседние пролеты трубы имели разную длину, то потеря устойчивости разделяющей их опоры привела бы к исчезновению и других узлов в месте ее крепления к трубе (по крайней мере, части из них). В этом легко убедиться, если мысленно провести вертикальную прямую на рис. 5, б, например, на отметке 45 см. Ни один узел выделенных на рисунке мод не попадет в окрестность этой прямой, хотя если бы в этом месте труба была жестко закреплена, то все моды имели бы здесь узловые точки.

Таким же образом были проведены эксперименты с нежестким креплением двух соседних опор (с резиновыми прокладками под вторым и третьим хомутом, рис. 2), а также при их отсутствии. Результаты здесь не приводим, отметим лишь, что в этом случае, как и следовало ожидать, число мод в том же частотном диапазоне возрастает примерно в три раза по сравнению со случаем жесткого крепления всех хомутов, а в местах крепления второго и третьего хомута узлы наблюдаются только у каждой третьей моды.

Кроме того, была выполнена серия экспериментов с той же моделью участка трубопровода (рис. 2), но для полностью заполненной водой трубы. Полученные результаты в целом аналогичны описанным выше для пустой трубы, с той лишь разницей, что изменились частоты, на которых были выделены из шумового поля стоячие волны. Характер изменения собственных частот  $f_1$  изгибных колебаний жестко закрепленных по краям пролетов одинарной и двойной длины (50 и 100 см соответственно) при заполнении трубы водой относительно собственных частот  $f_0$  таких же пролетов пустой трубы иллюстрирует рис. 6. Наблюдавшееся в экспериментах относительное изменение собственных частот для одинарного пролета на рисунке показано треугольными, а для двойного пролета – круглыми маркерами. Так же, как и на рис. 5, приведены данные по первым шести модам для пролета одинарной длины и по первым шести *четным* модам для пролета двойной длины. Каждая пара соответствующих точек из этих двух наборов данных характеризуется примерно равными расстояниями между соседними узлами и пучностями на профиле наблюдений и близкими собственными частотами.

Обращает на себя внимание разный характер изменения собственных частот при заполнении трубы водой для пролетов одинарной и двойной длины. Если для двойного пролета заполнение трубы водой приводит к понижению собственных частот всех рассмотренных мод, то для одинарного пролета трубы с водой собственные частоты четырех низших мод повышены в сравнении с пустой трубой. При этом и для одинарного, и для двойного пролета наличие воды в трубе наиболее сильно влияет на собственные частоты низших мод изгибных колебаний. Близкие результаты, представленные на рис. 7 ромбическими и квадратными маркерами, показали и расчеты методом конечных элементов, выполненные с помощью программного комплекса MSC Nastran.

В заключение отметим, что хотя в последние годы теоретически обоснована возможность диагностирования качества закрепления участков трубопроводов только по их собственным частотам [23–26], сами авторы этих работ отмечают неединственность решения такой обратной задачи. Действительно, изменение условий крепления на любом из двух концов участка трубы может приводить к одинаковым изменениям собственных частот.

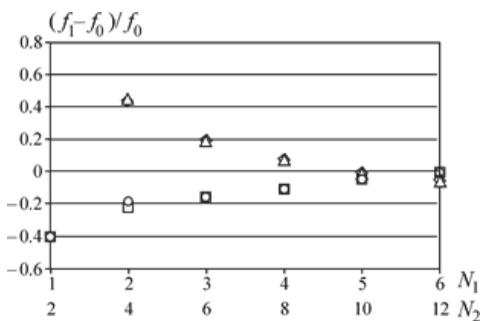


Рис. 7. Относительное изменение собственных частот при заполнении трубы водой для первых шести мод изгибных колебаний пролета трубы одинарной длины (номера мод  $N_1$ , треугольные маркеры – эксперимент, ромбические – численные расчеты) и первых шести четных мод пролета двойной длины (номера мод  $N_2$ , круговые маркеры – эксперимент, квадратные – численные расчеты)

Дополнительная информация о формах колебаний, которая, как показано в настоящей работе, может быть получена при обработке зарегистрированных на поверхности трубы акустических шумов, позволяет однозначно диагностировать потерю устойчивости конкретной опоры.

## ВЫВОДЫ

Результаты физического моделирования показали, что частоты и геометрические формы изгибных стоячих волн в трубопроводе могут быть определены по зарегистрированным на поверхности трубы акустическим шумам. Эта информация может быть использована для оценки устойчивости опор трубопровода. Частичная или тем более полная потеря устойчивости, увеличивающая пролеты между местами жесткого крепления трубы, проявляется в резком изменении структуры поля изгибных стоячих волн, формирующихся в трубе под действием акустических шумов. Если в месте жесткого крепления трубы всегда образуются узлы стоячих мод, то при ослаблении жесткости эта закономерность нарушается. В частности, при одинаковой длине первоначальных пролетов в месте нежесткого крепления одной из опор у четных мод изгибных стоячих волн наблюдаются узлы, а у нечетных – пучности.

## **2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НАДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ (ПОЛЕВОЙ ЭКСПЕРИМЕНТ)**

Трубопроводы широко применяются в различных сферах деятельности человек. Они используются 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. В нефтегазовой промышленности трубопроводный транспорт вообще является одним из важнейших компонентов, обеспечивающих ее нормальное функционирование и развитие.

В то же время 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 происходит от пятидесяти до ста крупных аварий, к которым относятся события, приводящие к существенному экономическому ущербу, травматизму, смертельным случаям и т. д. Актуальной задачей поэтому является разработка методов диагностирования и мониторинга состояния объектов трубопроводного транспорта.

Для выявления опасных факторов, которые могут привести к авариям на трубопроводах, могут быть различные подходы. В настоящее

время основными являются прямые методы – от визуального осмотра до анализа спутниковых снимков, а для выявления неявных, но тем не менее потенциально опасных дефектов используются, как правило, косвенные методы, основанные на различных физических принципах. В основном – это анализ разного рода вибраций в трубах, вызванных работой насосов, турбулентностью потока жидкости или газа, кавитацией, гидроударами [27], а также активные и пассивные акустические методы [28–32].

Часть трубопроводов (или их отдельные участки) сооружается 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 устойчивость отдельных участков трубопроводов 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 креплением. Вместе с тем 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 [23, 33], что собственные частоты изгибных колебаний трубопровода можно использовать для определения краевых условий (т. е. вида закрепления трубы) на концах его пролетов.

Для определения собственных частот элементов трубопроводов могут использоваться различные приемы. Например, это можно делать путем возбуждения в них колебаний с помощью искусственных источников, таких как ударные воздействия [3, 10, 18, 13, 15, 14, 19, 16, 17]. Однако, как отмечено в работах [23, 33], только по собственным частотам изгибных колебаний трубопровода невозможно однозначно

диагностировать, на каком конце пролета трубы произошло снижение жесткости ее закрепления. Действительно, одинаковое изменение условий крепления на любом из двух концов участка трубы должно приводить к одинаковым изменениям собственных частот этого участка.

В работах [22, 34, 35] на результатах физического моделирования было 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 ее жесткими опорами. Для этого достаточно накапливать амплитудные спектры большого числа записей акустического шума. Показано также, что эта информация позволяет однозначно диагностировать нарушение жесткого крепления трубы к любой опоре исследуемого участка надземного трубопровода.

В лабораторных экспериментах [22, 34, 35] акустический шум в трубах генерировался с помощью искусственного источника. Цель настоящей работы – оценить применимость такого метода диагностирования технического состояния опор надземных трубопроводов в натуральных условиях без привлечения искусственных источников шумов.

## **2.1. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ**

В качестве объекта исследования были выбраны несколько участков надземного трубопровода (теплотрассы), состоящего из двух параллельных стальных труб диаметром 46 см, в основном покрытых теплоизоляционными материалами. Через каждые 10 м трубы жестко приварены к массивным стальным опорам (рис. 8, *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 без нарушения теплоизоляции и без закрепления на более высокие стальные стойки (рис. 8, *б*). Поскольку жесткое крепление труб к таким стойкам отсутствовало, их можно рассматривать как некоторый аналог опор с пониженной устойчивостью.

Для регистрации акустических шумов были выбраны три пролета одной из труб. В одном из них труба была жестко прикреплена с двух сторон к опорам, как показано на рис. 8, *а*, в то время как в двух других

пролетах с одной стороны было такое же жесткое крепление, а с другой труба лежала на стойках, как показано на рис. 8, б. Измерения проводились с помощью одноканальных цифровых регистраторов Texan (RefTek-125A) и вертикальных геофонов GS-20DX (рис. 8, в). 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.



*а*

*б*

*в*

*Рис. 8.* Участок трубопровода с жестким креплением труб к опоре (*а*); трубы, уложенные на стойку без жесткого крепления (*б*); регистратор, установленный на трубе геофоном (*в*)

Нужно заметить, что теплоснабжение по данному трубопроводу производится по открытой схеме, при которой в зимний период задействованы обе трубы, а в летний только одна – по ней потребителям поставляется горячая вода. Поскольку работы проводились летом, то для проведения 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.

## 2.2. ИЗГИБНЫЕ ВОЛНЫ В ТРУБЕ, ЖЕСТКО ЗАКРЕПЛЕННОЙ С ДВУХ СТОРОН

В общем случае 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, показаны на рис. 9. Как можно видеть, кроме изгибных мод (рис. 9, *а–в*) в таком отрезке трубы могут образовываться и моды других типов (рис. 9, *г–е*). Но, как показали результаты моделирования, амплитуды изгибных мод намного превышают амплитуды мод других типов в том же частотном диапазоне (на рис. 9 для наглядности амплитуды колебаний многократно увеличены, причем непропорционально для разных мод). Поэтому естественно было предположить, что и в натуральных условиях моды изгибных стоячих волн должны доминировать над модами других типов, что и подтвердилось в дальнейшем.

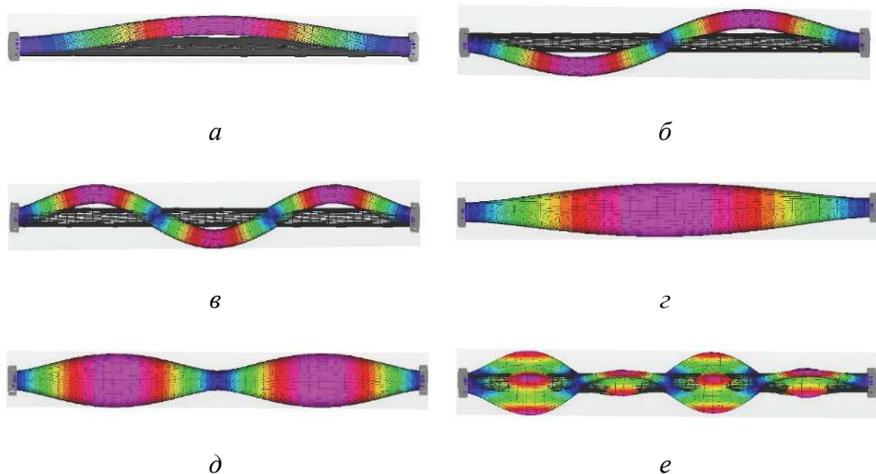


Рис. 9. Примеры рассчитанных методом конечных элементов форм собственных колебаний жестко закрепленной с двух сторон трубы

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 квази-регулярные пики, которые, как будет показано далее, соответствуют изгибным стоячим волнам. Для более точного определения частот этих пиков также строился обобщенный спектр, осредненный по всем точкам профиля. Обобщенный спектр для пролета трубы между двумя жесткими опорами показан на рис. 10.

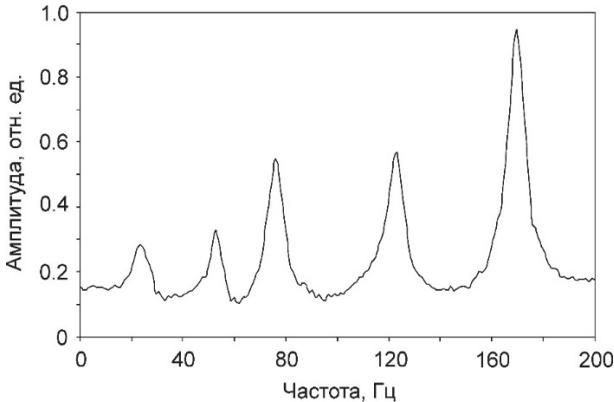


Рис. 10. Обобщенный амплитудный спектр, полученный при осреднении по времени и по всем точкам наблюдений спектров шумовых записей, зарегистрированных на поверхности трубы между двумя жесткими опорами

Совместная визуализация осредненных спектров, полученных для всех точек наблюдений в жестко закрепленном с двух сторон пролете трубы (рис. 11), позволяет убедиться, что наблюдаемые на амплитудных спектрах пики соответствуют именно стоячим волнам. Как видно из рисунка, на некоторых частотах (собственных частотах закрепленного участка трубы) наблюдается 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. Наглядные примеры для изгибных колебаний трубы показаны на рис. 9, а–в. Можно с большой долей уверенности утверждать, что это именно изгибные стоячие волны, поскольку, как отмечалось выше, в трубах эти волны доминируют над стоячими волнами других типов.

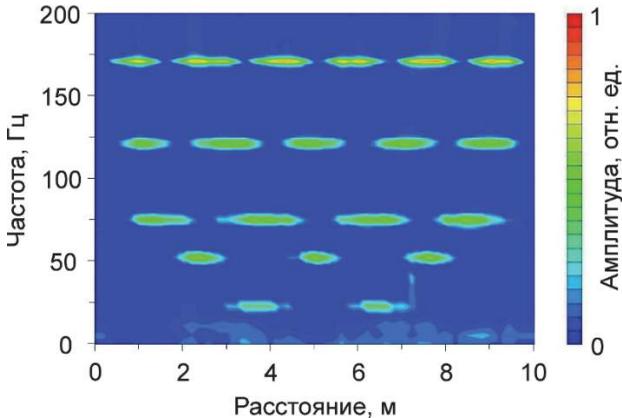


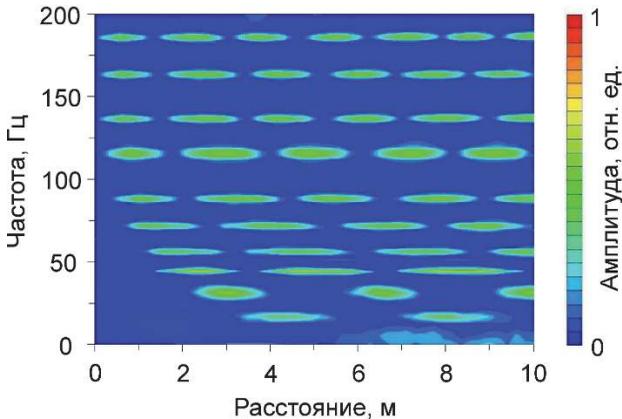
Рис. 11. Распределение осредненных амплитудных спектров шумовых записей в жестко прикрепленном к опорам с двух сторон участке трубы

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.

### 2.3. 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. 8, б), полученное по осредненным спектрам распределение амплитуд колебаний в плоскости частота–расстояние существенно меняется. Пример для одного из двух таких исследованных пролетов показан на рис. 12. Сравнивая это распределение с показанным на рис. 11, можно отметить, что резкие квазирегулярные пики на спектрах для трубы с двумя жесткими креплениями (см. рис. 11) расположены на оси частот примерно в два раза реже, чем для трубы, жестко закрепленной только с одной стороны (рис. 13).

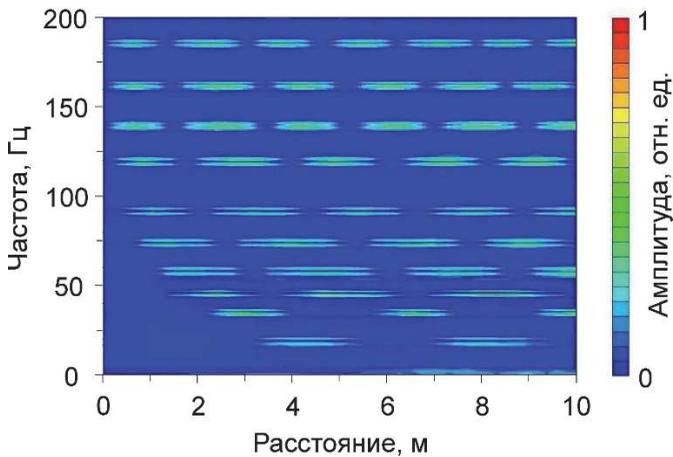
Такая закономерность означает, что во втором случае, когда одно из креплений ослаблено, генерируемые шумами изгибные стоячие волны образуются в двойном (двадцатиметровом) пролете, а на рис. 13 фактически представлено распределение спектров в его половине. Это подтверждают и особенности распределения пучностей и узлов стоячих волн в рассматриваемом десятиметровом пролете. Так, в отличие от рис. 11 на рис. 12 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, приходится пучности 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 [34, 35].



*Рис. 12.* Распределение осредненных амплитудных спектров шумовых записей на первом участке трубы, жестко закрепленной с одной (отметка 0) и свободно лежащей на стойке с другой (отметка 10 м) стороны

Для второго из двух исследованных пролетов трубы с одним жестким и другим «ослабленным» креплением к опорам распределение амплитудных спектров вдоль пролета имеет еще более сложный вид (рис. 13). Хотя в общих чертах распределения, представленные

на рис. 12 и 13, похожи, но на рис. 13 (в отличие от рис. 12) наблюдается своего рода «раздвоение» спектральных пиков, частоты которых тем не менее близки к частотам пиков, наблюдаемых на рис. 12. Одно из возможных объяснений этих отличий состоит в том, что в первом случае (см. рис. 12) труба практически не взаимодействует со стойкой, над которой она проходит, а во втором случае (см. рис. 13) 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 друг от друга собственных частотах (если определять порядок числом узлов в двойном пролете трубы).



*Рис. 13.* Распределение осредненных амплитудных спектров шумовых записей на втором участке трубы, жестко закрепленной с одной (отметка 0) и свободно лежащей на стойке с другой (отметка 10 м) стороны

Тем не менее распределения спектров, показанные и на рис. 12, и на рис. 13, кардинально отличаются от распределения, представленного на рис. 11, во-первых, 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.

#### **2.4. СОПОСТАВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С РЕЗУЛЬТАТАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Использованный способ визуализации амплитудных спектров (рис. 11–13) позволяет оценивать распределение узлов и пучностей стоячих волн в пролете трубы, но, строго говоря, не дает однозначного ответа о типе этих волн. Так, распределение узлов и пучностей, подобное показанному на рис. 11, *a*, могут иметь не только изгибные, но и стоячие волны других типов, например волны, формы двух низших мод которых показаны на рис. 9, *z–d*. Хотя, как уже было отмечено, 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 методом конечных элементов. Сразу заметим, что поскольку не все параметры реального объекта были известны, сравнение экспериментальных данных и результатов компьютерного моделирования носит качественный характер.

При моделировании жестко закрепленного с двух сторон одинарного пролета трубы ее внешние размеры задавались равными размерам исследуемого натурального объекта (диаметр трубы 46 см, расстояние между опорами 10 м). Элементы расчетной сетки – параллелепипеды с размерами  $4,6 \times 4,6$  мм<sup>2</sup> в плоскости сечения трубы и 10 мм в ее продольном направлении. Поскольку свойства стали и толщина стенки трубы были неизвестны, то они подбирались таким образом, чтобы частоты наблюдаемых на обобщенном экспериментальном спектре (см. рис. 10) резких пиков примерно совпадали с какими-либо из множества получаемых при компьютерном моделировании собственных частот закрепленного отрезка трубы с известными внешними размерами.

В результате моделирования выяснилось, что невозможно подобрать реалистичные свойства стали и толщину стенки трубы, для которых частоты наблюдаемых на экспериментальных спектрах пиков были бы близки к собственным частотам для каких-либо мод, кроме

изгибных. Для изгибных же мод хорошее согласие экспериментальных данных и результатов компьютерного моделирования может быть легко достигнуто подбором указанных параметров.

Один из вариантов такого подбора рассмотрен ниже. В системе конечно-элементного моделирования MSC Nastran есть возможность выбора из большого числа промышленно выпускаемых материалов с известными свойствами. В данном случае для модели трубы из этого набора материалов была выбрана одна из широко применяемых, в том числе при производстве труб, сталей. Параметры этой стали: скорость продольных волн  $V_p = 5910$  м/с, скорость поперечных волн  $V_s = 3220$  м/с, плотность  $\rho = 7,81$  г/см<sup>3</sup>.

В результате перебора разных вариантов наилучшее совпадение было получено для толщины стенки трубы, равной 1,85 см, что является вполне реалистичной величиной при диаметре трубы 46 см – трубы с близкими геометрическими параметрами выпускаются отечественной промышленностью [ГОСТ 8732–78, 2004]. Результаты сравнения частот пяти пиков обобщенного экспериментального спектра (см. рис. 10) и собственных частот, рассчитанных методом конечных элементов, показаны на рис. 14, *a*.

Как можно видеть, экспериментально определенные и полученные в результате компьютерного моделирования частоты хорошо согласуются, различия между ними не превышают 5%. Анализ форм колебаний для приведенных на рис. 14, *a* собственных частот, рассчитанных при компьютерном моделировании, показал, что это именно изгибные моды (формы трех низших мод показаны на рис. 9, *a–в*). Моды других типов колебаний соответствующих порядков кроме того, что имеют намного меньшие амплитуды, наблюдаются на более высоких частотах. Например, моды 1-го и 2-го порядков, показанные на рис. 2, *г–д*, имеют частоты 61,1 и 122,6 Гц, т. е. попадают в диапазон частот третьей–пятой мод, наблюдаемых в эксперименте.

На рис. 14, *б* приведены результаты аналогичного сравнения частот мод, наблюдаемых на рис. 11, с рассчитанными методом конечных элементов собственными частотами двойного пролета с жестким креплением трубы с двух сторон. И в этом случае частоты, определенные 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. 11 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.

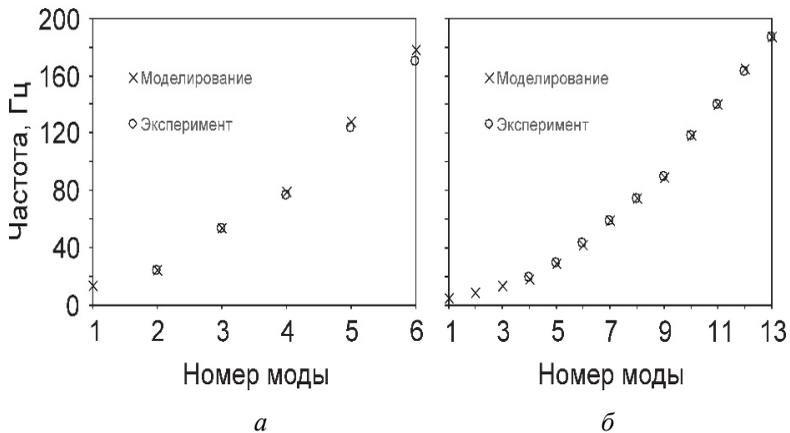


Рис. 14. Сравнение определенных экспериментально и в результате компьютерного моделирования частот мод изгибных стоячих волн для одинарного (а) и двойного (б) пролетов трубы

В третьей компьютерной модели в середине жестко закрепленного с двух сторон двойного пролета трубы снизу на нее оказывалось вертикальное демпфирующее воздействие. В этом случае 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 относительно невелики, что затрудняет их графическое представление. Поэтому значения частот этих волн, полученных при компьютерном моделировании, приводятся в табличном виде (табл. 1). Для сравнения в этой таблице приведены также собственные частоты двойного пролета без демпфирования.

**Сравнение частот изгибных мод двойного пролета трубопровода  
(компьютерное моделирование)**

Номер моды	Частота, Гц		
	Без демпфера	С демпфером посередине (вертикальная мода)	С демпфером посередине (наклонные моды)
1	5,3	4,1	5,6
2	8,7	8,0	9,9
3	13,4	12,1	13,8
4	18,5	18,4	20,2
5	28,7	34,8	37,1
6	42,3	42,0	44,2
7	59,0	56,1	58,2
8	74,3	74,3	77,2
9	89,4	91,5	94,5
10	118,4	118,8	121,7
11	140,0	138,1	143,8
12	164,8	161,9	166,2
13	187,2	184,9	188,7

Нужно заметить, что параметры демпфирующего элемента при компьютерном моделировании выбирались произвольно из стандартных установок конечно-элементной 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 показывают, что кажущееся «раздвоение» мод, наблюдаемое на экспериментальных спектрах, показанных на рис. 12, может объясняться демпфированием трубы, обмотанной теплоизоляцией и опирающейся на стойку в средней части двойного пролета.

## ВЫВОДЫ

Результаты натурных экспериментов показали, 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, хотя бы некоторые моды изгибных стоячих волн могут иметь конечные амплитуды, в том числе и пучности.

Таким образом, 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 методом конечных элементов.

### **3. СПОСОБ ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКИ УСТОЙЧИВОСТИ КОЛОНН ГАЗОВЫХ СКВАЖИН МЕТОДОМ СТОЯЧИХ ВОЛН**

Изобретение относится к области геофизических методов контроля состояния колонн газовых скважин при их эксплуатации.

Одна из актуальных проблем диагностики устойчивости колонн газовых стволов скважин связана с появлением потери устойчивости колонн скважин. Потеря устойчивости может возникать вследствие размыва грунта, сезонных изменений, вызванных вспучиванием грунта при замерзании и проседанием при оттаивании, и т. д. Возникновение потери устойчивости в конечном итоге может привести к разрушению колонны газовой скважины, что может спровоцировать аварийную ситуацию на кусте газовой скважины (КГС).

Для обеспечения безопасной эксплуатации колонн газовых скважин (ГС) необходимо периодически контролировать их состояние. Такой контроль может осуществляться различными методами – с помощью визуального осмотра, измерением прогиба дефлектометрами, контролем верхней части разреза около скважин и т. д. [37, 27, 31, 28, 32, 30, 29].

Несмотря на разнообразие применяемых для контроля колонн газовых скважин методов и решаемых с их помощью задач, точность и достоверность получаемых результатов не всегда соответствует предъявляемым требованиям.

Задача изобретения – создание способа использования упругих стоячих волн для обнаружения потери устойчивости колонн газовых скважин, а также для оценки целостности колонн газовых скважин и соотношения акустических жесткостей верха и низа скважины.

**Технический результат** от использования изобретения заключается в получении диагностических критериев определения устойчивости и целостности колонн скважин с использованием метода выделения стоячих волн по накопленным амплитудным спектрам. Полученный результат позволяет контролировать длину колонны газовой скважины и уверенно идентифицировать потерю устойчивости исследуемого объекта.

Предлагаемый способ диагностики состояния устойчивости колонн газовых скважин базируется на описанном ранее пассивном сейсмическом методе [38, 39, 40], основанном на выделении из шумового поля стоячих волн, образующихся под воздействием микросейсм в пространстве между дневной поверхностью и ближайшей к ней резкой границей – верхней поверхностью полости.

Этот метод неоднократно применялся при физическом моделировании стоячих волн в различных объектах, а также был успешно опробован на результатах натуральных экспериментов.

Как показали результаты физического моделирования и натуральных экспериментов, накопление большого числа амплитудных спектров относительно коротких фрагментов шумовых записей приводит к появлению на усредненном спектре регулярных пиков, соответствующих стоячим волнам. Критерием того, что это именно стоячие волны, является регулярный характер этих пиков.

Для стоячих волн вертикального сжатия-растяжения, образующихся над свободной верхней границей полости, как на ней, так и на дневной поверхности должны наблюдаться пучности этих волн, а их частоты кратны частоте низшей моды:

$$f_n = \frac{nV_p}{2h},$$

где  $n$  – номер моды стоячих волн;  $V_p$  – скорость продольных волн;  $h$  – расстояние от верхней границы полости до дневной поверхности.

Таким образом, если на каком-либо участке местности распределение регулярных пиков усредненных амплитудных спектров на оси частот соответствует данному распределению, то это свидетельствует о наличии в таком месте подземной полости или иного включения с существенно пониженной относительно вмещающей среды скоростью.

Как будет показано ниже, указанные свойства изгибных стоячих волн могут быть использованы для выявления потери устойчивости колонн газовых скважин.

В случае колонны газовой скважины, уложенной на более мягкое основание, очевидно, что при неизменных упругих свойствах частоты стоячих волн вертикального сжатия-растяжения в ней практически не должны зависеть от того, лежит она на грунте или под ней образовалась пустота. И в том и в другом случае как на верхней, так и на нижней границе покрытия будут наблюдаться пучности стоячих волн, а их частоты определяются заданным распределением.

### **3.1. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ**

В качестве объекта исследования рассматривались колонны газовых скважин (КГС) с 3201 по 3211. Исследовались собственные колебания стволов газовых скважин методом, основанном на выделении стоячих волн из сейсмоакустических шумов. Суть метода сводится к накоплению большого числа амплитудных спектров шумовых записей, в результате чего на усредненных (или накопленных) спектрах появляются последовательности пиков, соответствующие семействам стоячих волн разных типов.

В описываемой серии экспериментов регистрация сейсмоакустических шумов проводилась в летний период исследуемых объектов. Для регистрации использовались горизонтальные и вертикальные геофоны GS20DX и одноканальные автономные цифровые регистраторы TEXAN (REFTEK-125A) с частотой дискретизации 1 кГц

Регистрация шумов производилась на внешних стенах стволов скважин. Для наилучшего контакта между датчиком и стволом скважины устанавливался магнит. Длительность непрерывной записи в каждой точке наблюдений составляла 60 мин.

### 3.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ШУМОВЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ НА КОЛОННАХ ГАЗОВЫХ СКВАЖИН

При обработке экспериментальных данных зарегистрированные в каждой колонне газовой скважины шумовые записи разбивались на фрагменты длительностью примерно по 8,2 с (8192 отсчета), вычислялись амплитудные спектры этих фрагментов и проводилось их накопление. В результате на амплитудных спектрах появлялись резкие пики, которые в случае регистрации вертикальных компонент соответствовали модам типа сжатия–расширения. На рис. 15 приведен амплитудный спектр стоячих волн в обсадных колоннах ГС КГС – вертикальная составляющая. Цифрами обозначены номера мод типа сжатия–расширения и их формы.

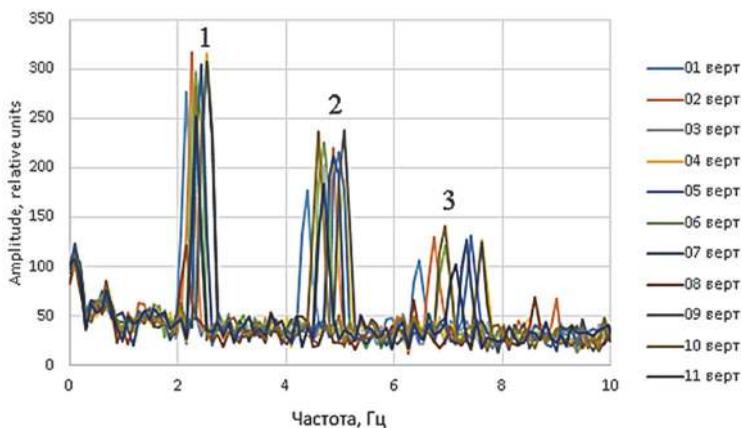


Рис. 15. Амплитудный спектр стоячих волн в обсадных колоннах ГС КГС – вертикальная составляющая. Цифрами обозначены номера мод типа сжатия–расширения и их формы

На рис. 15 видно, что частоты для каждой из скважин идут с равным интервалом, для наглядности приведены формы мод. Например, для скважины 02 частоты с первой по третью моду соответствует 2,246, 4,491 и 6,738 Гц соответственно. Если предположить, что скорость продольных волн в КГС равна примерно 5000 м/с, а длина 1200 м, то согласно такому распределению эти моды соответствуют именно модам типа сжатия–расширения для всей длины колонны ( $2,24 \text{ Гц} = 1 \cdot 5000 \text{ (м/с)} / (2 \cdot 1200) \text{ (м)}$ ).

В случае, если появляются дополнительные моды помимо основных (типа сжатия–расширения) с другим значением регулярных пиков, то это означает нарушение колонны, которую можно определить, если известна скорость распространения упругих волн в самой колонне.

На рис. 16 показан пример накопленного частотно-амплитудного спектра, где цифрами 1,2,3 (значения частот 2,539; 5,078; 7,61 Гц) обозначены моды типа сжатия–расширения, соответствующие длине скважины 1200 м, а моды I, II, III (значения частот 3,125; 6,25; 9,375 Гц) тоже типа сжатия–расширения, но соответствуют длине скважины в 800 м, что означает нарушение на этой глубине (по проекту скважина 1200 м).

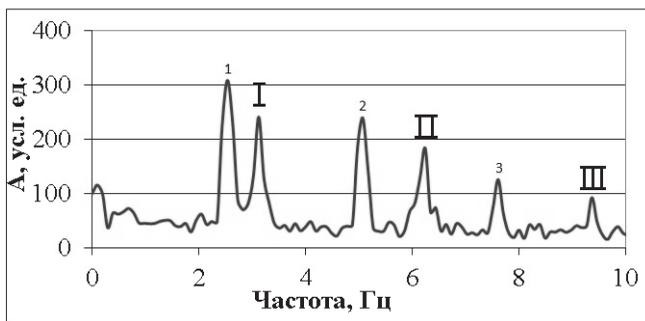


Рис. 16. Пример накопленного частотно-амплитудного спектра. Моды I, II, III типа сжатия–расширения от нарушения на этой глубине

На рис. 17 показаны результаты всех амплитудных спектров, полученных с горизонтальных геофонов. Амплитудные спектры получились несколько иного характера, для ГС 3206, 3207, 3208 наблюдаются квази-регулярные пики, которые, как будет показано ниже, соответствуют изгибным стоячим волнам. Для остальных ГС не наблюдается резких пиков, что говорит о том, что сдвиговой компоненты у них нет и они не требуют дальнейшего рассмотрения.

Полученные экспериментальные результаты показали, что метод стоячих волн может с успехом применяться для обнаружения потери устойчивости колонн газовых скважин. Кроме того, показано, что анализ стоячих волн вертикального сжатия–растяжения, возникающих в газовой колонне скважины под воздействием шумов, позволяет контролировать

ее длину и на качественном уровне оценивать соотношение акустических жесткостей верха и низа скважины. Стоит обратить внимание, что на момент съема данных не работала скважина 08, однако моды изгибного колебания четко выделяются на амплитудном спектре.

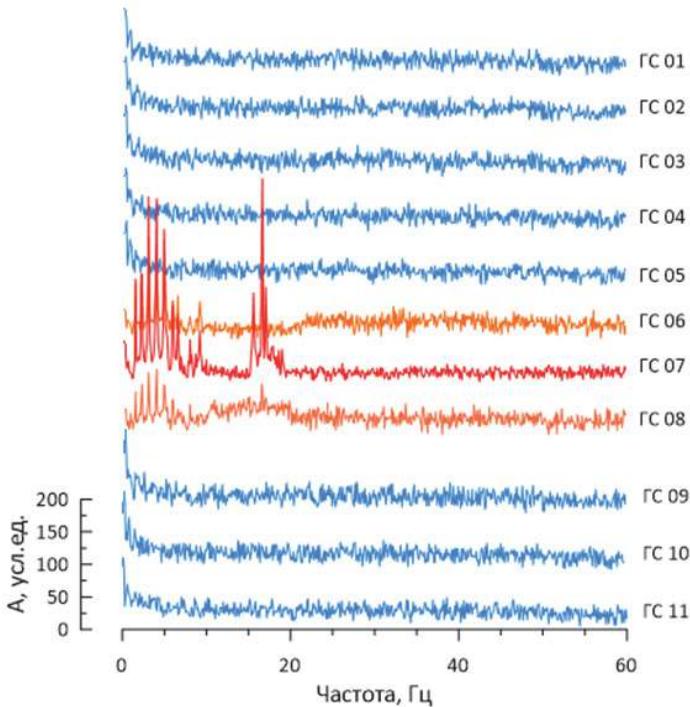


Рис. 17. Результаты всех амплитудных спектров, полученных с горизонтальных геофонов

В подтверждение полученных выводов было проведено моделирование методом конечных элементов в системе MSC Nastran. Для того чтобы определить, к какому типу мод квазирегулярные типы относятся, в системе конечно-элементного моделирования MSC Nastran была смоделирована упрощенная модель, где КГС не зафиксирована по горизонтали [22]. Учитывались следующие параметры: межколонное пространство – цемент, обсадная колонна диаметром 426 мм и длиной 120 м, кондуктор диаметром 324 мм и длиной 450 м, промежуточная

колонна диаметром 245 мм и длиной 750 м, НКТ с воронкой диаметром 114 мм и длиной 1570 м.

Поскольку свойства стали и цемента были неизвестны, то они подбирались таким образом, чтобы частоты наблюдаемых на амплитудном экспериментальном спектре (рис. 18) резких пиков примерно совпадали с какими-либо из множества получаемых при компьютерном моделировании собственных частот закрепленного отрезка трубы с известными внешними размерами. Элементы расчетной сетки – параллелепипеды с размерами  $4,6 \times 4,6 \text{ мм}^2$  в плоскости сечения трубы и 10 мм в ее продольном направлении.



Рис. 18. Сравнение компьютерного моделирования и эксперимента

В результате моделирования выяснилось: для изгибных мод хорошее согласование экспериментальных данных и результатов компьютерного моделирования может быть легко достигнуто подбором указанных параметров.

Один из вариантов такого подбора рассмотрен ниже. В системе конечно-элементного моделирования MSC Nastran есть возможность выбора из большого числа промышленно выпускаемых материалов с известными свойствами. В данном случае для модели КГС из этого набора материалов была выбрана одна из широко применяемых, в том числе при производстве труб, сталей. Параметры этой стали: скорость продольных волн  $V_p = 4910 \text{ м/с}$ , скорость поперечных волн  $V_s = 2610 \text{ м/с}$ ,

плотность  $\rho = 7,41 \text{ г/см}^3$ . Параметры цемента: скорость продольных волн  $V_p = 4310 \text{ м/с}$ , скорость поперечных волн  $V_s = 2310 \text{ м/с}$ , плотность  $\rho = 4,32 \text{ г/см}^3$ .

Результаты сравнения частот пяти пиков амплитудного экспериментального спектра для ГС 3207 и собственных частот, рассчитанных методом конечных элементов, показаны на рис. 18.

Как можно видеть, экспериментально определенные и полученные в результате компьютерного моделирования частоты хорошо согласуются, различия не превышают 5 %. Анализ форм колебаний для приведенных на рис. 18 собственных частот, рассчитанных при компьютерном моделировании, показал, что это именно изгибные моды.

Моды других типов колебаний соответствующих порядков, кроме того что имеют намного меньшие амплитуды, наблюдаются на более высоких частотах.

После того как были рассчитаны и экспериментально определены типы мод, были рассчитаны максимальные смещения для горизонтальных компонент в течение часа записей для первой и второй моды изгибных колебаний. Для этого шумовые записи с колонн газовых скважин загружались в программную среду MSC Nastran, программа рассчитывала максимальные смещения колонны для каждой из мод колебаний.

В табл. 2 приведены максимальные смещения колонны ГС для первых и вторых мод изгибных колебаний.

Полученные экспериментальные результаты показали, что метод стоячих волн может с успехом применяться для обнаружения потери устойчивости колонн газовых скважин. Стоячие волны могут быть выделены из шумового поля с помощью накопления большого числа амплитудных спектров шумовых сигналов. Получены абсолютные смещения колонны скважины как по горизонтали, так и по вертикали.

На качественном уровне это распределение согласуется с результатами проведенного компьютерного моделирования методом конечных элементов. Тот факт, что под воздействием акустического шума на некоторых колонах газовых скважин (а именно 3206, 3207, 3208) образуются изгибные стоячие волны, которые отсутствуют на других скважинах, **свидетельствует об отсутствии жесткого контакта с массивом породы**, особенно стоит обратить внимание на КГС 3207.

Для первой, второй и третьей изгибной стоячей волны оценены абсолютные смещения, записанные в течение часа, и их количество, которые находятся в диапазоне от 0,08 до 3,78 см.

Таблица 2

**Максимальные смещения колонны ГС для первых и вторых мод изгибных колебаний**

Скважины	ГС-3201- ГС-3205, ГС-3209- ГС-3211	ГС-3206	ГС-3207	ГС-3208
Максимальные смещения (для первой моды, см)	0,112	0,83	<b>3,78</b>	0,083
Количество событий за час (для первой моды, см)	13...16	3	1	2
Максимальные смещения (для второй моды, см)	0,08	0,48	1,16	0,06
Количество событий за час (для второй моды, см)	15...20	2	1	3
Максимальные смещения (для третьей моды, см)	0,04	0,12	0,67	0,02
Количество событий за час (для третьей моды, см)	6...8	1	2	1

Кроме того, показано, что анализ стоячих волн вертикального сжатия-растяжения, возникающих в газовой колонне скважины под воздействием шумов, позволяет контролировать ее длину и на качественном уровне оценивать соотношение акустических жесткостей верха и низа скважины.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ И ЗАДАЧИ

1. Упругие стоячие волны в геофизических приложениях. Какого типа волны? Где применяются?
2. Что такое стоячая волна? Уравнение стоячей волны. Что такое резонанс? (Определение узла, пучности, формы, моды стоячих волн.)
3. Собственные моды колебаний и их виды.
4. Регистрация сейсмических колебаний.
5. Сейсмические волны. Объемные волны.
6. Многоканальные исследования колебаний сооружений.
7. Понятие сейсмологии.
8. Суть метода конечных элементов.
9. Чем обусловлена интерференция бегущих волн различной физической природы?
10. Отличие изгибных и мод сжатия-расширения.
11. Скорость распространения упругих волн во льду составляет 4100 м/с, значение низшей моды (сжатия-расширения) равно 10 кГц. Какова толщина льда?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методические рекомендации по расчетам конструктивной надежности магистральных газопроводов. РД 51-4.2.-003-97. – М.: РАО «Газпром» – Ассоц. «Высоконадежный трубопроводный транспорт» – ВНИИГАЗ – ИРЦ Газпром, 1997.
2. Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов. Руководящий технический материал РТМ 38.001-94. – М.: ВНИПИнефть, 1994.
3. Прокофьев А.Б. Расчет собственных частот и форм колебаний трубопроводов с помощью программного комплекса // Известия Самарского научного центра РАН. – 1999. – № 2.
4. Lee U., Oh H. The spectral element model for pipelines conveying internal steady flow, *Engineering Structures*, 2003. – Vol. 25.
5. Tong Z., Zhang Y., Zhang Z., Hu H. Dynamic behavior and sound transmission analysis of a fluid–structure coupled system using the direct-BEM/FEM // *Journal of Sound and Vibration*. – 2007. – Vol. 299. – Pp. 645–655.
6. Нестеров С.В., Акуленко Л.Д., Коровина Л.И. Поперечные колебания трубопровода с равномерно движущейся жидкостью // ДАН. – 2009. – Т. 427. – № 6.
7. Huang Y.M., Liu Y.S., Li B.H., Li Y.J., Yue Z.F. Natural frequency analysis of fluid conveying pipeline with different boundary conditions // *Nuclear Engineering and Design*. – 2010. – Vol. 240. – Pp. 461-467.
8. Акуленко Л.Д., Коровина Л.И., Нестеров С.В. Собственные колебания участка трубопровода // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 2011. – № 1.
9. Березнев А.В. Влияние внутреннего гидростатического давления на частоты свободных колебаний криволинейного участка трубопровода // Известия вузов. Нефть и газ. – 2011. – № 3.
10. Li B.H., Gao H.S., Zhai H.B., Liu Y.S., Yue Z.F. Free vibration analysis of multispan pipe conveying fluid with dynamic stiffness method // *Nuclear Engineering and Design*. – 2011. – Vol. 241. – Pp. 666–671.

11. *Zhai H.B., Wu Z.Y., Liu Y.S., Yue Z.F.* Dynamic response of pipeline conveying fluid to random excitation // Nuclear Engineering and Design. – 2011. – Vol. 241. – Pp. 2744–2749.

12. *Mathan G., Siva Prasad N.* Study of dynamic response of piping system with gasketed flanged joints using finite element analysis // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2012. – Vol. 89. – Pp. 28–32.

13. *Salley L., Pan J.* A study of the modal characteristics of curved pipes // Applied Acoustics. – 2002. – Vol. 63. – Iss. 2.

14. *Tijsseling A.S., Vardy A.E.* Fluid–structure interaction and transient cavitation tests in a T-piece pipe // Journal of Fluids and Structures. – 2005. – Vol. 20. – Iss. 6.

15. *Semke W.H., Bibel G.D., Jerath S., Gurav S.B., Webster A.L.* Efficient dynamic structural response modelling of bolted flange piping systems // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2006. – Vol. 83. – Pp. 767–776.

16. *Комаров С.Ю., Прокофьев А.Б., Шапошников Ю.Н., Щеглов Ю.* Исследование колебаний трубопровода методом цифровой спекл-интерферометрии // Известия Самарского научного центра РАН. – 2002. – Т. 4. – № 1.

17. *Bu N., Ueno N., Koyanagi S., Ichiki M., Fukuda O., 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, 2007. April 15–17.

18. *Mao Q., Zhang J. H., Luo Y. S., Wang H. J., Duan Q.* Experimental studies of orifice-induced wall pressure fluctuations and pipe vibration // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2006. – Vol. 83. – Iss. 7.

19. *Xie J. H., Tian K., He L., Yang T. R., 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.

20. Патент № 2150684 РФ. Способ приведения к единому времени регистрации разновременных записей измерений / А.Ф. Еманов, В.С. Селезнев, А.П. Кузьменко, В.Г. Барышев, В.С. Сабуров // Оpubл. в БИ. – 2000. – № 16.

21. *Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А. и др.* Пересчет стоячих волн при детальном инженерно-сейсмологическом исследовании // Геология и геофизика. – 2002. – Т. 43. – № 2.

22. *Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А.* Когерентное восстановление полей стоячих волн как основа детального сейсмологического обследования инженерных сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2007. – № 3. – С. 20–24.

23. *Ахтямов А.М., Шазинов В.Р.* Идентификация неупругих видов закреплений трубопроводов // Вестник Башкирского университета. – 2016. – Т. 21. – № 1.

24. *Ахтямов А.М., Сафина Г.Ф.* Диагностирование относительной жесткости упругих краевых ребер цилиндрической оболочки // Электронный журнал «Техническая акустика». – 2004. – № 19.

25. Сафина Г.Ф. Диагностирование относительной жесткости подкрепленных цилиндрических оболочек по собственным частотам их асимметричных колебаний // Контроль. Диагностика. – 2005. – № 12.

26. Сафина Г.Ф. Диагностирование закреплений трубопровода с жидкостью // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. – 2006. – № 3.

27. Olson D.E. Pipe vibration testing and analysis // American Society of Mechanical Engineers. – 2008. – 10.11151, Chapter 37.

28. Ahadi M., 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.

29. Duan W., Kirby R., Prisutova J., 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.

30. Jin H., Zhang L., Liang W., Ding Q. Integrated leakage detection and localization model for gas pipelines based on the acoustic wave method // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2014. – Vol. 27.

31. Lowe P.S., Sanderson R., Pedram S.K., Boulgouris N.V., Mudge P. Inspection of pipelines using the first longitudinal guided wave mode // Physics Procedia. – 2015. – Vol. 70.

32. Ozevin D., Harding J. Novel leak localization in pressurized pipeline networks using acoustic emission and geometric connectivity // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2012. – Vol. 92.

33. Шагиев В.Р., Ахтямов А.М. Идентификация закрепления трубопровода с использованием минимального количества собственных частот // Математические структуры и моделирование. – 2018. – № 1(45).

34. Колесников Ю.И., Федин К.В., Каргаполов А.А., Еманов А.Ф. О диагностике состояния конструктивных элементов сооружений по шумовому полю (по данным физического моделирования) // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 1. – С. 3–11.

35. Колесников Ю.И., Федин К.В., Каргаполов А.А., Еманов А.Ф. О диагностировании потери устойчивости опор трубопроводов по акустическим шумам // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 4. – С. 59–67.

36. ГОСТ 8732–78 Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент (с Изменениями № 1, 2) // Трубы металлические и соединительные части к ним. Часть 1. Трубы бесшовные гладкие: Сб. ГОСТов. – М.: ИПК Издво стандартов, 2004.

37. Datta S., Sarkar S. A review on different pipeline fault detection methods // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2016. – Vol. 41.

38. *Федин К.В.* Определение потери устойчивости опор трубопроводов по шумам (по данным физического моделирования) // Известия вузов. Горный журнал. – 2013. – № 5. – С. 128–133.

39. *Колесников Ю.И., Федин К.В.* Прямое определение резонансных свойств верхней части разреза по микросейсам: натурный эксперимент // Технологии сейсморазведки. – 2017. – № 3. – С. 5–21.

40. *Колесников Ю.И., Федин К.В., Нгомайезве Л.* О влиянии сезонных изменений резонансных свойств приповерхностных грунтов на сейсмобезопасность сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2019. – № 3. – С. 56–64.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
<b>1. Диагностика потери устойчивости опор трубопроводов по акустическим шумам (физическое моделирование) .....</b>	<b>5</b>
1.1. Методика экспериментов (физическое моделирование) .....	7
1.2. Обработка экспериментальных данных .....	8
1.3. Влияние снижения жесткости закрепления опор на поле стоячих волн в трубе .....	10
Выводы .....	14
<b>2. Экспериментальное обоснование применения акустических шумов для диагностирования надземных трубопроводов (полевой эксперимент) .....</b>	<b>15</b>
2.1. Объект исследования и методика наблюдений .....	17
2.2. Изгибные волны в трубе, жестко закрепленной с двух сторон .....	19
2.3. Изгибные волны в пролетах труб, жестко закрепленных с одной и свободно лежащих на стойках с другой стороны .....	21
2.4. Сопоставление экспериментальных данных с результатами компьютерного моделирования .....	24
Выводы .....	28
<b>3. Способ экспресс-диагностики устойчивости колонн газовых скважин методом стоячих волн .....</b>	<b>29</b>
3.1. Объект исследования и методика наблюдений .....	31
3.2. Результаты обработки шумовых данных, полученных на колоннах газовых скважин .....	32
Вопросы для самоконтроля и задачи .....	38
Библиографический список .....	39

**Федин Константин Владимирович**

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СТОЯЧИХ ВОЛН  
НА ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЯХ**

**Учебно-методическое пособие**

Редактор *Л.Н. Ветчакова*  
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*  
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*  
Компьютерная верстка *Л.А. Веселовская*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции  
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

---

Подписано в печать 18.03.2022. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 50 экз.  
Уч.-изд. л. 2,55. Печ. л. 2,75. Изд. № 182/21. Заказ № 117. Цена договорная

---

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20