

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

К. В. ФЕДИН, Д. А. ПЕЧЕНЕГОВ

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ  
ЭКСПРЕСС-МЕТОДИКИ  
ПАССИВНОЙ СЕЙСМИКИ  
ДЛЯ РЕШЕНИЯ  
ИНЖЕНЕРНЫХ ЗАДАЧ

Учебное-методическое пособие

НОВОСИБИРСК  
2023

УДК 550.834.08(075.8)

Ф326

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры  
геофизических систем *Г. М. Митрофанов*

канд. техн. наук, ст. научн. сотр. ИНГГ СО РАН *И. В. Михайлов*

Работа подготовлена на кафедре геофизических систем  
и утверждена Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебно-методического пособия для студентов  
старших курсов. Направление – геофизика и геофизические методы  
разведки полученных ископаемых

**Федин К. В.**

Ф326 Практическое применение экспресс-методики пассивной  
сейсмоки для решения инженерных задач: учебное пособие /  
К. В. Федин, Д. А. Печенегов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ,  
2023. – 76 с.

ISBN 978-5-7782-4941-7

В пособии излагается введение в теорию и практику эксперимен-  
тальных методов геофизики.

Рассматривается теория и практика геофизических методов иссле-  
дования, а именно выделение стоячих волн из микросейсм, математи-  
ческое моделирование методом конечных элементов, приводится при-  
мер применения стоячих волн на предмет диагностики технического  
состояния мостов, трубопроводов, маяков и зданий по акустическим  
шумам.

Приведена область применения данных методов. Обсуждаются ре-  
зультаты, которые необходимо получить в ходе данного курса.

Предназначено для студентов старших курсов, специализирую-  
щихся на геофизике и геофизических методах разведки полезных ис-  
копаемых.

УДК 550.834.08(075.8)

ISBN 978-5-7782-4941-7

© Федин К. В., Печенегов Д. А., 2023

© Новосибирский государственный  
технический университет, 2023

## 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. На планетарном уровне упругие волны – это естественные колебания Земли, изучение которых позволяет изучить внутреннюю структуру, вещественный состав, характер вращения планеты и т. д.

В настоящем пособии излагаются способы применения стоячих волн в инженерной сейсмологии, где, в частности, они используются при обследовании зданий и сооружений в основном для оценки их технического состояния и сейсмостойкости. Преимущество методики – отсутствие искусственного источника, что позволяет сократить материальные и временные затраты при обследовании, а сами измерения становятся менее трудоемкими.

Помимо инженерной сейсмологии метод стоячих волн применяется в сейсмическом микрорайонировании. Определение резонансных частот верхней части разреза (ВЧР), построение карт усиления колебаний на собственных частотах, оценка точности определения коэффициентов усиления возможны благодаря выделению из зарегистрированного микросейсмического шума исследуемого участка когерентных составляющих – стоячих волн.

Перспективы методики в инженерной сейсмологии еще не до конца изучены. Актуально проведение экспериментов на объектах с хорошо управляемой геометрией и известными физическими свойствами с последующим переходом к реальным, более сложным объектам.

Данное пособие является продолжением серии учебных пособий, посвященных практическому применению стоячих волн на инженерных сооружениях, и представляет собой введение в теорию, практику проведения экспериментов, обработку и интерпретацию геофизического метода. В настоящем пособии рассматривается применение методики на мостах и трубах.

На примерах Бугринского моста, мостов на Ямале, трубопроводов и маяка рассмотрены теория и практика методов геофизических исследований, а именно: технология проведения измерений, отделение стоячих волн от микросейсмов, математическое моделирование методом конечных элементов, интерпретация полученных результатов.

## 1. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ СТОЯЧИХ ВОЛН

Стоячие волны образуются в результате интерференции встречных волн с одинаковыми частотами. Простым примером является интерференция плоской волны, падающей нормально на границу раздела двух сред и плоской отраженной волны, распространяющейся в обратном направлении (рис. 1).

Получим уравнение отраженной волны: пусть отраженная и падающая плоские волны распространяются навстречу вдоль оси  $X$  с одинаковыми амплитудами. Пусть в первый момент начальные фазы равны нулю. Тогда уравнения распространения выглядят следующим образом:

$$y_1 = A \sin(\omega t - kx); \quad y_2 = A \sin(\omega t + kx).$$

Сложив уравнения и воспользовавшись формулой суммы синусов, получим:

$$y = y_1 + y_2 = 2A \cdot \sin(kx) \cdot \cos(\omega t).$$

Поскольку  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,

$$y = 2A \cdot \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \cos(\omega t).$$

Полученное уравнение называют **уравнением стоячей волны**. Отметим важные моменты – стоячая волна колеблется с той же частотой, что и волны ее образовавшие, но при этом в отличие от падающей и отраженной волны стоячая волна не распространяется, не переносит энергию. Последнее обусловлено тем, что падающая и отраженная волна несут одинаковое количество энергии в противоположных направлениях.

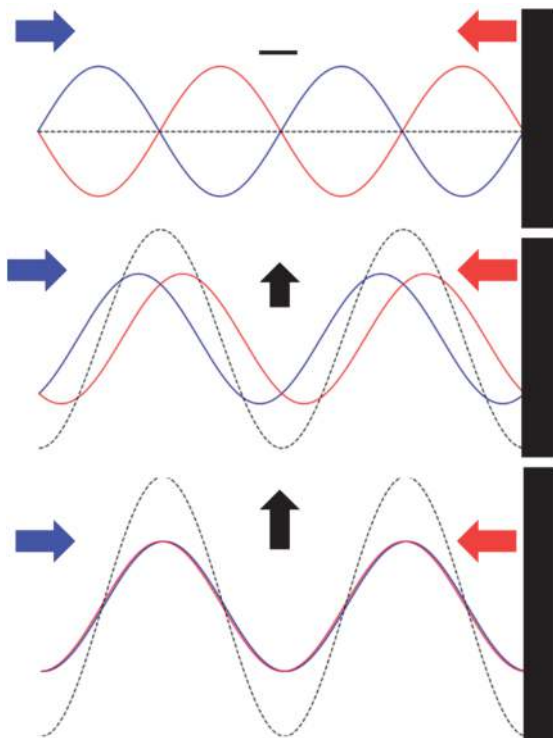


Рис. 1. Схема изменения стоячих колебаний с течением времени (синим выделена падающая волна, красным – отраженная, черным пунктиром – стоячая; стрелки указывают на направление распространения падающей и отраженной волны и на направление колебаний стоячей волны)

Мы выяснили, что стоячая волна не распространяется. Что же тогда происходит в точках среды? Возьмем некую точку на оси  $X$ . Согласно формуле, приведенной выше, частица, находящаяся в этой точке, будет совершать колебания с амплитудой

$$A^* = 2A \left| \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \right|.$$

Получается, что амплитуда колебаний частицы будет напрямую зависеть от ее координаты, а амплитуда всегда будет положительна.

Наконец, рассмотрим предельные значения последнего выражения. В случаях, когда  $\frac{2\pi x}{\lambda} = \pm n\pi$  ( $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ), амплитуда  $A^* = 0$ , т. е. колебания отсутствуют. Такие точки называют **узлами** стоячих волн. Они образуются в тех местах, в которых падающая и отраженная волна приходят с противоположными фазами. Координаты этих точек определяются следующим образом:

$$x_y = \pm \frac{n\lambda}{2}.$$

По аналогии максимум амплитуды будет в точках, где

$$\frac{2\pi x}{\lambda} = \pm \frac{(2n+1)\pi}{2}; \quad A^* = 2A,$$

а такие точки принято называть **пучностями**. Их координаты:

$$x_{\text{п}} = \pm \frac{(2n+1)\lambda}{2}.$$

Расстояние между пучностью и соседним узлом будет равно  $\frac{\lambda}{4}$ .

Таким образом, стоячая волна представляет собой колебательную систему, состоящую из пучностей и узлов, находящихся друг от друга на равных расстояниях. Образоваться эта волна может в результате интерференции падающей и отраженной волны.

Переходя к реальным средам, нужно понимать, что при отражении волны происходит неизбежная потеря энергии, это отражается на амплитуде. Происходит интерференция волн одинаковой частоты, но разной амплитуды, вследствие чего в узлах наблюдается не полное отсутствие колебаний, а некий амплитудный минимум относительно других точек среды. Помимо этого нужно помнить о постепенном затухании распространяющихся волн и соответствующем затухании стоячих волн. Такие стоячие волны, образованные в результате единичного импульса, будем называть **собственными волнами**.

## 2. ОБСЛЕДОВАНИЕ ТРУБОПРОВОДА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ОПОР ПО АКУСТИЧЕСКИМ ШУМАМ

Трубопроводы являются неотъемлемой частью многих отраслей хозяйства. Они востребованы на предприятиях, связанных с разработкой твердых полезных ископаемых, применяются при транспортировке газа, нефти, воды, повсеместно используются в системах пожаротушения, вентиляции и т. д. Необходимость трубопроводов диктует востребованность методов диагностики и контроля их состояния.

Часть трубопроводов сооружается над землей – на опорах и эстакадах. В такой конструкции формируются благоприятные условия для формирования стоячих волн в пролетах между соседними креплениями. Поле стоячих волн при этом будет зависеть от длины пролетов, материала трубы и ее геометрии (диаметра, толщины стенок и т. д.). Источниками резонанса будут природные процессы – ветровая нагрузка, сейсмический режим, просадка грунта под трубой, а также техногенные – движение транспорта, работа близко расположенных механизмов, характер потока транспортируемого вещества и т. д.). Все эти резонансные воздействия сокращают срок годности сооружения и могут приводить к повреждениям и потере устойчивости. К самым опасным резонансным явлениям относят низкочастотные, вызванные мощными периодическими воздействиями, например, динамическими нагрузками от вращающихся неуравновешенных роторов насосов и турбоагрегатов или мощными вибрациями в процессе интенсификации добычи нефти [1].

Стоит отметить, что потеря устойчивости какой-либо из опор трубопровода приводит к увеличению длины пролета (рис. 2) и понижению собственных частот. В примере, показанном на рис. 2, длина пролета увеличилась в два раза, частота низшей моды стоячих волн уменьшилась при этом в два раза, т. е. для такой трубы источники низкочастотных



колебаний, ранее не вызывавших резонансы, стали резонансными. Потеря устойчивости одной из опор увеличила список источников резонансов, которые могут привести к повреждениям конструкции или разрушению участка трубы [2].

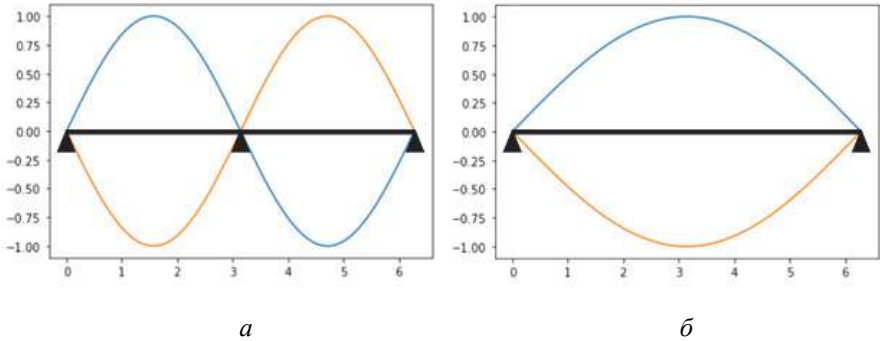


Рис. 2. Низкочастотная мода колебаний трубы с тремя жесткими закреплениями (опорами) (а); низкочастотная мода колебаний трубы, потерявшей одно жесткое закрепление (опору), (б)

Документами, регламентирующими строительство и эксплуатацию трубопроводов, предусмотрено проведение расчетов их собственных частот и форм колебаний [3]. Методам таких расчетов при разных условиях закрепления участков трубы посвящено достаточно много работ (отметим лишь некоторые, недавно опубликованные [5–13]). 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 [3].

В лабораторных экспериментах исследование влияния различных факторов на динамические характеристики трубопроводов, в том числе на их собственные частоты и формы колебаний, проводят, как правило, в моделях или отдельных элементах трубопроводов колебаний с помощью искусственных источников. Такими источниками могут быть ударные воздействия [4, 11, 14–16], осциллирующие механические колебания [4, 17, 18], резкое изменение давления в трубе [19, 20] 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 настоящем учебно-методическом пособии на результатах физического моделирования и полевого эксперимента иллюстрируется возможность оценки собственных частот и форм колебаний участков трубопроводов по ее поверхностным акустическим шумам. Приводится анализ поля стоячих волн, позволяющий диагностировать потерю устойчивости опоры трубопровода.

## 2.1. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

### 2.1.1. МОДЕЛЬ ТРУБОПРОВОДА С ЖЕСТКИМИ КРЕПЛЕНИЯМИ

#### Модель

Для того чтобы сравнить результаты физического моделирования, проведенного в лабораторных условиях с результатами полевого эксперимента, необходимо подобрать модель, имеющую наибольшее геометрическое и физическое подобие реального объекта. В качестве модели использовалась медная труба со следующими параметрами: длина – 2 м, диаметр – 18 мм, толщина стенки – 1 мм. В качестве жесткого крепления использовались пять хомутов, установленных на массивном основании с шагом 50 см (рис. 3).

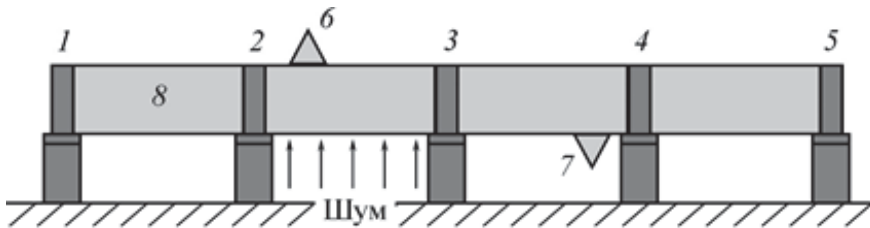


Рис. 3. Схема эксперимента:

1–5 – хомуты; 6 – передвижной и 7 – опорный ультразвуковые датчики; 8 – труба

#### Источник микросейсмического шума

В силу отсутствия естественных источников акустических шумов в лабораторных условиях использовалась щетка с жесткой щетиной. Шум генерировался возвратно-поступательным движением по нижней поверхности трубы.

## **Регистрирующее оборудование**

В качестве регистрирующего оборудования использовались широкополосные датчики с пьезокерамическим диском диаметром 2 мм и толщиной 1 мм, подключенные к двухканальному цифровому осциллографу В-423. Данные записывались на жесткий диск компьютера.

### **Ход эксперимента**

Опорный (зафиксированный на одном месте) датчик жестко крепился на нижней образующей трубы, второй датчик передвигался по профилю длиной 50 см с шагом 1 см. Профиль расположен в пролете между двумя жесткими креплениями (хомутами) трубы, опорный датчик располагался в соседнем пролете (см. рис. 3). Оси максимальной чувствительности датчиков были ориентированы по отношению к трубе в ее радиальном направлении. В каждой точке профиля производилась синхронная запись шумов в обоих датчиках. Длительность регистрации ~6,5 с, частота дискретизации 100 кГц.

### **Обработка данных**

Вначале необходимо провести оценку собственных частот изучаемого участка трубы. Записи передвигаемого регистратора были разбиты на отрезки по 4096 отсчетов, после чего было проведено осреднение по времени и по всем точкам профиля. Затем был проведен расчет амплитудного спектра, отражающего распределение собственных частот (рис. 4).

На спектре (см. рис. 4) выделяются 7 пиков, т. е. 7 мод стоячих волн. Для данной модели методом конечных элементов, реализованным в программном комплексе MSC NASTRAN [21], можно теоретически рассчитать набор собственных частот. Результаты эксперимента и теоретических расчетов совпадали, разница не превышала 2 %.

Определение формы сигнала осложнено тем, что шумовое поле нестационарно, и даже для одной точки может меняться со временем в зависимости от реализации источника колебаний. Получается, что по записям, полученным в различных точках профиля, в разное время определить геометрические формы стоячих волн невозможно. Именно для решения этой проблемы вводится опорный датчик. Наличие синхронных пар записей опорного и передвигаемого регистратора и соответствующего программного обеспечения позволяет применить методику обработки, подробно описанную в [22–24]. Методика позволяет при перечисленных выше условиях выделить когерентные колебания, связанные со стоячими волнами из некогерентного шума.

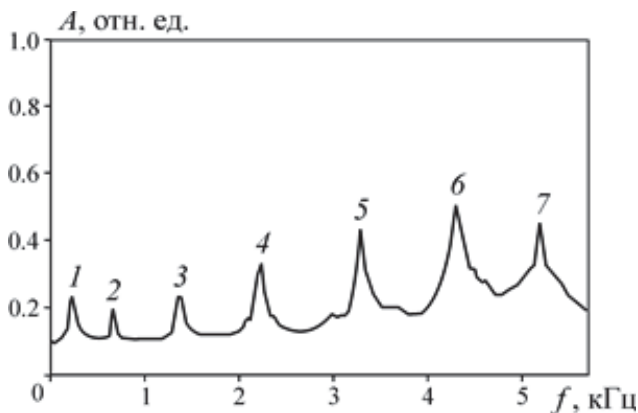


Рис. 4. Амплитудный спектр, осредненный по времени и по всем точкам профиля при жестком закреплении пролета трубы:

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

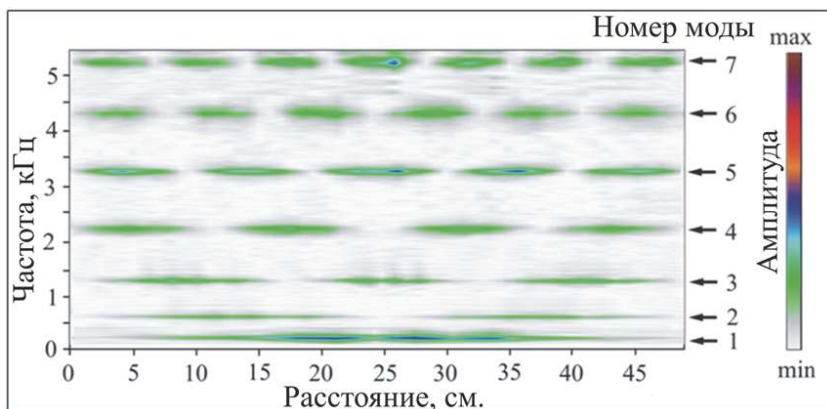


Рис. 5. Поле изгибных стоячих волн на участке трубы с жестко закрепленными краями:

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

На рис. 5 показана визуализация амплитудных спектров, полученных при обработке шумовых записей по данной методике. Стоит отметить,

что пики осредненного спектра, полученного ранее (см. рис. 4), совпадают с набором стоячих волн, изображенных на амплитудном спектре. При этом, как можно видеть из рис. 4, 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.

### 2.1.2. МОДЕЛИ ТРУБОПРОВОДА С НЕЖЕСТКИМ КРЕПЛЕНИЕМ И ПОТЕРЕЙ КРЕПЛЕНИЯ

Если в ходе эксплуатации одно из креплений/опор трубопровода теряет устойчивость, то как это можно обнаружить по полю стоячих волн? При том же источнике шума и регистрирующей аппаратуры была смоделирована частичная потеря трубопровода с помощью тонкой резиновой прокладки, подложенной под жесткое основание под хомут и трубу третьего крепления (рис. 6).

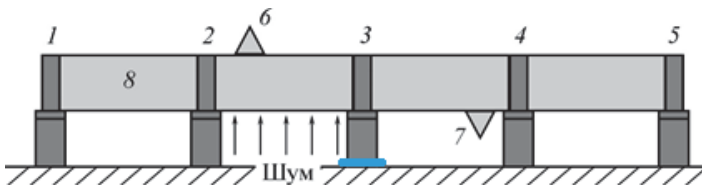


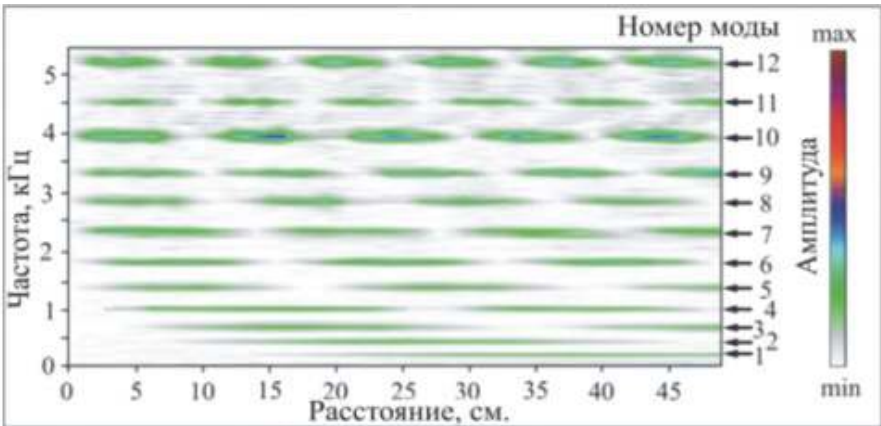
Рис. 6. Схема эксперимента:

1–5 – хомуты; 6 – передвижной и 7 – опорный датчики; 8 – труба, синим цветом – резиновая подкладка

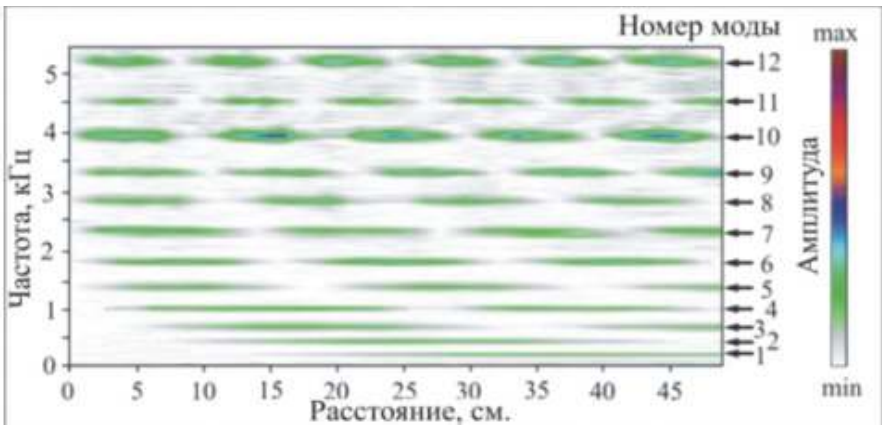
По той же методике измерений и обработки было получено поле стоячих волн (рис. 7).

Рис. 7, а демонстрирует изменение поля стоячих волн при снижении жесткости одного из креплений. Хотя в этом эксперименте не получилось проследить первую моду, видно, что появились промежуточные моды с пучностями (максимумами амплитуд) в тех местах, где ранее были узлы (участки нулевой амплитуды). Количество мод при этом увеличилось вдвое, из чего следует, что в данном случае колеблется как целое уже двойной пролет трубы. Снижение жесткости одного из креплений привело к тому, что в этом месте (соответствующем правому краю, рис. 7, 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.



*a*



*б*

*Рис. 7.* Поле изгибных стоячих волн для того же, что и для изображенного на рис. 4 участка трубы, в случае пониженной жесткости правого крепления (*a*) и при его отсутствии (*б*)

Нечетные же моды двойного пролета в его середине имеют пучности. Стоит также отметить, что по сравнению с четными модами, для которых ослабленное крепление попадает в одну из узловых точек, нечетные амплитуды имеют более высокие значения.

Обратим внимание и на то, что моды примерно с одинаковой полудлиной изгибной волны, которая определяется расстоянием между соседними узлами, имеют повышенные частоты в случае нежесткого закрепления. Например, на рис. 4 четвертая мода имеет четыре пучности на частоте 2,2 кГц, а на рис. 6 четырем пучностям соответствует восьмая мода с частотой 2,7 кГц.

На рис. 8 иллюстрируется различие в частоте для мод с одинаковым количеством пучностей в случаях жесткого и нежесткого крепления.

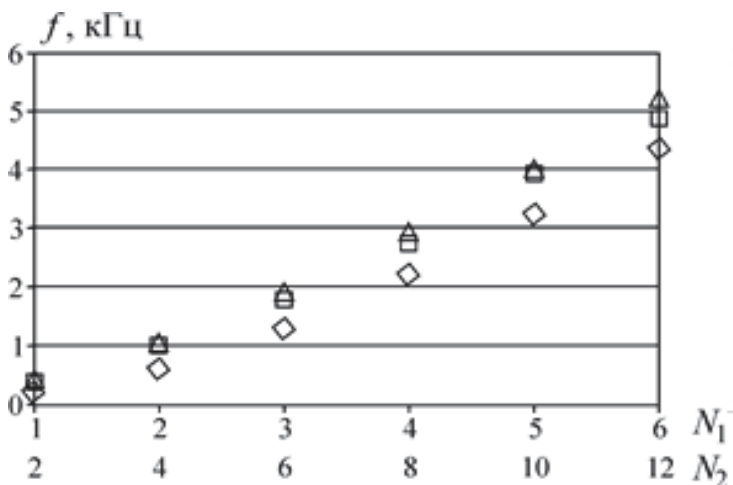


Рис. 8. Сравнение собственных частот для первых шести мод изгибных колебаний жестко закрепленного одинарного пролета трубы (номера мод  $N_1$ , ромбические маркеры) и для первых шести четных мод изгибных колебаний пролета двойной длины (номера мод  $N_2$ , квадратные маркеры – двойной пролет в средней точке демпфирован ослабленным креплением, треугольные маркеры – крепление отсутствует)

В случае модели, в которой третья опора (см. рис. 3) вовсе отсутствует, распределение стоячих волн будет похожим на случай нежесткого крепления (рис. 7, б). Отличие состоит лишь в том, что частоты

одноименных мод станут еще выше (рис. 8), а амплитуды четных и нечетных мод сопоставимы по величине. Сравнивая два распределения, можно сделать вывод, что снижение жесткости крепления хомута, имитирующее частичную потерю устойчивости опоры трубопровода, фактически приводит к увеличению длины колеблющегося между жесткими опорами участка трубы.

Кроме того, отметим что если бы первоначальные пролеты трубы имели разную длину, то при потере разделяющего крепления исчезли бы и узлы в месте ее крепления.

Перечисленные закономерности подтвердились и в экспериментах с двумя нежесткими соседними опорами и их полным отсутствием. Число мод увеличилось втрое, узлы в местах утерянных креплений есть только у каждой третьей моды.

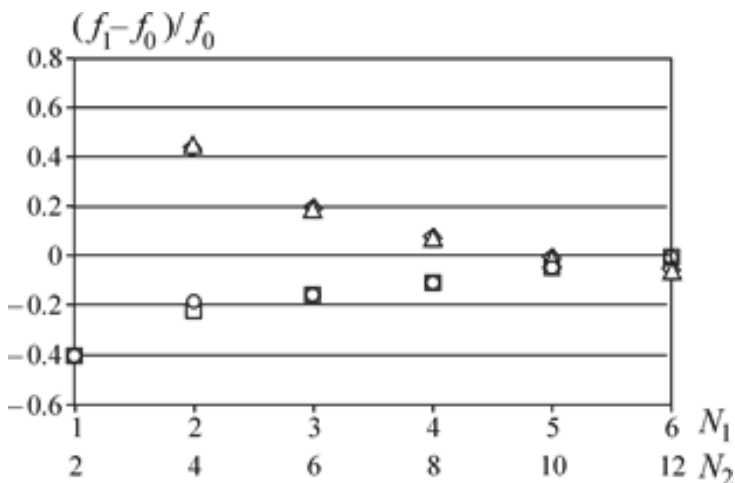


Рис. 9. Относительное изменение собственных частот при заполнении трубы водой для первых шести мод изгибных колебаний пролета трубы одинарной длины (номера мод  $N_1$ , треугольные маркеры – эксперимент, ромбические – численные расчеты) и первых шести четных мод пролета двойной длины (номера мод  $N_2$ , круговые маркеры – эксперимент, квадратные – численные расчеты)

В другом эксперименте с той же трубой, но полностью наполненной водой закономерности сохранились, поменялись лишь частоты стоячих волн. Частоты собственных колебаний для модели с водой для одинарной



и двойной длины пролета (50 и 100 см соответственно) представлены на рис. 8. Характер изменения собственных частот для пустой и заполненной трубы оказывается разным. 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 (рис. 9). При этом и для одинарного, и для двойного пролета наличие воды в трубе наиболее сильно влияет на собственные частоты низших мод изгибных колебаний. Результаты согласуются с теоретическими расчетами, выполненными методом конечных элементов в программном комплексе MSC Nastran.

В заключение отметим, что хотя в последние годы теоретически обоснована возможность диагностирования качества закрепления участков трубопроводов только по их собственным частотам [25–28], однако сами авторы этих работ отмечают неоднозначность решения такой обратной задачи. Действительно, изменение условий крепления на любом из двух концов участка трубы может приводить к одинаковым изменениям собственных частот. Дополнительная информация о формах колебаний, которая, как показано в данных работах, может быть получена при обработке зарегистрированных на поверхности трубы акустических шумов, что позволяет однозначно диагностировать потерю устойчивости конкретной опоры.

## ВЫВОДЫ

Приведенные результаты физического моделирования свидетельствуют о возможности определения частоты и геометрической формы стоячих волн в трубопроводе синхронной регистрацией поверхностных шумов двумя датчиками. Эта информация в совокупности с теоретическими расчетами позволяет определить наличие/отсутствие жесткого крепления в опорах, что необходимо для оценки устойчивости трубопровода. Потеря устойчивости опоры будет проявляться в увеличении мод стоячих волн, при этом некоторые из них будут иметь пучности в местах креплений, где ожидаются узлы. Полная или частичная потеря устойчивости будет отличаться по схожим амплитудам соседних мод в первом случае и сравнительно большими амплитудами колебаний, образованных потерей устойчивости, – во втором.

## 2.2. ПОЛЕВОЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Объектом полевых исследований послужил участок надземного трубопровода, состоящего из двух стальных труб диаметром 46 см, в основном покрытых теплоизоляционным материалом с опорами, расположенными на расстоянии 10 м друг от друга. Трубы жестко приварены к опорам и расположены на 25–30 см над поверхностью земли (рис. 10, *а*). В местах пересечения локальных понижений рельефа трубы без закрепления лежат на стальных стойках, такие участки можно рассматривать как области пониженной устойчивости конструкции.



Рис. 10. Участок трубопровода с жестким креплением труб к опоре (*а*); трубы, уложенные на стойку без жесткого крепления (*б*); регистратор установленный на трубе, геофон (*в*)

Проводилась регистрация акустических шумов трех пролетов одной из труб. Один пролет был ограничен двумя жесткими креплениями, два других пролета были ограничены одной опорой с жестким креплением и одной – с нежестким.

В качестве регистраторов использовались одноканальных цифровые регистраторы Texan (RefTek-125A) и вертикальные геофоны GS-20DX (рис. 10, *в*), которые крепились с помощью магнитных дисков. Частота дискретизации составляет 1 кГц, время записи в каждом пункте наблюдения – 10 мин, точки измерения расположены на поверхности трубы

с шагом 20 см по всей длине пролета. В момент измерения по трубопроводу текла вода, шумовое воздействие которой позволило ограничиться десятью минутами регистрации.

### 2.3. ОБРАБОТКА, СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТА, АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В закрепленном с двух сторон участке трубопровода образуются стоячие волны разных типов. Примеры форм, полученных в программном комплексе MSC Nastran [21] проиллюстрированы на рис. 11. На рис. 11, *a–в* изображены первые три изгибные моды, а на *г–е* – моды других типов (крутильные). Стоит отметить, что амплитуды изгибных мод, как правило, превышают амплитуды других волн.

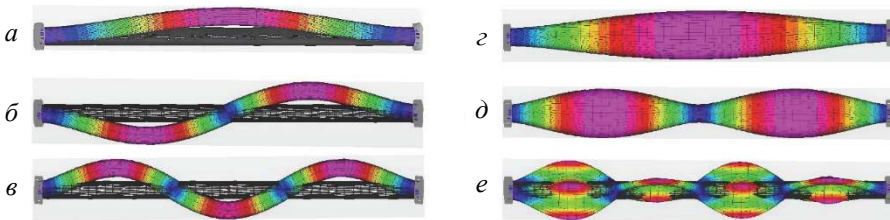


Рис. 11. Примеры рассчитанных методом конечных элементов форм собственных колебаний жестко закрепленной с двух сторон трубы

Применялась аналогичная обработка, что и в лабораторном эксперименте, с разбиением записи акустических шумов на 8192 отсчета, усреднением по времени и всем пунктам регистрации с последующим вычислением амплитудного спектра (рис. 12). На осредненном спектре появились резкие квазирегулярные пики, которые как будет показано ниже, соответствуют изгибным стоячим волнам.

#### 2.3.1. ВОЛНЫ В ТРУБЕ, ЖЕСТКО ЗАКРЕПЛЕННОЙ С ДВУХ СТОРОН

Совместная визуализация осредненных спектров для пролета трубопровода, закрепленного между двумя жесткими опорами, показана на рис. 13. Можно убедиться, что пики на рис. 12 действительно соответствуют модам стоячих волн. При этом наблюдается чередование вдоль пролета пучностей и узлов (максимумов и минимумов амплитуд).

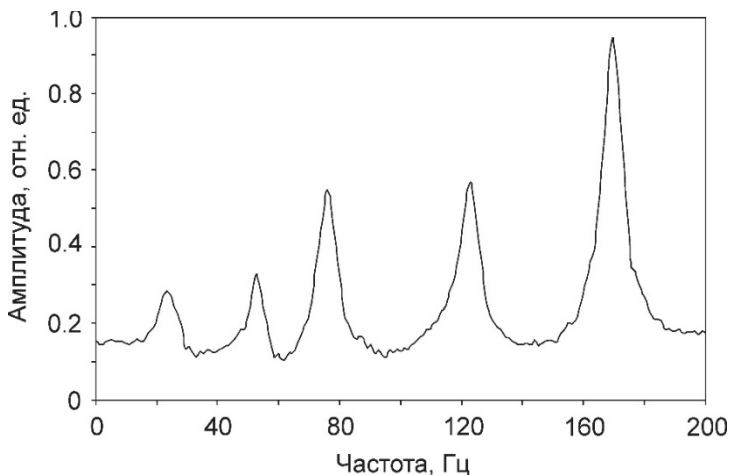


Рис. 12. Обобщенный амплитудный спектр, полученный при усреднении по времени и по всем точкам наблюдений спектров шумовых записей, зарегистрированных на поверхности трубы между двумя жесткими опорами

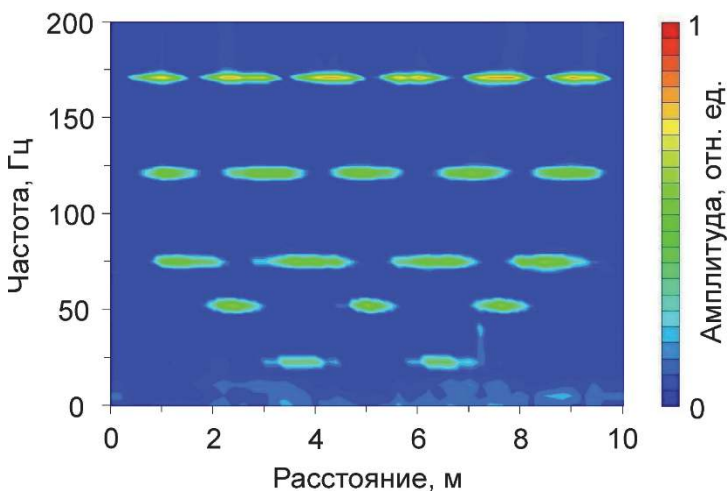


Рис. 13. Распределение усредненных амплитудных спектров шумовых записей в жестко прикрепленном к опорам с двух сторон участке трубы

На больших частотах количество узлов и пучностей увеличивается, что является типичным распределением изгибных мод в амплитудном спектре для протяженных объектов, таких, как балки, струны, мосты, трубы и т. д.

Напомним, что номер моды определяется количеством максимумов амплитуды стоячей волны. В данном случае выделяются моды изгибных стоячих волн со второй по шестую. Ожидаемо, что в местах закрепления трубы (конец и начало профиля) колебания отсутствуют.

### **2.3.2. ВОЛНЫ В ТРУБЕ, ЖЕСТКО ЗАКРЕПЛЕННОЙ С ОДНОЙ СТОРОНЫ И СВОБОДНО ЛЕЖАЩЕЙ – С ДРУГОЙ**

Рассмотрим случай пролета с одним жестким креплением и одним нежестким. Амплитудный спектр для одного из таких пролетов трубопровода представлен на рис. 14. Сравнивая это распределение с показанным на рис. 13, можно отметить, что резкие квазирегулярные пики на спектрах для трубы с двумя жесткими креплениями расположены на оси частот примерно в два раза реже, чем для трубы, жестко закрепленной только с одной стороны. Помимо этого в случае нежесткого крепления часть мод имеют пучности на краях, где расположены крепления и где колебаний при жестком креплении нет. Такие отличия в распределении мод изгибных стоячих волн в амплитудном спектре свидетельствуют о том, что волны образуются в двойном (двадцатиметровом) пролете. 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 [24, 38, 39].

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. 15). Помимо указанных закономерностей образуется своего рода «раздвоение» волн, пики которых по частотам близки к частотам пиков, показанным на рис. 14.

Таким образом, три эксперимента подтверждают упомянутые закономерности. Во-первых, в случае, если трубопровод или другое протяженное тело, заключенное между двумя опорами, имеет одно нежесткое крепление, количество мод изгибных волн в одном и том же частотном диапазоне увеличивается по сравнению с жестко закрепленным случаем, во-вторых, появляются пучности в местах креплений.

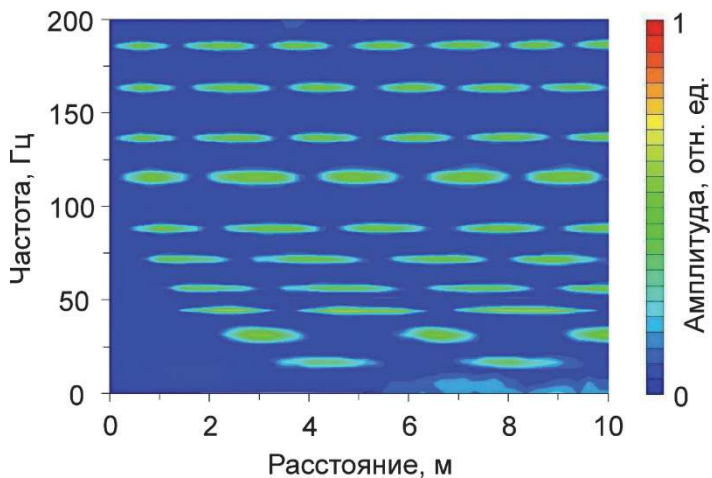


Рис. 14. Распределение осредненных амплитудных спектров шумовых записей на первом участке трубы, жестко закрепленной с одной (отметка 0) и свободно лежащей на стойке с другой (отметка 10 м) стороны

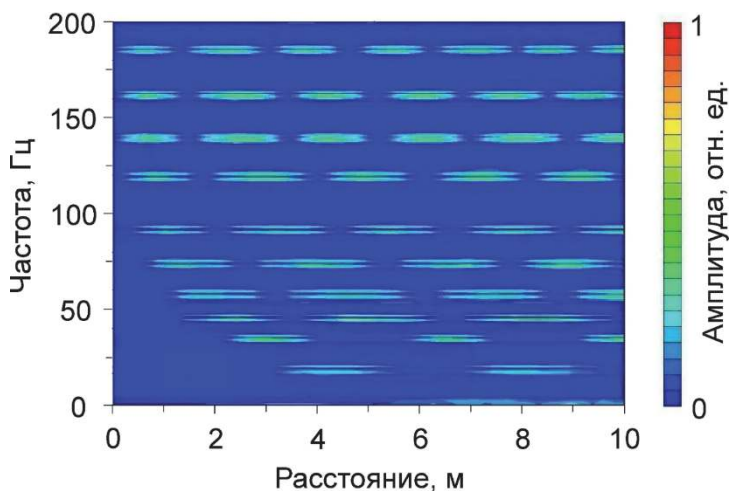


Рис. 15. Распределение осредненных амплитудных спектров шумовых записей на втором участке трубы, жестко закрепленной с одной (отметка 0) и свободно лежащей на стойке с другой (отметка 10 м) стороны

Представленные закономерности можно использовать как диагностический признак частичной потери устойчивости надземного трубопровода.

### 2.3.3. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Полученные амплитудные спектры пролетов трубы показывают распределение пучностей и узлов, но не несут информации о типах волн. Как упоминалось ранее, косвенно можно отличить изгибающую стоячую волну от стоячих волн других типов по сравнительно большей амплитуде пучностей. Для уточнения типов полученных волн необходимо численное моделирование методом конечных элементов. Сравним результаты расчетов и экспериментов. Отдельно отметим, что сравнение носит качественный характер, поскольку не все параметры объекта известны.

При численном моделировании использовались геометрические параметры экспериментальной модели (длина, диаметр, расстояние между опорами). Применялась регулярная сетка из параллелепипедов с размерами  $4,6 \times 4,6 \text{ мм}^2$  в плоскости сечения 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 (рис. 12) резких пиков примерно совпадали с какими-либо из множества получаемых при компьютерном моделировании собственных частот закрепленного отрезка трубы с известными внешними размерами.

В ходе моделирования выяснилось, что невозможно подобрать неизвестные параметры трубы, чтобы объяснить полученные колебания неизгибающими модами. Наоборот, несложно подобрать параметры модели (свойства стали), чтобы объяснить полученные пики обобщенного спектра изгибающими модами.

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>.

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 [40]. Результаты сравнения частот пяти пиков обобщенного экспериментального спектра (см. рис. 12) и собственных частот, рассчитанных методом конечных элементов, показаны на рис. 16 а.

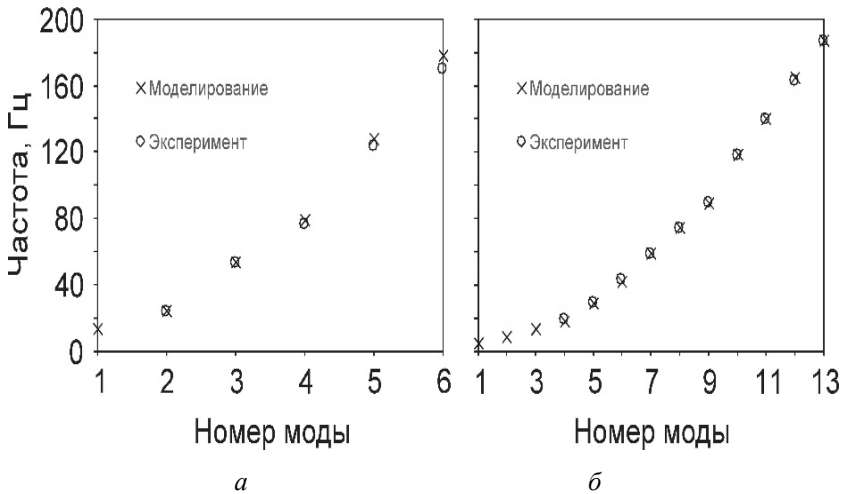


Рис. 16. Сравнение определенных экспериментально и в результате компьютерного моделирования частот мод изгибных стоячих волн для одинарного (а) и двойного (б) пролетов трубы

Расхождение результатов не превышает 5 %, а анализ форм колебаний для приведенных на рис. 16 собственных частот показал, что это именно изгибные моды. Форма первых трех мод показана на рис. 11 а–в. Математическое моделирование также показало, что моды других типов колебаний имеют значительно меньшие амплитуды и наблюдаются на относительно больших частотах. Например, моды 1-го и 2-го порядков, показанные на рис. 11, г–д, имеют частоты 61,1 и 122,6 Гц, т. е.



попадают в диапазон частот третьей–пятой мод, наблюдаемых в эксперименте.

Похожие результаты мы видим и для случаев одной нежесткой опоры (двойного пролета). Результаты представлены на рис. 16, б, на котором можно отметить хорошее совпадение собственных частот, полученных в ходе эксперимента и с помощью математического моделирования. 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. 14, 15 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.

Было проведено третье компьютерное моделирование, в котором на середину жестко закрепленного с двух сторон пролета трубы оказывалось вертикальное демпфирующее воздействие снизу. Результатом стало появление на частотах, близких к собственным частотам двойного пролета, одной вертикальной изгибной моды и двух симметричных относительно вертикальной плоскости «наклонных» изгибных мод с одинаковыми частотами.

Таблица 1

**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

Оказалось, что на частотах, близких к собственным частотам изгибных мод двойного пролета, образуются, во-первых, вертикально ориентированная изгибная мода, во-вторых, две симметричные относительно вертикальной плоскости «наклонные» изгибные моды с одинаковыми частотами, несколько превышающими частоту вертикально ориентированной моды. Из-за близких значений собственных частот этих мод их графическое представление затруднительно, поэтому результаты сведены в табл. 1. Для сравнения в таблице также приведены собственные частоты двойного пролета без демпфирования.

Следует заметить, что параметры демпфирующего элемента при компьютерном моделировании выбирались произвольно из стандартных установок конечноэлементной 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, изображенных на рис. 14, 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 увеличивающих 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. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ МОСТА ПО АКУСТИЧЕСКИМ ШУМАМ**

Мосты являются технически сложной и неотъемлемой частью транспортной инфраструктуры и потому нуждаются в регулярном тщательном обследовании на предмет устойчивости и наличия дефектов. Большинство мостов было спроектировано в то время, когда плотность транспортного потока была значительно меньше, чем в наши дни. Увеличившаяся со временем нагрузка на конструкцию моста приводит к раннему износу и сокращению срока эксплуатации. В свою очередь, поддержание исправного технического состояния мостов важно как для нормального функционирования транспортной сети государства, так и для безопасности людей, использующих транспортную инфраструктуру.

Существует множество методов диагностики и мониторинга состояния мостов, каждый из них имеет свои ограничения. Такими ограничениями могут быть относительная дороговизна метода, зависимость от внешних условий вроде освещения, температуры, вибрации от транспорта и пр. К самым распространенным можно отнести оптические методы, основанные на системах распознавания образов для расчета смещений и деформаций конструкции, различного масштаба радиолокационные методы (георадарная и интерферометрическая радарная съемка), а также методы, основанные на регистрации смещений и деформаций конструкции.

#### **3.1. БУГРИНСКИЙ МОСТ**

Предметом обследования является Бугринский мост, проложенный через реку Обь, он расположен в Новосибирске и был открыт в 2014 году.



*Рис. 17.* Фотография Бугринского моста, г. Новосибирск

### 3.1.1. ПОЛЕВОЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Объектом измерений послужил Бугринский мост, г. Новосибирск. Измерения проводились в осенне-зимний период в 2019 и 2020 годах в дневное время суток, т. е. при активном транспортном потоке. Использовалась та же аппаратура, что и при обследовании трубопроводов, – цифровой регистратор Texan (RefTek-125A), а в качестве датчиков были использованы геофоны GS-20DX (рис. 18). Отметим, что поскольку при регистрации происходит накопление сигнала, важно, чтобы собственные колебания аппаратуры, которые являются паразитным когерентным шумом, были минимальными. В том случае, если собственные колебания аппаратуры по амплитуде сравнимы с полезными колебаниями сооружения, то дальнейшая обработка затруднительна. Выбранная аппаратура подходит для наших измерений. Общая длина моста – 2091 м, шаг измерений – 10 м, время регистрации – 5 мин, производилась регистрация вертикального и горизонтального компонента сейсмоакустических шумов с использованием опорного датчика для нормировки шумовых данных. Датчики устанавливались на пешеходную часть моста,

начало профиля измерений проводилось на левом берегу моста. Перед проведением профильных измерений была произведена регистрация когерентных наводок от окружающей среды для их дальнейшего устранения при обработке данных. Стоит отметить, что некогерентные наводки подавляются усреднением амплитудных спектров.



Рис. 18. Регистратор Texan (RefTek-125A) и геофоны GS-20DX

Поскольку суточная нагрузка, например ветровая, транспортная, непостоянны, то для их учета была произведена 8-часовая запись вертикального компонента колебаний в трех точках. Выяснилось, что данные факторы не влияют ни на частоты колебаний сооружения, ни на качество их выделения из спектра.

### 3.1.2. ОБРАБОТКА, СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТА, АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для обработки данных, полученных с моста, использовались те же принципы, что и при обработке шумовых записей трубопровода. Приведем также алгоритм выделения волн из микросейсм.

1. Удаление из шумовых записей профиля отдельно зарегистрированных когерентных паразитных шумов.
2. Нормировка уровня шумов перемещаемого датчика на уровень опорного для каждого измерения для каждого дискрета.
3. Разбиение шумовых записей на блоки по 8192 отсчета.
4. Преобразование Фурье для каждого блока и усреднение полученных амплитудных спектров путем их суммирования.

5. Построение карт амплитудно-частотного распределения на исследуемой площади или профиле.

Обращаем внимание на пункты 3 и 4. Качество получаемых данных после преобразования Фурье зависит от размера блока с отсчетами. Чем больше отсчетов в одном блоке, тем точнее результат и тем больше времени нужно на вычисления. Разделение блоков записей по 8192 отсчетам сделано исходя из опыта обработки, ориентируясь на упомянутые закономерности.

Проанализируем полученное амплитудно-частотное распределение (рис. 19) для Бугринского моста. Отчетливо наблюдаются 7 мод, начиная с самой первой – низкочастотной. Мост жестко закреплен в своих концах, поэтому в начале и в конце профиля для всех мод наблюдаются узлы. На карте вертикальными полосами отчетливо выделяются две области повышенных амплитуд колебаний, наблюдаемых на всех частотах (отмечены овалами на расстоянии 796 и 1680 м от начала профиля) шириной 10 и 30 м соответственно.

Для того чтобы установить, что данные зоны повышения амплитуд являются аномальными для Бугринского моста, было проведено численное моделирование методом конечных элементов в программно-алгоритмическом комплексе APM Structure 3D. Модель моста представляла собой дорожное полотно, выполненное в виде протяженного прямоугольного параллелепипеда размером  $2100 \times 35 \times 1 \text{ м}^3$ . Опоры, поддерживающие мостовую конструкцию снизу, моделировались демпферными закреплениями, расположенными в местах расположения опор моста (вертикальные полосы на рис. 19). По краям моста – жесткое закрепление. Параметры материала, используемого при расчете, выбирались на основе данных о конструкции моста, находящихся в открытом доступе и соответствовали стали и цементобетону. Элементы расчетной сетки – прямоугольные параллелепипеды размером  $10 \times 5 \times 1 \text{ м}^3$ . Модельным упрощением являлось отсутствие арочной подвесной части Бугринского моста из предположения, что данная модельная неоднородность не будет вносить значительный вклад в частоты низших изгибных мод конструкции.

Компьютерная модель Бугринского моста с примерами первых трех мод изгибных колебаний представлена на рис. 20. Расхождение с результатами натурных измерений составило в среднем не более 3 %.

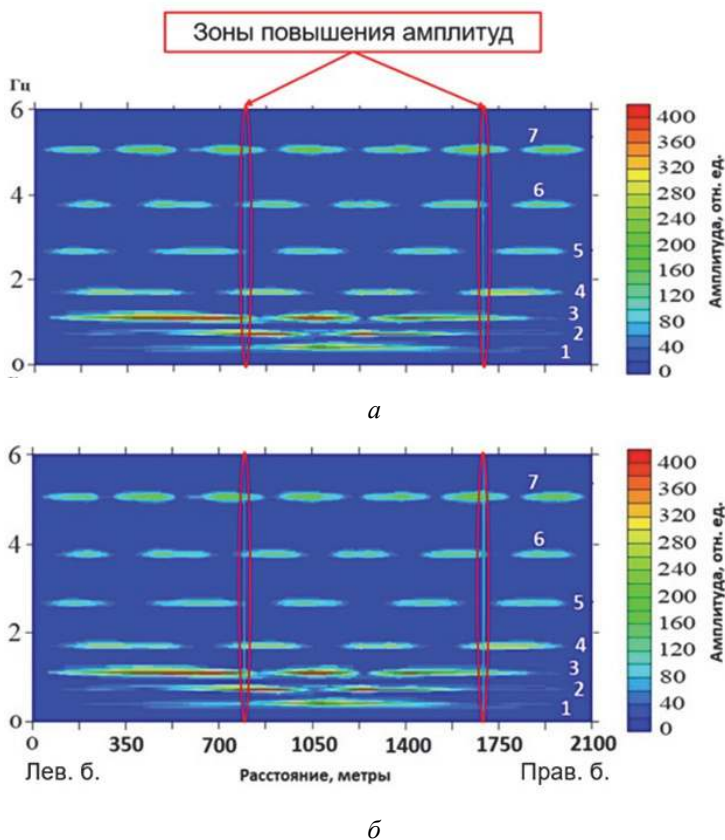


Рис. 19. Распределение амплитудных спектров шумовых записей вдоль Бугринского моста (по ширине), цифрами обозначены номера мод изгибных колебаний. Красными овалами отмечены аномальные зоны повышения амплитуд; *a* – данные 2019 г., *б* – данные 2020 г.

Сопоставление данных полевого эксперимента с результатами математического моделирования свидетельствуют об аномальности отмеченных областей высоких амплитуд на расстоянии 796 и 1680 м. Данные аномалии отсутствуют в амплитудном спектре смоделированной неповрежденной конструкции. Их присутствие может свидетельствовать о плохом закреплении детали конструкции моста, вибрирующей под



нагрузкой транспортных средств. Однако для точного определения местоположения и достоверного описания возможного дефекта необходимо провести детальные измерения по всей ширине моста в пределах аномальных зон.

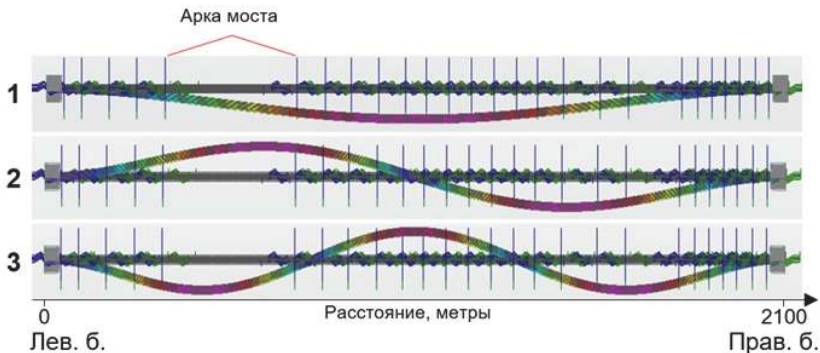


Рис. 20. Изгибные моды собственных колебаний Бугринского моста, полученные в результате компьютерного моделирования (1, 2, 3 моды)

О достоверности выделения аномальных зон свидетельствует повторяемость результатов в разные годы и расширение аномальной зоны, что может быть связано с еще большей потерей закреплённости детали. Аномальные зоны за промежутки между двумя измерениями увеличились до 20 и 50 м для зон 796 и 1680 м соответственно. Природа первой аномалии связана с отломанном креплением водосточной трубы, упавшей на автомобиль в 2017 г. (рис. 21).



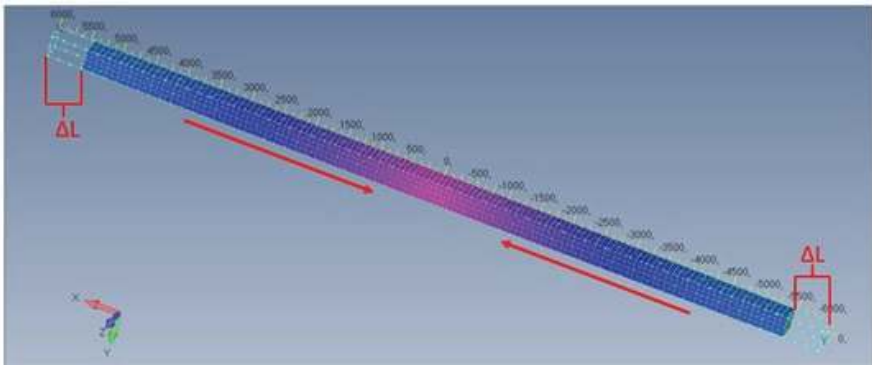
Рис. 21. Место отлома и упавшая деталь конструкции моста (2017 г.)

По горизонтальным компонентам зарегистрированных шумовых записей были получены моды типа сжатия-расширения (рис. 22), которые

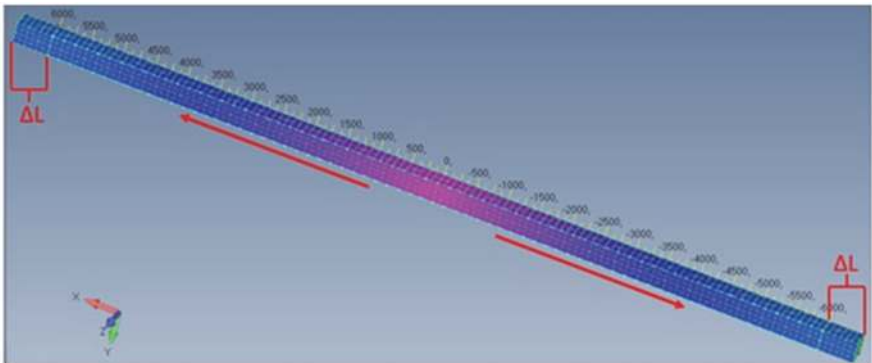
в теории образуются над свободной верхней границей полости. Как на ней, так и на дневной поверхности должны наблюдаться пучности этих волн, а их частоты кратны частоте низшей моды:

$$f_n = \frac{nV_p}{2h}, \quad (1)$$

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



*a*



*б*

Рис. 22. Моды сжатия-расширения на Бугринском мосте, фазы:  
*a* – сжатия; *б* – расширения (принципиальная модель)

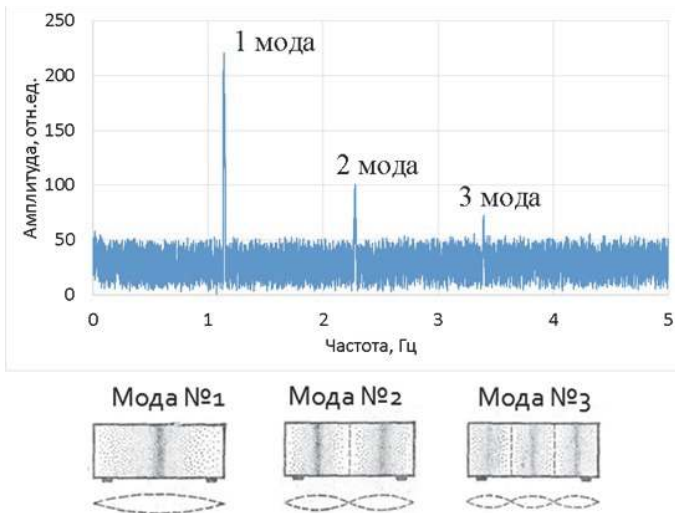


Рис. 23. Амплитудный спектр стоячих волн на Бугринском мосту; горизонтальная составляющая. Цифрами обозначены номера мод типа сжатия-расширения и их формы

Если на каком-либо участке местности/сооружения распределение регулярных пиков усредненных амплитудных спектров на оси частот согласуется с формулой (1), то это свидетельствует о наличии в таком месте полости или включения с существенно пониженной относительно вмещающей среды скоростью.

Рассмотрим обобщенный амплитудный спектр для горизонтальной компоненты. Результаты показаны на рис. 23. Представленные пики соответствуют модам волн сжатия-растяжения. На рисунке наглядно видно, что частоты идут с равным интервалом согласно формуле (1). Расхождение горизонтальных мод сжатия-растяжения, полученных в ходе измерений и при математическом моделировании не превышает 7 %.

Частоты с первой по третью моду соответствуют 1,14; 2,28 и 3,32 Гц. Скорость продольных волн в исследуемом мосте составила 4800 м/с (вычислено импульсным способом), длина равна 2100 м. Тогда согласно формуле (1) эти моды соответствуют именно модам типа сжатия-растяжения для всей длины колонны ( $1,14 \text{ Гц} = 1 \cdot 4800 \text{ (м/с)} / (2 \cdot 2100) \text{ (м)}$ ).

## ВЫВОДЫ

Амплитудный спектр моста имеет те же закономерности, что и спектр трубопровода, а именно – узлы на жестко закрепленных концах, преобладание изгибных мод. Под этим подразумевается их относительно большая амплитуда. Все те же дефекты в виде потери устойчивости одной из опор, полученные при обследовании трубопровода, актуальны и для моста. Однако мост, будучи более сложной конструкцией, состоящей из множества деталей, имеет больший спектр возможных аномально образованных дефектов. Аномалии выделяются по несовпадению амплитуд колебаний математической модели и натурального эксперимента. В рассмотренном случае потеря детали привела к повышенным колебаниям на участке и соответственно повышенным амплитудам. Таким образом, путем использования метода выделения стоячих волн из шумовых записей можно определить нарушение устойчивости сооружения, связанное с деталями разного размера, от больших, например колонн, до маленьких – части водосточной трубы.

### 3.2. МОСТЫ НА ЯМАЛЕ

Рассмотрим еще два моста, находящихся в Ямало-Ненецком автономном округе. Так как располагаются они на Крайнем Севере, потеря устойчивости этих сооружений может быть связана с оттаиванием многолетнемерзлых пород (ММП). Деграция мерзлоты приводит к образованию таликов и дальнейшему проседанию грунта, а вместе с ним – свай и опор сооружений. Объекты расположены на транспортном пути, и в дальнейшем будем обозначать их как мост на 31 км и мост на 244 км. Мосты относятся к балочному типу и стоят на четыре железобетонных шарнирных опорах (рис. 24).

#### 3.2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СООРУЖЕНИЯ ПО ФОРМАМ КОЛЕБАНИЙ ОПОР ИЛИ СВАЙ

Помимо профильных и площадных измерений возможно применение методики на опорах объектов с использованием одного регистратора, закрепленного на выступающем из земли конце сваи. По зарегистрированным у одного из концов мод стоячих колебаний можно судить о степени закрепленности.



*Рис. 24.* Расположение обследуемых объектов инфраструктуры на спутниковом снимке, Ямальский полуостров

Мосты закреплены на сваях, которые по своей геометрии относятся к продолговатым деталям. Рассмотрим их вертикальные и горизонтальные колебания относительно закрепленности в фундаменте (рис. 25).

Если свая жестко закреплена сверху и снизу или, наоборот, не закреплена вовсе, то первые три моды вертикальных колебаний (колебаний вдоль сваи) будут выглядеть так, как показано на рис. 25, б. На закрепленных концах колебания будут минимальны, а на обобщенном спектре пики амплитуд накопленного сигнала будут находиться на расстоянии  $\pi$  друг от друга (рис. 25, в). Горизонтальные же колебания (поперек сваи) будут минимальными, обобщенный спектр будет выглядеть, как показано на рис. 26, а.

В том случае, если сваи закреплены только с одного конца, то колебания по вертикали будут выглядеть, как на рис. 26, б, т. е. с минимумом

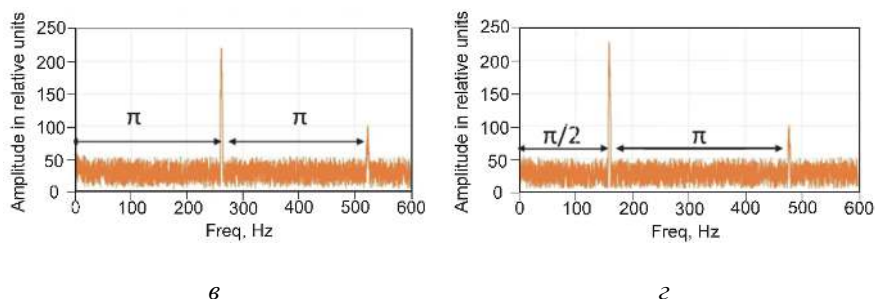
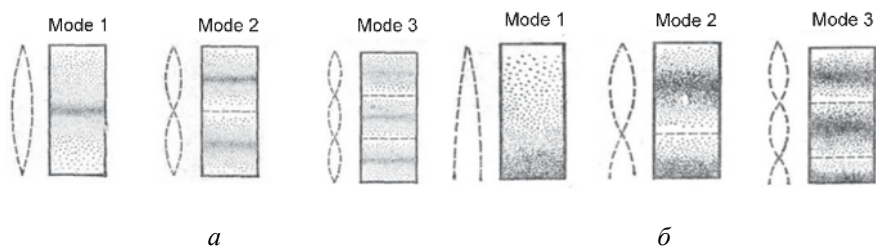


Рис. 25. Формы первых трех мод колебаний для закрепленной и незакрепленной опоры (а, б) соответственно; обобщенные амплитудные спектры для закрепленной и незакрепленной опоры (в, г) соответственно (случай вертикальных колебаний)

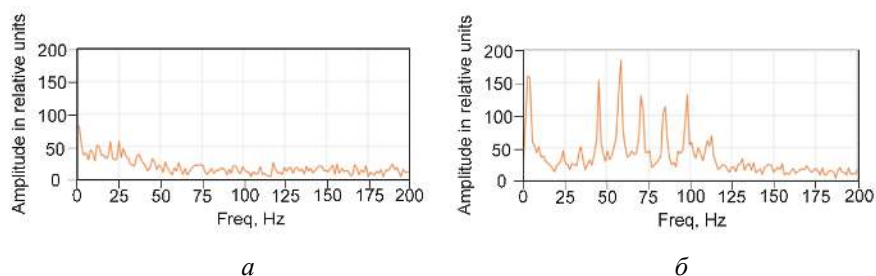


Рис. 26. Обобщенный амплитудный спектр горизонтальных колебаний жестко закрепленной опоры (а); обобщенный амплитудный спектр горизонтальных колебаний в случае нежесткого закрепления одного из концов опоры (б)

амплитуды в закрепленном конце и максимумом в свободном. Пример первых двух мод стоячих волн на обобщенном спектре представлен на рис. 26. При этом горизонтальные колебания вблизи незакрепленного конца формируют квазирегулярные пики на обобщенном спектре (рис. 25, б).

### 3.2.2. ПОЛЕВОЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

На обоих мостах использовалась та же аппаратура, что и при измерениях на трубопроводе – одноканальные цифровые регистраторы Texan (RefTek-125A) и вертикальные геофоны GS-20DX. Проводили два типа измерений – непосредственно на поверхности моста (рис. 27, а) и на сваях под мостом (рис. 27, б). В первом случае регистрировалась вертикальная компонента колебаний, шаг точек измерений – 3 м, время регистрации – 5 мин.



Рис. 27. Расстановка регистраторов на объекте:

а – на поверхности моста; б – на сваях под мостом; в – снимок моста на 31 км

Под мостом регистрировались вертикальная и горизонтальная компоненты, каждая в течение 5 мин. Датчики крепились жесткими хомутами. В обоих случаях частота дискретизации составляла 500 Гц.

### 3.2.3. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

#### *Мост на 31 км*

На рис. 28 изображена схема моста и его поле стоячих волн, на котором можно выделить 6 мод, начиная со второй, обладающей двумя максимумами амплитуд. На амплитудном спектре нет признаков потери устойчивости опор. В начале и конце профиля не наблюдаются максимумы амплитуд, которые могли бы свидетельствовать о плохом закреплении боковых колонн. Нет «раздвоения» – повторения одних и тех же мод. Моды стоячих волн хорошо прослеживаются, распределение их максимумов типично для устойчивого продолговатого объекта.

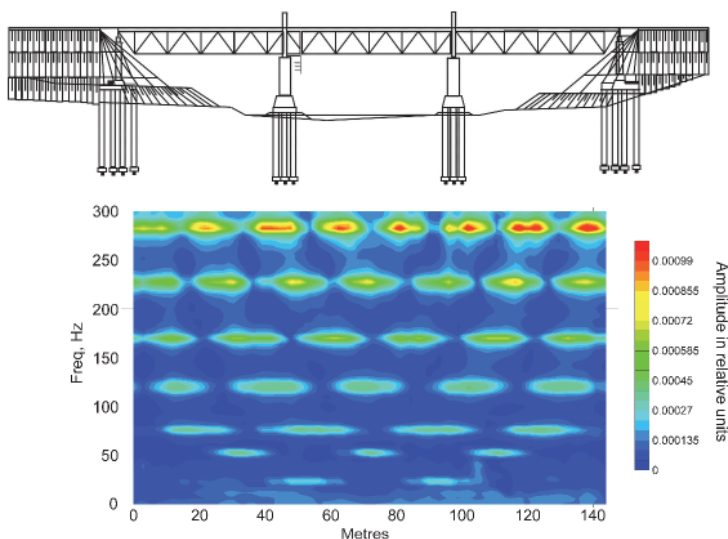
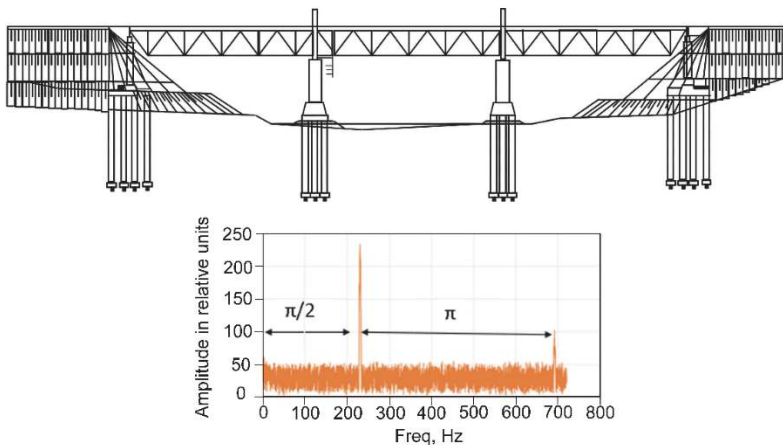


Рис. 28. Схема и амплитудный спектр стоячих волн моста на 31 км

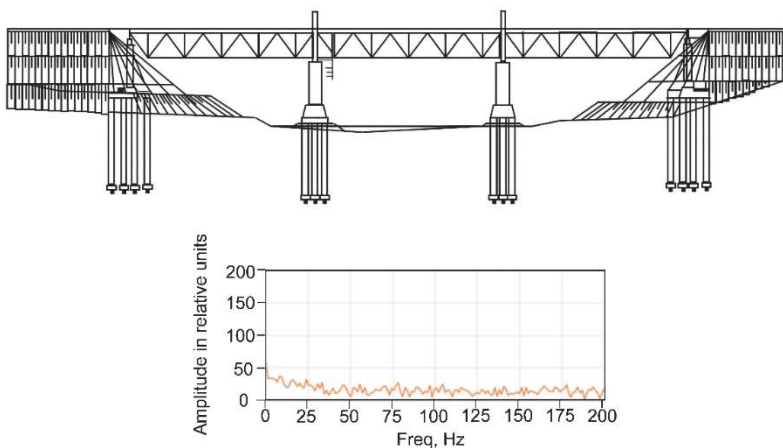
Мост имеет шарнирное крепление опор к его проезжей части, т. е. верхнее закрепление колонн является нежестким, что отражается в обобщенном спектре, полученном при измерении на самих колоннах (рис. 29). Распределение пиков обобщенного спектра соответствует случаю одного нежесткого закрепления, в нашем случае – это шарнирное крепление вверху колонны и одного жесткого, в нашем случае – внизу, в грунте. Такое распределение проявляется на спектре всех опор, другими словами, все колонны имеют устойчивый фундамент.





*Рис. 29.* Схема и обобщенный амплитудный спектр стоячих волн вертикальных колебаний моста на 31 км

Это подтверждается и обобщенным амплитудным спектром горизонтальных колебаний (рис. 30), на котором отсутствуют квазирегулярные пики амплитуд, которые свидетельствовали бы о неустойчивом положении колонн, нежестком креплении снизу.



*Рис. 30.* Схема и обобщенный амплитудный спектр стоячих волн горизонтальных колебаний моста на 31 км

### Мост на 244 км

На амплитудном спектре (рис. 31) на нескольких частотах выделяются зоны повышенных колебаний, совпадающих с расположением двух опор моста. Это является следствием либо плохо крепления проезжей части моста к колонне, либо говорит о неустойчивом положении фундамента колонны в грунте. Стоит также отметить, что опоры имеют шарнирные крепления к мосту, что для сейсмического метода воспринимается как нежесткое крепление. Ожидаемо, что на концах амплитудного спектра (рис. 31), т. е. на отметках 0 и 102 м, соответствующим расположению крайних опор, присутствуют максимумы амплитуды стоячих волн. В случае, если бы крайние столбы были жестко закреплены и снизу, и сверху, то на концах спектра наблюдались бы узлы стоячих волн, которые показаны на рис. 31.

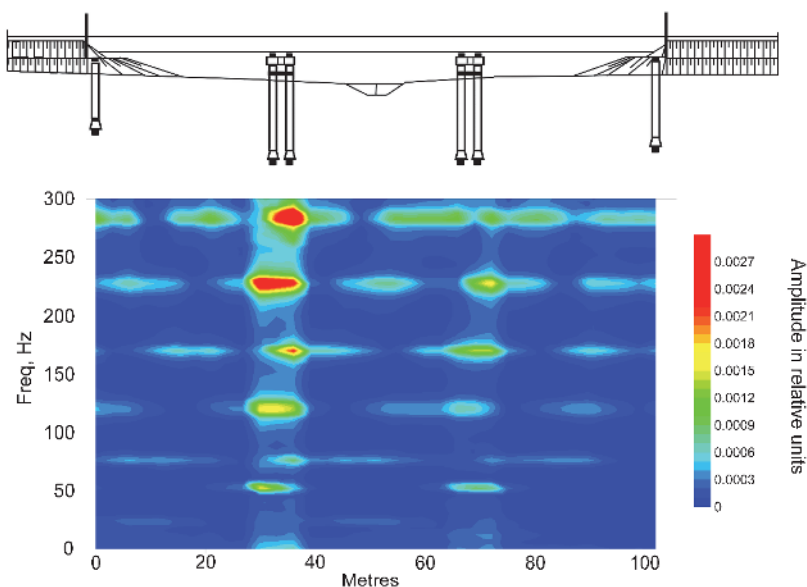


Рис. 31. Амплитудный спектр стоячих волн моста на 244 км

Шарнирное крепление отражено и в обобщенном спектре (рис. 32). Крайние колонны имеют одно нежесткое крепление сверху, об этом говорит характерное положение пиков первых двух мод стоячих волн (рис. 31 и 32). Обобщенный спектр центральных колонн соответствует

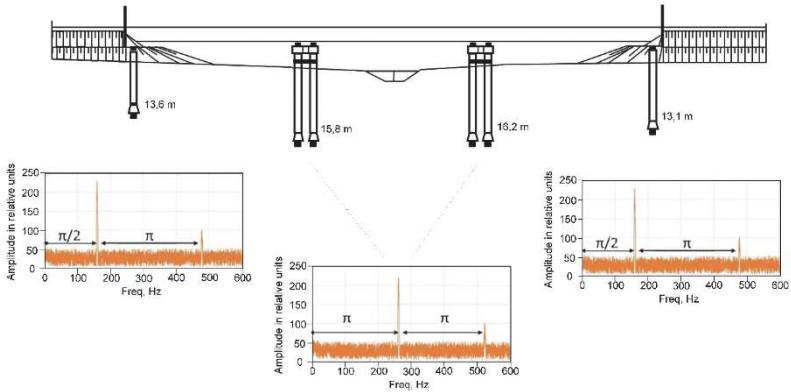


Рис. 32. Схема моста и АЧХ вертикальных колебаний свай. Опоры на концах моста жестко закреплены в грунте, средние опоры – нет (обобщенный спектр – посередине)

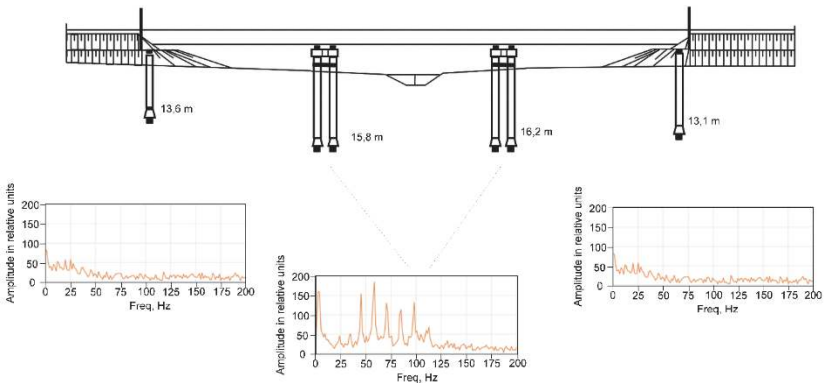


Рис. 33. Схема моста и АЧХ горизонтальных колебаний свай. Опоры на концах моста жестко закреплены в грунте, средние опоры – нет (обобщенный спектр посередине)

либо случаю жесткого крепления снизу и сверху, либо потере жесткого крепления с обеих сторон. Поскольку мы знаем, что верхнее шарнирное крепление нежесткое, то такое распределение говорит о плохом креплении опор в грунте.

О потере устойчивости центральных колонн свидетельствует и появление квазирегулярных пиков (рис. 33).

## **4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ МАЯКА ПО АКУСТИЧЕСКИМ ШУМАМ**

Рассмотрим еще один объект, на котором был применен описываемый метод – Сухумский маяк, возведенный в 1861 г. Этот объект можно относить к историческому наследию, которое, однако, было плохо сохранено несмотря на продолжающуюся его эксплуатацию. Маяк изначально крепился исключительно на сваях, однако после потери устойчивости по окружности сооружения были натянуты тросы (рис. 34).

### **4.1. ПОЛЕВОЙ ЭКСПЕРИМЕНТ**

При обследовании данного объекта использовалась другая аппаратура. Измерения проводились с использованием регистраторов Байкал-1 и датчиков с естественной частотой 5 Гц, регистрирующих поперечные, продольные и вертикальные колебания (рис. 35).

Профиль измерений был протянут вдоль всей высоты маяка, регистраторы располагались на винтовой лестнице, всего было 14 пунктов измерений (рис. 36, б). Частота измерений составила 500 Гц, время накопления сигнала в каждом пункте – 5 мин.

При регистрации собственных колебаний на сваях была выбрана частота измерений 500 Гц и время накопления сигнала – 3 мин. Сейсмодатчики прикладывались к поверхности выступающей сваи.

### **4.2. ОБРАБОТКА, АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Алгоритм обработки и построения частотно-амплитудного распределения стоячих волн аналогичен описанным в предыдущих разделах.



*Рис. 34.* Фотография сухумского маяка



*Рис. 35.* Регистратор Байкал-1 и датчик (желтый)

Рассмотрим получившийся спектр (рис. 36, *a*). Поскольку маяк является телом, закрепленным снизу и незакрепленным сверху, ожидаются пучности колебаний на крыше маяка и узлы в его основании. Действительно, именно это прослеживается на распределении (рис. 36, *a*), на котором обозначены первые три моды. Однако помимо этого видны промежуточные моды с похожими амплитудами и максимумами, не располагающимися на конце профиля. Поскольку амплитуда этих колебаний сопоставима с амплитудами основных мод, то, скорее всего, полученные промежуточные моды не связаны с каким-либо дефектом, а являются модами других колебаний, например, крутильных.

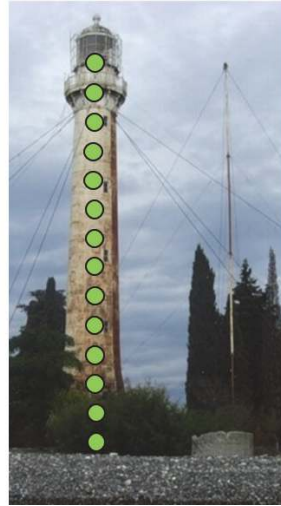
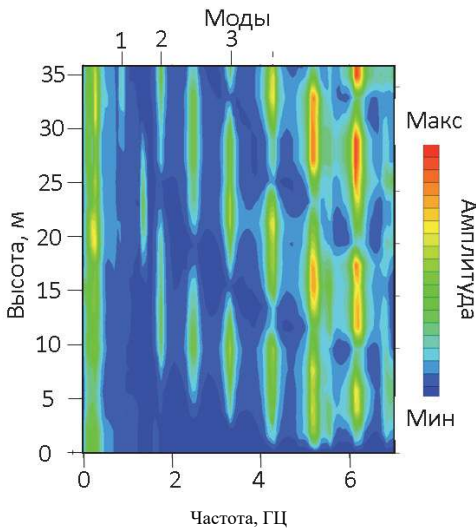


Рис. 36. Фотография маяка и пункты измерения (выделены зеленым) (а); частотно-амплитудное распределение вдоль маятника (б)

На примере данного объекта рассмотрим понятие остаточного ресурса. Этот параметр определяется как суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние. Несущую способность инженерного сооружения можно охарактеризовать изгибной жесткостью опасных сечений несущих конструктивных элементов

$$B = EJ, \quad (2)$$

где  $E$  – модуль упругости;  $J$  – момент инерции нормального сечения.

При этом существует связь между несущей способностью и спектром собственных частот

$$\omega_i = \frac{\alpha_i B}{H^4 m}, \quad (3)$$

где  $\alpha_i$  – частотный коэффициент, зависящий от упругих свойств опорного сечения;  $H$  – высота сооружения;  $m$  – погонная масса.

Тогда износ можно определить по формуле

$$\xi = \frac{B^{\text{нач}} - B^{\text{изм}}}{B^{\text{нач}}} 100 \%, \quad (4)$$

где  $B^{\text{нач}}$  – несущая способность при возведении конструкции;  $B^{\text{изм}}$  – несущая способность, полученная на основе измерений.

Практически для определения остаточного ресурса необходимо найти в технической документации сооружения частоты мод собственных колебаний и сравнить их с измеренными частотами по аналогии с формулой (4). Остаточный ресурс здания оказался равен 68 %, но нужно отметить, что это значение должно определяться без натянутых тросов, т. е. реальная несущая способность меньше определенной. Учитывая, что значение остаточного ресурса, равное 50 %, считается аварийным, такое здание эксплуатировать нельзя.

Наконец, рассмотрим результаты измерений на сваях. Измерения пассивным сейсмическим методом показали, что 7-я и 8-я сваи (нумерацию см. на рис. 37) имеют нежесткое закрепление (табл. 2).

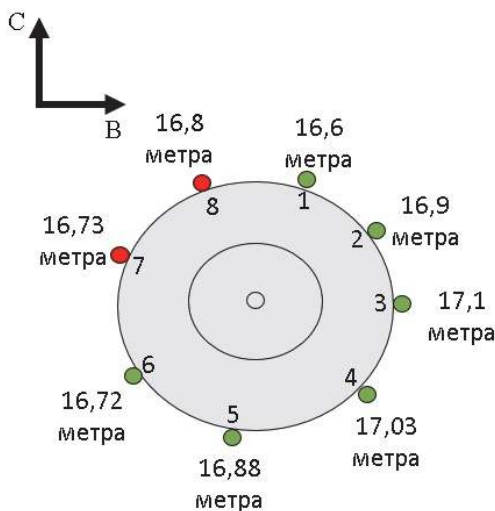


Рис. 37. Глубина погружения свай и степень их закрепленности (красным выделены «висячие» сваи)

**Характер закрепления свай**

Номер сваи	Жесткое закрепление / нежесткое закрепление
1	Жесткое
2	Жесткое
3	Жесткое
4	Жесткое
5	Жесткое
6	Жесткое
7	Нежесткое
8	Нежесткое

Под этим подразумевается, что заглубленный конец сваи колеблется, в связи с чем конструкция теряет свою устойчивость. Методика определения описана ранее в разделе 3.2.1. Неустойчивое положение свай привело к наклону сооружения на северо-запад и потере устойчивости.

**ВЫВОДЫ**

По итогам обследования можно заключить: здание наклонено на северо-запад, в качестве первопричины предполагается плохое закрепление соответствующих свай. Потерю устойчивости пытались компенсировать тросами, натянутыми по всем направлениям, кроме направления падения конструкции. Помимо проблем с устойчивостью конструкции крупных дефектов вдоль самого маяка не обнаружено. Остаточный ресурс здания равен 68 %, но, как упоминалось выше, это значение должно определяться без натянутых тросов, т. е. реальная несущая способность меньше определенной. С учетом того что значение остаточного ресурса, равное 50 %, считается аварийным, а также, что существуют предпосылки к дальнейшей потере устойчивости, эксплуатация маяка не рекомендована.



## 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЗДАНИЙ ПРИ ПЛОЩАДНОЙ СЪЕМКЕ

### 5.1. ФИЗИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

До сих пор были рассмотрены случаи профильной съемки на объектах вытянутой формы. Далее рассмотрим способ применения метода пассивной сейсмоки с выделением стоячих волн на площади.

В качестве примера рассмотрим работу, выполненную во Дворце культуры в г. Норильске. Проводились два типа измерений – с расстановкой датчиков на сваях (рис. 38, б) – для определения устойчивости свайного фундамента и с расстановкой датчиков на полу здания (рис. 38, а) – для поиска дефектов. Напомним, что при измерениях на сваях критерием неустойчивости является появление квазирегулярных пиков на обобщенном спектре горизонтальных колебаний и наличие пучности на заглубленном конце сваи, которая определяется также по пикам обобщенного спектра вертикальных колебаний (см. раздел 3.2.1). Отметим, что регистрация колебаний на сваях и на полу проводилась разной аппаратурой. Для этого необходимо всего два компонента для измерений на сваях (горизонтальный и вертикальный), но три компонента – для измерения всего здания.

Методика измерений и интерпретации данных, зарегистрированных на сваях, уже упоминалась ранее, а метод обработки будет описан в разделе 6. Результаты этого представлены на рис. 39.

Далее рассмотрим метод построения площадного спектра. Зарегистрировав колебания по трем компонентам, откроем амплитудный спектр записи в специальной программе Spectrum v.0.6.4 (рис. 40–42). На записях в осях частота ( $X$ ), время ( $Y$ ) цветом выделены амплитуды колебаний.



а

б

Рис. 38. Расположение трехканального датчика на полу Дворца культуры (а); расположение двух одноканальных датчиков на свае (б)

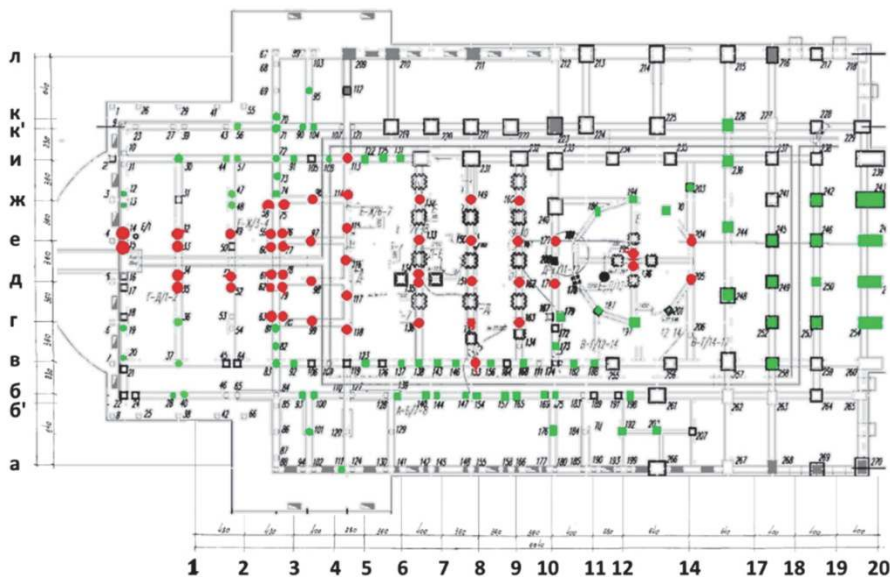


Рис. 39. Схема расположения свай. Красным цветом показаны сваи, потерявшие устойчивость, зеленым – устойчивые

На рисунках представлены записи с одной точки измерения, которая регистрировала постоянные колебания на некоторых частотах. Эти постоянные колебания проявляются в спектре вертикальными полосами повышенных колебаний, они соответствуют собственным частотам.

Собственные частоты первых трех мод получились следующими (компонента  $Z$  только одна мода колебаний):

- по компоненте  $X$  – 3, 3,8, 5,2 Гц;
- по компоненте  $Y$  – 3,6, 5,12, 6,32 Гц;
- по компоненте  $Z$  – 3,6 Гц.

Примеры спектрограмм по компонентам  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  показаны на рис. 40–42.

Просуммировав колебания по времени вдоль определенной частоты для каждого из пунктов измерения (подробнее см. в разделе 6), построим амплитудные распределения разных пространственных компонент и наложим их на схему здания (рис. 43–50).

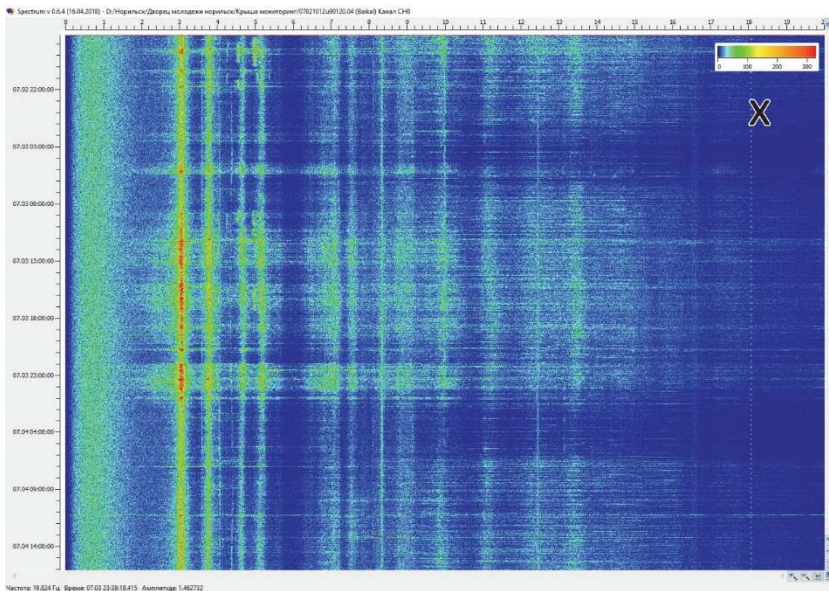
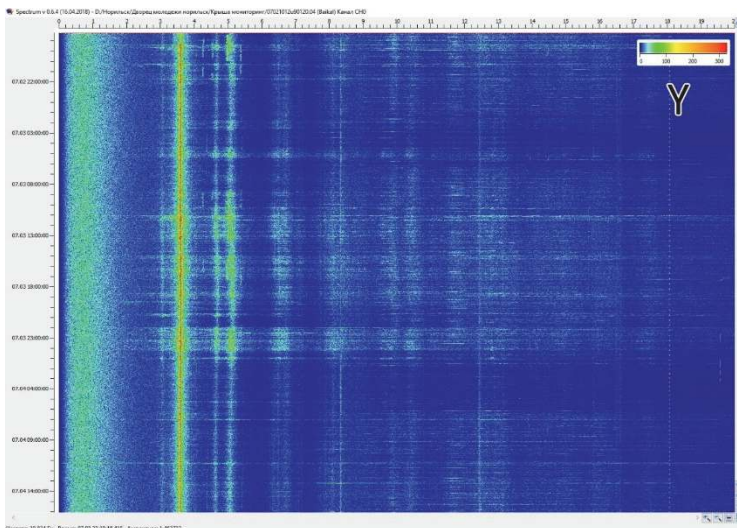
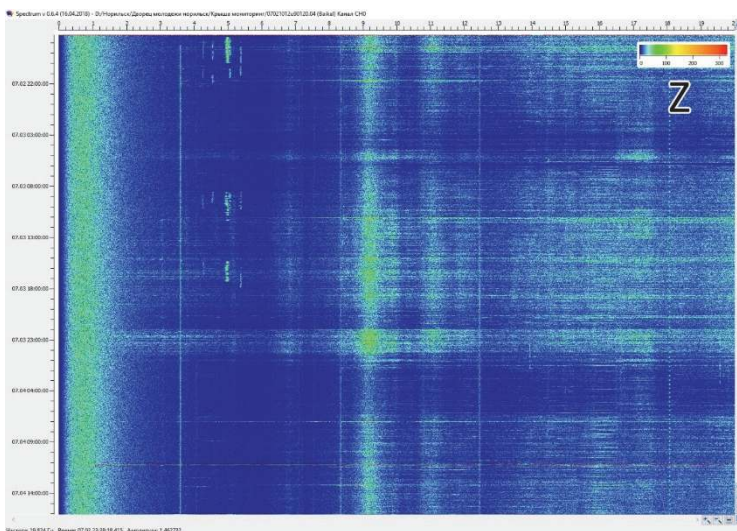


Рис. 40. Спектрограмма, компонента  $X$ . По горизонтали значения частот указаны в герцах, по вертикали – время



*Рис. 41.* Спектрограмма, компонента *Y*. По горизонтали значения частот указаны в герцах, по вертикали – время



*Рис. 42.* Спектрограмма, компонента *Z*. По горизонтали значения частот указаны в герцах, по вертикали – время

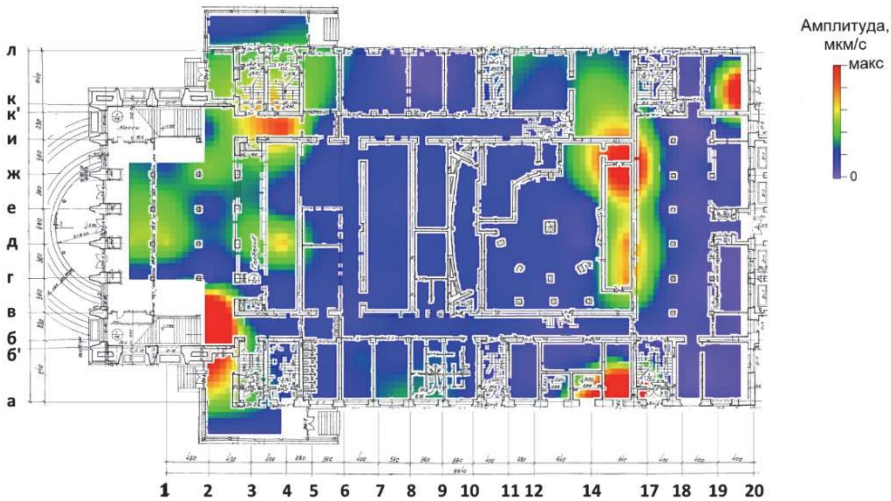


Рис. 43. Амплитудные распределения на основании 1-го этажа Дворца культуры по компоненте  $X$  3 Гц

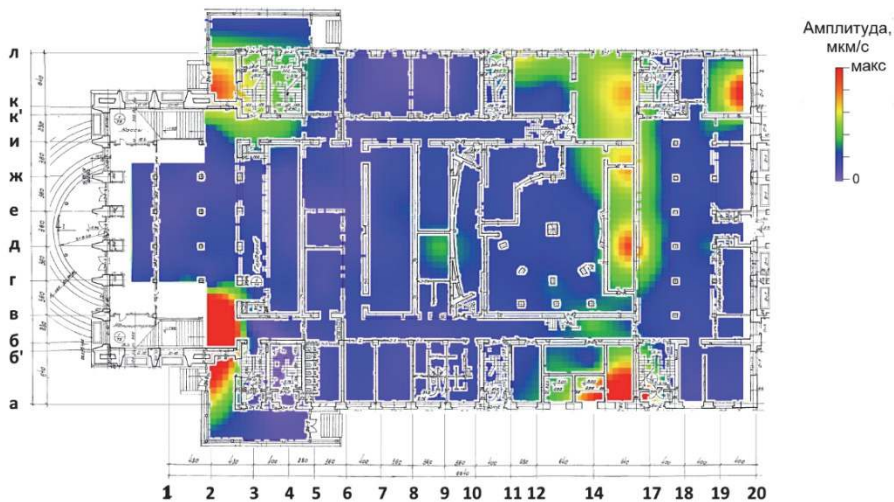


Рис. 44. Амплитудные распределения на основании 1-го этажа Дворца культуры по компоненте  $X$  3,8 Гц

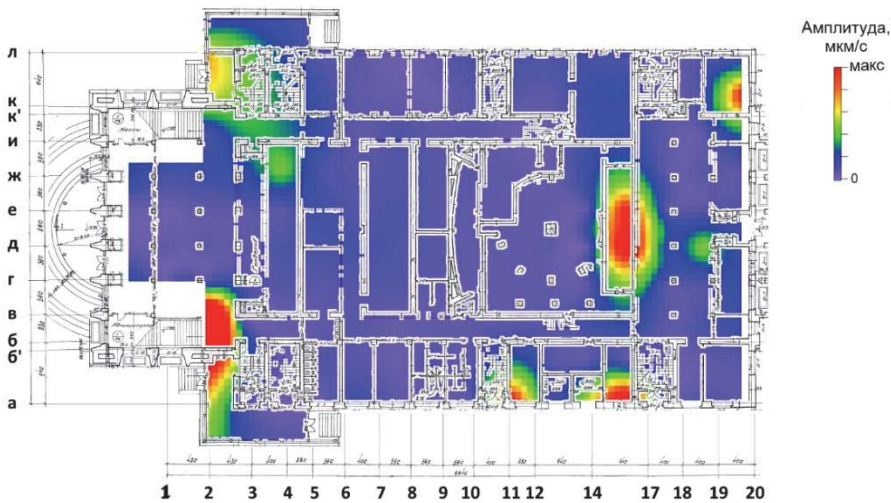


Рис. 45. Амплитудные распределения на основании 1-го этажа Дворца культуры по компоненте  $X$  5,2 Гц

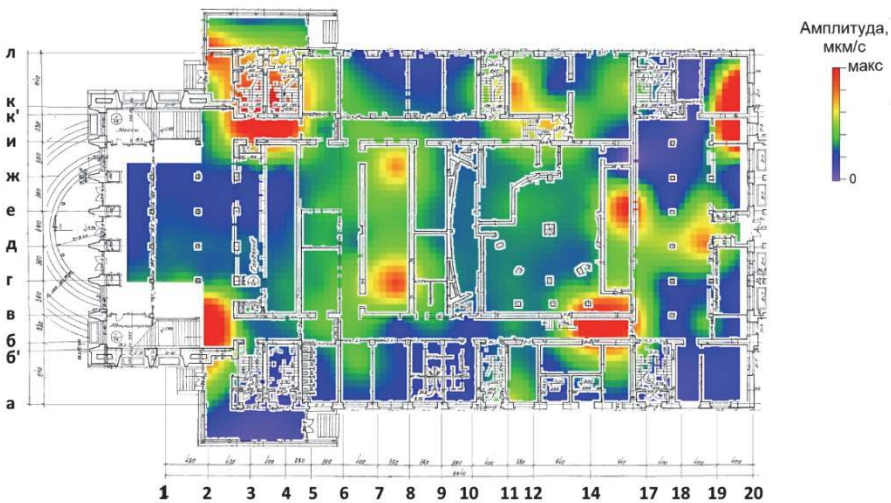


Рис. 46. Амплитудные распределения на основании 1-го этажа Дворца культуры по компоненте  $Y$  3,6 Гц

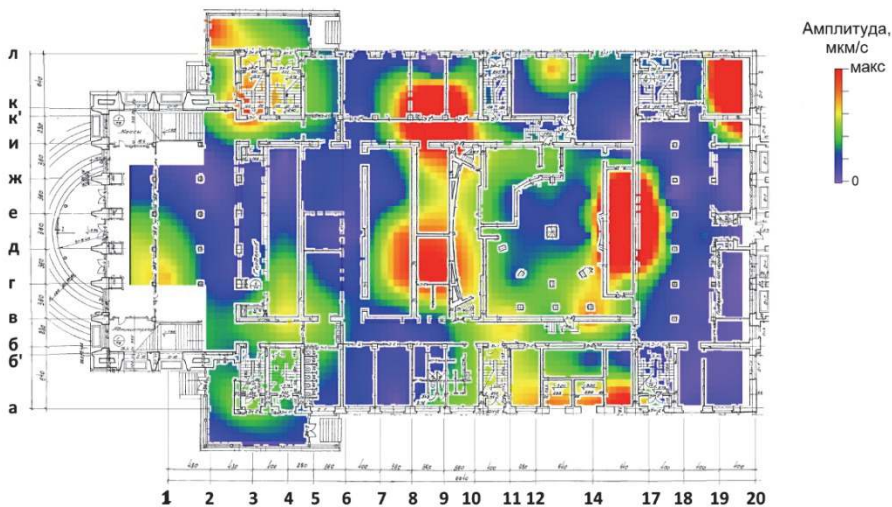


Рис. 47. Амплитудные распределения на основании 1-го этажа Дворца культуры по компоненте  $Y_{5,12}$  Гц

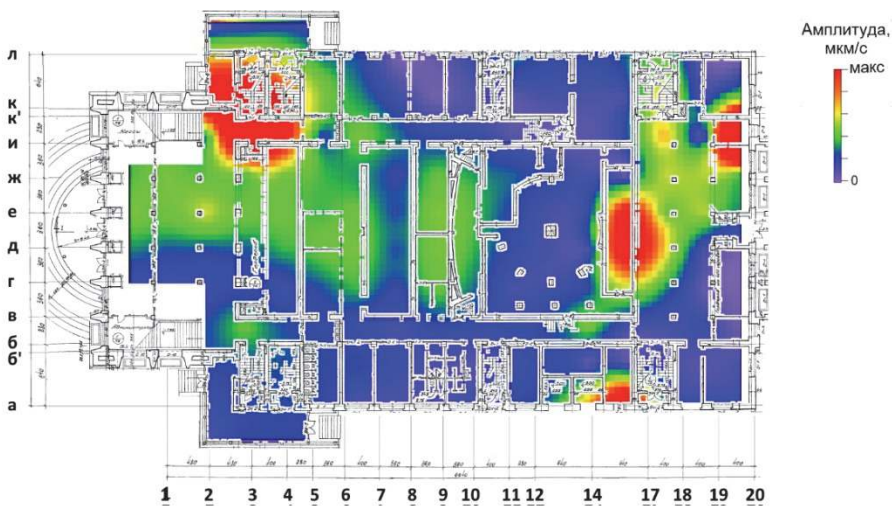


Рис. 48. Амплитудные распределения на основании 1-го этажа Дворца культуры по компоненте  $Y_{6,32}$  Гц

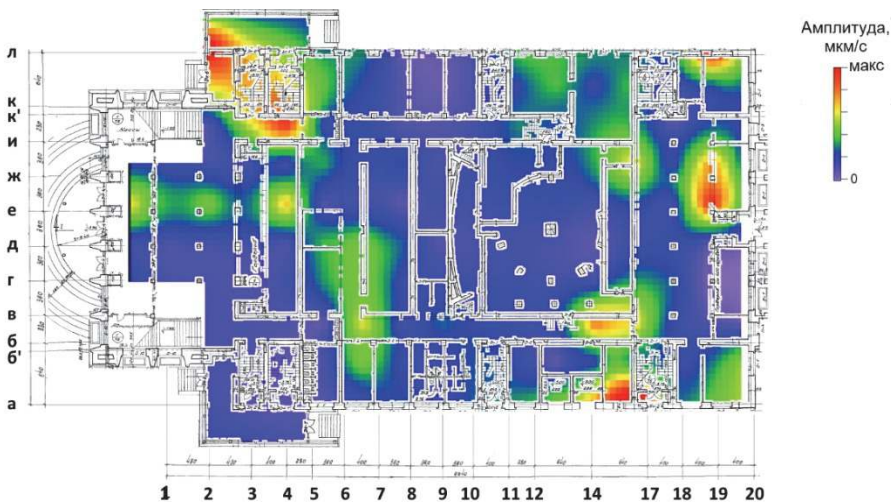


Рис. 49. Амплитудные распределения на основании 1-го этажа Дворца культуры по компоненте Z 3,6 Гц

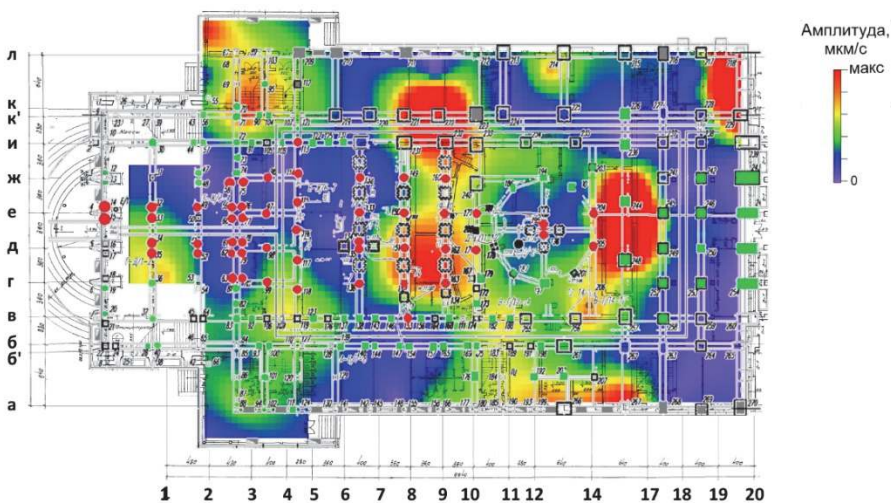


Рис. 50. Пространственное распределение амплитуд собственных колебаний здания, мода Y 5,12 Гц, и свай (устойчивых и неустойчивых)



При совместной визуализации амплитудных распределений и свай (устойчивых, неустойчивых) наглядно видно, что зоны повышенных амплитудных колебаний распределились по краям устойчивых свай, во многих из этих зон наглядно наблюдаются трещины в самом здании.

На рис. 50 показано пространственное распределение амплитуд собственных колебаний здания, мода  $Y$  5,12 Гц, и свай (устойчивых и неустойчивых).

## 5.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Модельный масштаб и местоположение опорных свай, обеспечивающих жесткое закрепление фундамента в местах установки, соответствовали реальным. Модельный материал свай и фундамента – цементобетон. Расчетная сетка равномерная, она включает в себя 1 115 315 элементов. Элементы расчетной сетки – равнобедренные тетраэдры с длиной грани 200 мм.

В результате моделирования было получено пространственное и частотное распределение собственных колебаний конструкции в диапазоне от 2,5 до 6,6 Гц.

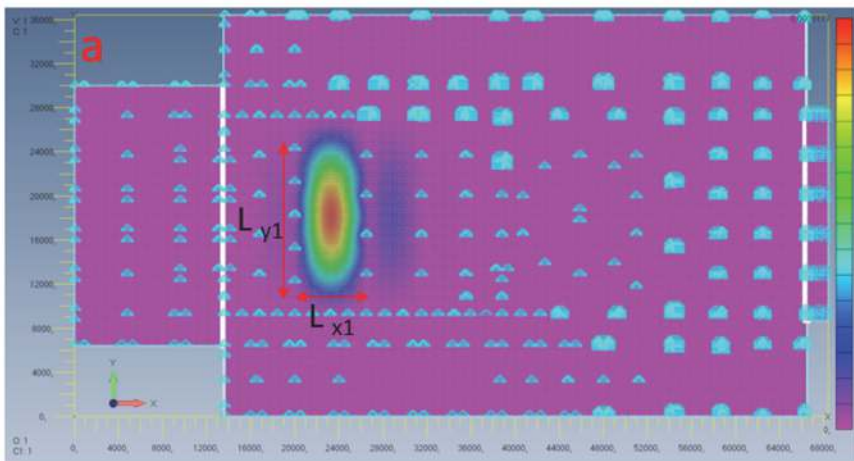
Опорные сваи фундамента являются узловыми точками, в которых колебания отсутствуют. Объем фундамента, находящийся между ними, свободно колеблется.

Пример свободных колебаний, полученных по результатам расчета, представлен на рис. 51 и 52.

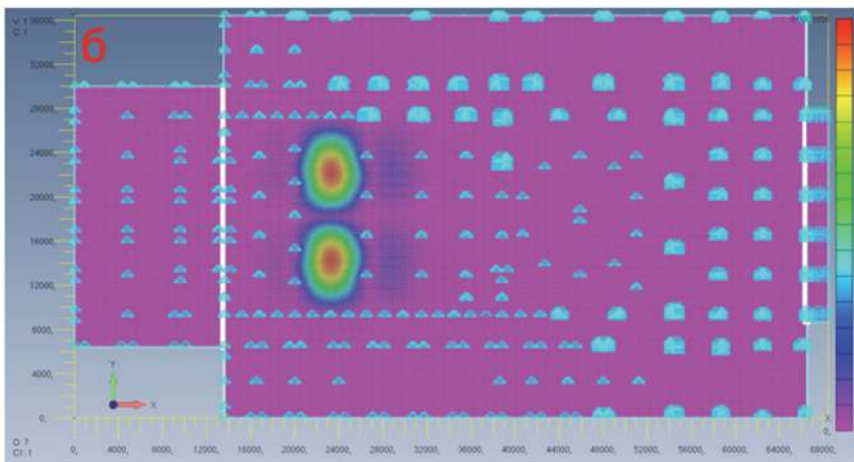
На указанном примере свободных колебаний можно видеть, что частоты мод колебаний участка, представленного на рис. 51, ниже, чем на рис. 52 (2,56 и 3,73 Гц – для первых и 2,94 Гц и 4,04 Гц – для вторых соответственно).

Это объясняется тем, что линейные размеры колеблющегося участка, ограниченного сваями, в первом примере ( $L_{x1}$  и  $L_{y1}$ ) больше, чем во втором ( $L_{x2}$  и  $L_{y2}$ ).

Таким образом, собственные колебания конструкции распределены по всей ее площади и имеют частоту тем большую, чем меньше линейные размеры колеблющегося участка между закреплениями (опорами фундамента).



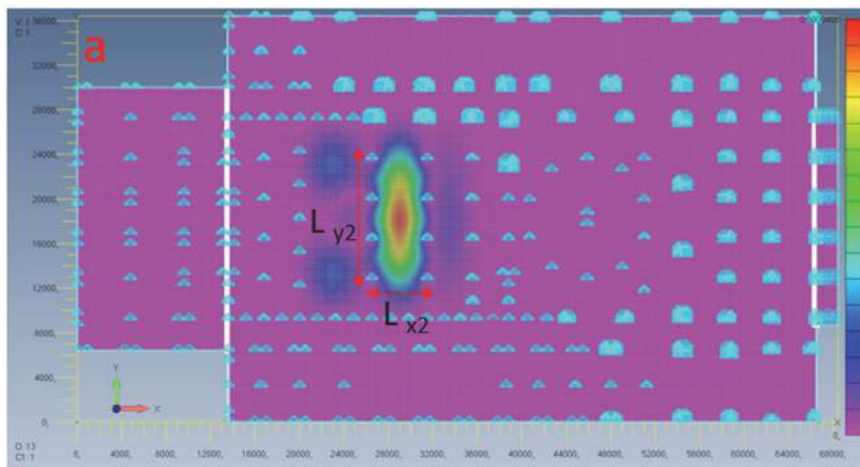
*a*



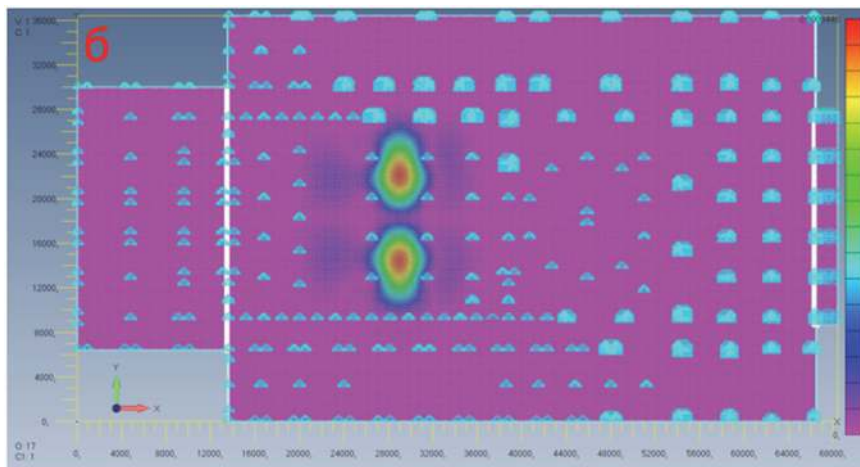
*б*

*Рис. 51.* Первые две колебательные моды, расположенные на участке X: 4–6; Y: В–И, соответственно плану здания, представленному на рис. 39:

*a* – первая мода частотой 2,52 Гц; *б* – вторая мода частотой 2,94 Гц. Голубым цветом отмечены местоположения свай.  $L_{x1}$  и  $L_{y1}$  обозначают размеры участка, находящегося между закреплениями



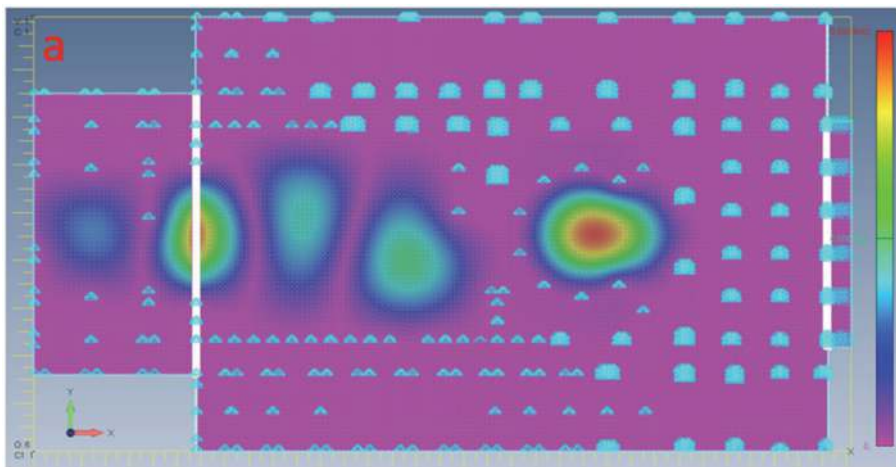
*a*



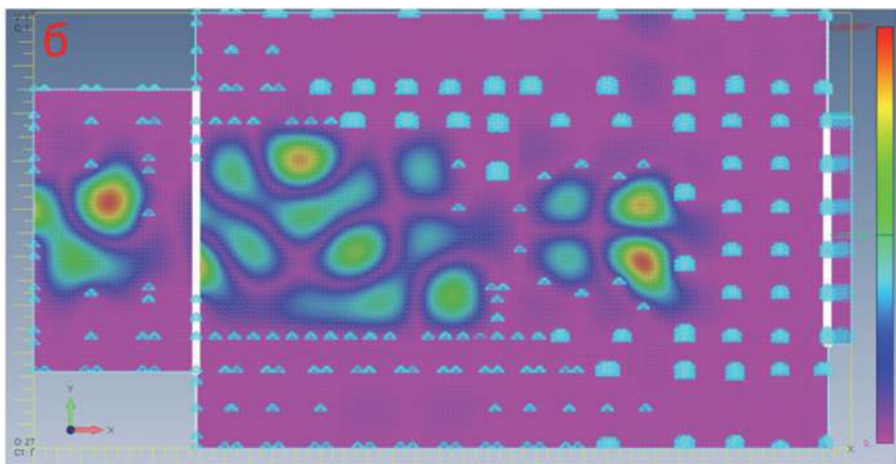
*б*

*Рис. 52.* Первые две колебательные моды, расположенные на участке  $X$ : 6–8,  $Y$ : В–И, соответственно плану здания, показанному на рис. 39:

*a* – первая мода частотой 3.73 Гц; *б* – вторая мода частотой 4.04 Гц. Голубым цветом отмечены местоположения свай.  $L_{x2}$  и  $L_{y2}$  обозначают размеры участка, находящегося между закреплениями



*a*



*б*

*Рис. 53.* Качественное изображение колебаний фундамента Дворца культуры при условии потери устойчивости свай. Месторасположение неустойчивых свай соответствует табл. 2; *a* – колебания в диапазоне от 1,03 до 1,53 Гц; *б* – колебания в диапазоне от 3,14 до 4,27 Гц

Амплитуда таких колебаний мала (и она уменьшается с повышением частоты) и не несет опасности для целостности конструкции.

В расчетном диапазоне от 2,5 до 6,6 Гц было определено 80 низших мод колебаний конструкции при учете целостности всех опор фундамента, что отражает нормальное распределение собственных колебаний. Результаты моделирования учитываются при обработке полученных натурных данных для вычленения колебаний конструкции, вызванных неустойчивым закреплением свай фундамента из нормального поля собственных колебаний, полученных в ходе математического моделирования.

На основе натурных измерений установлено, что 49 свай потеряли устойчивость. При учете месторасположения в плане неустойчивых свай создана математическая модель поврежденного здания Дворца культуры с параметрами, аналогичными параметрам неповрежденной модели. Неустойчивость свай учитывалась отсутствием жесткого закрепления в местах расположения таких свай.

Сборное качественное изображение, отображающее колебания фундамента на различных частотах, представлено на рис. 53.

На рис. 53 видно, что колебания охватывают большую площадь в центральной части здания, именно там, где располагаются неустойчивые сваи фундамента. Таким образом, эти участки являются свободной колеблющейся поверхностью наподобие мембраны, а нагрузка, которая должна была приходиться на сваи, расположенные в пределах неустойчивых областей, перераспределяется на сваи и несущие конструкции здания по периметру этих участков. Такое перераспределение нагрузки может существенно понизить как сейсмостойкость здания, так и приводить к разрушению несущих конструкций вследствие постоянного воздействия нагрузок, превышающих проектные.

## 6. ИНСТРУКЦИЯ ПО ОБРАБОТКЕ

Приведем пример простейшей обработки, которую можно выполнить в программах Excel и Surfer.

Пусть при измерениях вдоль профиля использовалось два датчика: один опорный, другой перемещался вдоль профиля из 19 точек измерений.

По итогам измерений у нас есть 19 записей на опорном датчике и 19 – на передвигаемом. Чтобы учесть изменяющийся уровень шумов, амплитуды записей с опорного датчика (с 2 по 19) делятся на амплитуды записи с опорного датчика в первой точке. Получаются коэффициенты нормировки:

$$k_{ij} = \frac{A_{1j}}{A_{1i}},$$

где  $i$  – номер записи опорного датчика с 1 по 19;  $j$  – отсчет по частоте;  $A$  – амплитуда на опорном датчике;  $k_{ij}$  – нормирующий коэффициент для  $j$  отсчета,  $i$  записи.

Такие коэффициенты высчитываются для каждой опорной записи, очевидно, что для первой все коэффициенты равны единице. На рис. 54 приводится алгоритм расчета для второй записи. Получен коэффициент нормировки для второй записи, далее амплитуды записи второго регистратора умножаются на полученные коэффициенты (рис. 54). После проведения данных операций дальнейшая обработка для площадных и профильных измерений немного отличается.

В случаях площадной съемки в пространственных координатах  $XU$ ,  $XZ$  или  $XU$  следует отобразить амплитуды колебаний, как это представлено на рис. 43–50. Для этого необходимо выбрать конкретную частоту

собственных колебаний, затем необходимо подготовить в Excel три столбца – координаты  $X$ ,  $Y$  приемника и соответствующую амплитуду (рис. 55).

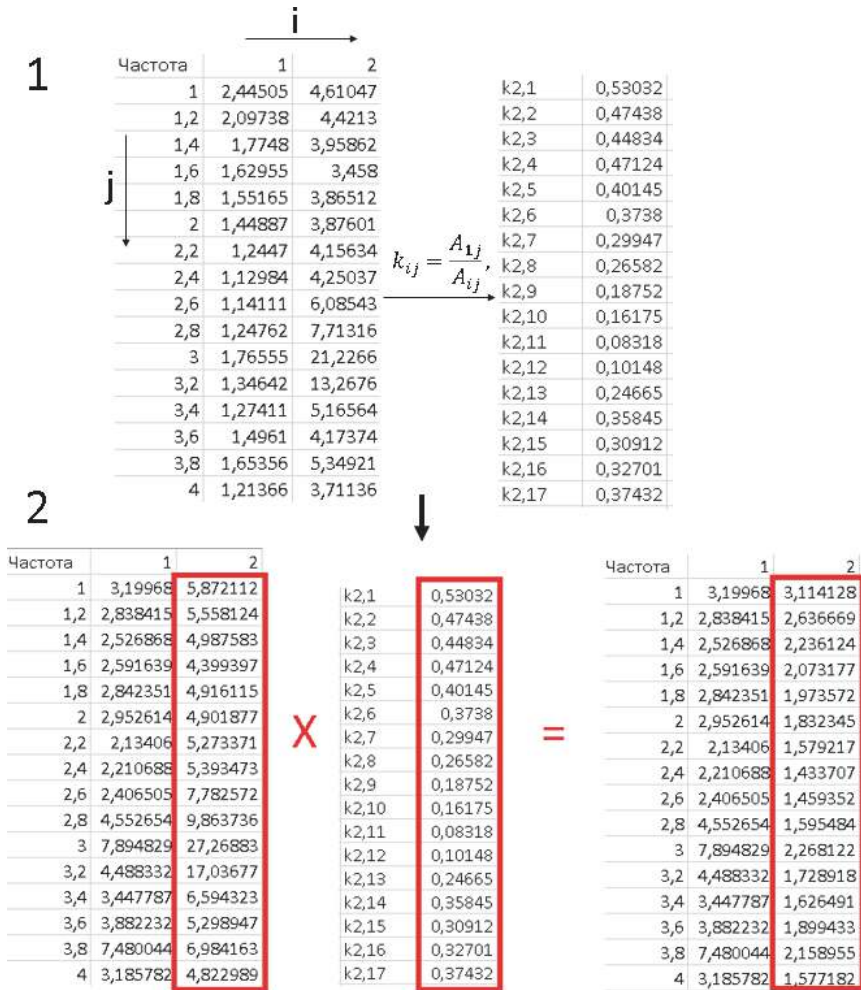


Рис. 54. Алгоритм нормировки записей на уровень шумов

В случаях профильной съемки по оси  $X$  откладываются пункты (точки) измерения или метры, по оси  $Y$  откладываются частоты, цветом

(ось  $Z$ ) выделяются амплитуды. Создав необходимые столбцы (рис. 56), их нужно импортировать в Surfer.

X	Y	Амплитуда
1	1	2,4657
1	2	4,0127
1	3	5,5597
1	4	7,1067
1	5	6,1047
1	6	5,1027
2	1	1,8277
2	2	3,3747
2	3	4,9217
2	4	6,4687
2	5	5,4667
2	6	4,4647
3	1	2,2377
3	2	3,7847
3	3	5,3317
3	4	5,8987
3	5	4,8967
3	6	3,8947

Рис. 55. Конечный вид таблицы площадных данных перед импортом в Surfer

	A	B	C
1	Точка	Частота	Амплитуда
2	1	1	3,19
3	1	1,2	2,83
4	1	1,4	2,52
5	1	1,6	2,59
6	1	1,8	2,84
7	1	2	2,95
8	1	2,2	2,13
9	1	2,4	2,21
10	1	2,6	2,4
11	1	2,8	4,55
12	1	3	7,89
13	1	3,2	4,48
14	1	3,4	3,44
15	1	3,6	3,88
16	1	3,8	7,48
17	1	4	3,18

...

147	1	30	1,28
148	2	1	3,11
149	2	1,2	2,63
150	2	1,4	2,23
151	2	1,6	2,07
152	2	1,8	1,97
153	2	2	1,83
154	2	2,2	1,57
155	2	2,4	1,433
156	2	2,6	1,459
157	2	2,8	1,59
158	2	3	2,26
159	2	3,2	1,72
160	2	3,4	1,62
161	2	3,6	1,89
162	2	3,8	2,15
163	2	4	1,57

...

Рис. 56. Конечный вид таблицы профильных данных перед импортом в Surfer



Построив соответствующую таблицу (рис. 56), откройте Surfer и создайте новую таблицу данных New Worksheet, в которую скопируйте ранее полученные данные. Сохранив ее, откройте New Plot Document. Создайте сетку данных Grid→Data→Название таблицы данных, построенной на прошлом шаге. В появившемся окне можно задать параметры интерполяции, максимальные значения по осям, шаг между точками данных и прочее (рис. 57).

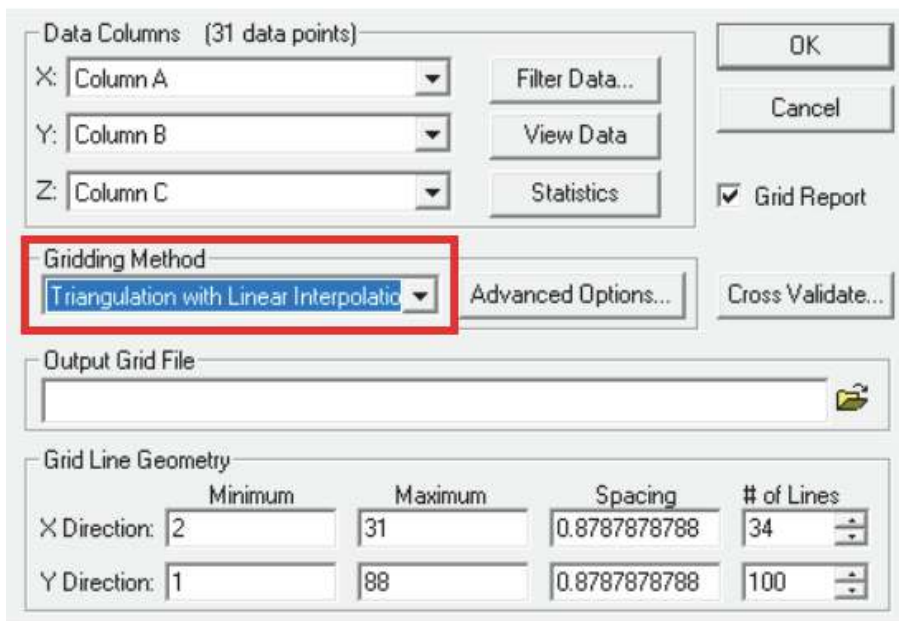


Рис. 57. Окно с параметрами построения сетки данных

В первую очередь убедитесь, что правильно выбраны колонны данных в  $X$  (точки измерения),  $Y$  (частоты),  $Z$  (амплитуды). В разделе Griding Method рекомендуется выбрать Triangulation with Linear Interpolation. Этот метод интерполяции данных позволяет получить наиболее правдивое изображение. Кроме того, можно попробовать метод Kriging. Остальные параметры – на ваше усмотрение. Сохраните файл, указав путь в формате `grd`. На данный момент была задана сетка в координатах: пункты измерения – частоты, в каждом узле сетки задается значение амплитуды, между узлами значения определяются выбранным методом

интерполяции. Осталось отобразить полученный результат: Map→Contour Map→Файл grd, выполненный на предыдущем шаге.

Полученное изображение будет черно-белым, для улучшения его внешнего вида рекомендуется посмотреть официальные инструкции к программе Surfer.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какой сигнал в данной методике относится к «паразитному», какой к «полезному»?
2. Когерентные и некогерентные паразитные шумы, как от них избавиться?
3. Что представлено на обобщенном амплитудном спектре?
4. Что такое «мода» стоячих волн, по какому принципу они нумеруются?
5. Что такое «узлы» и «пучности» мод стоячих волн?
6. Выведите уравнение стоячей волны.
7. От чего зависит амплитуда стоячей волны?
8. Каковы условия возникновения стоячей волны?
9. Как амплитуда стоячих волн в реальных средах отличается от амплитуды, рассчитанной по формуле (1) в разделе 1?
10. Какие стоячие волны называют «собственными»?
11. Чем обусловлено появление пучностей и узлов?
12. Как будет выглядеть первая изгибная мода продолговатого объекта, закрепленного на концах? На одном конце? Не закрепленного вообще («висящего в воздухе»)?
13. Как изгибные моды отличить от мод других типов волн по амплитудному спектру?
14. Какие произойдут изменения в амплитудном спектре продолговатого объекта (мост, труба, балка) при частичной и при полной потере одной из опор?
15. Чем отличаются спектры продолговатого объекта с одной жесткой опорой, разделяющей пролеты одинаковой и неодинаковой длины?
16. В чем отличие изгибных мод от мод сжатия-расширения?
17. Что такое остаточный ресурс? Как он определяется?

18. Что входит в набор регистрирующей аппаратуры? Зачем нужен опорный датчик?

19. Чем отличаются одноканальные и трехканальные датчики? Какие лучше?

20. Как выбрать шаг измерений? Возможно ли достоверно обнаружить дефект размером 1 м при шаге измерений 5 м?

21. *Решите задачу.* В объекте наблюдаются моды сжатия-расширения, известно, что скорость продольных волн  $V_p = 4400$  м/с, а третья мода существует на частоте 55 Гц. Найдите первые 5 мод.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Опарин В.Н.* Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях / В.Н. Опарин, Б.Ф. Симонов, В.Ф. Юшкин и др. – Новосибирск: Наука, 2010.
2. 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.
3. Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов. Руководящий технический материал РТМ 38.001-94. – М.: ВНИИНефть, 1994.
4. *Прокофьев А.Б.* Расчет собственных частот и форм колебаний трубопроводов с помощью программного комплекса // Известия Самарского научного центра РАН. – 1999. – № 2.
5. Lee U., Oh H. The spectral element model for pipelines conveying internal steady flow, *Engineering Structures*, 2003, Vol. 25.
6. 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.
7. *Нестеров С.В., Акуленко Л.Д., Коровина Л.И.* Поперечные колебания трубопровода с равномерно движущейся жидкостью // ДАН. – 2009. – Т. 427. – № 6.
8. *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.
9. *Акуленко Л.Д., Коровина Л.И., Нестеров С.В.* Собственные колебания участка трубопровода // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 2011. – № 1.
10. *Березнев А.В.* Влияние внутреннего гидростатического давления на частоты свободных колебаний криволинейного участка трубопровода // Известия вузов. Нефть и газ. – 2011. – № 3.
11. *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.

12. *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.
13. *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.
14. *Salley L., Pan J.* A study of the modal characteristics of curved pipes // *Applied Acoustics*. – 2002. – Vol. 63. – Iss. 2.
15. *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.
16. *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.
17. *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.
18. *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.
19. *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.
20. *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.
21. *Рычков С.П.* MSC.visualNASTRAN для Windows. – Москва: НТ Пресс, 2004.
22. 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 // *Опублик. в БИ*. – 2000. – № 16.
23. *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.
24. *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.
25. *Ахтямов А.М., Шагиев В.Р.* Идентификация неупругих видов закреплений трубопроводов // *Вестник Башкирского университета*. – 2016. – Т. 21. – № 1.

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

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

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

29. Bianchini A., Guzzini A., Pellegrini M., Saccani C. Natural gas distribution system: A statistical analysis of accidents data // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2018. – Vol. 168.

30. Clinton J.F., Bradford S.C., Heaton T.H., Favela J. The observed wander of the natural frequencies in a structure // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2006. – Vol. 96. – No. 1. – P. 237–257.

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

32. 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.

33. 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.

34. 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.

35. 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.

36. 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.

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

38. Колесников Ю.И. и др. О диагностике состояния конструктивных элементов сооружений по шумовому полю (по данным физического моделирования) // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012<sup>1</sup>. – № 1. – С. 3–11.

39. Колесников Ю.И. и др. О диагностировании потери устойчивости опор трубопроводов по акустическим шумам // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012<sup>2</sup>. – № 4. – С. 59–67.

40. 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 Издательство стандартов, 2004.

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

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

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

44. *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.

45. *Ngeljaratan L., Moustafa M.A.* Structural health monitoring and seismic response assessment of bridge structures using target-tracking digital image correlation // *Eng. Struct.* 2020. V. 213.

46. *Wang Y., Tumbava M.D., Thrall A.P., Zoli T.P.* Pressure-activated adhesive tape pattern for monitoring the structural condition of steel bridges via digital image correlation. // *Struct. Control Health Monit.* 2019.

47. *Xiao P., Wu Z.Y., Christenson R. et al.* Development of video analytics with template matching methods for using camera as sensor and application to highway bridge structural health monitoring. // *Civil Struct. Health Monit.* – 2020. – V. 10. – Pp. 405–424.

48. *Ngeljaratan L., Moustafa M.A.* Structural health monitoring and seismic response assessment of bridge structures using target-tracking digital image correlation // *Eng. Struct.* – 2020. – V. 213.

49. *Wang Y., Tumbava M.D., Thrall A.P., Zoli T.P.* Pressure-activated adhesive tape pattern for monitoring the structural condition of steel bridges via digital image correlation. // *Struct. Control Health Monit.* 2019.

50. *Xiao P., Wu Z.Y., Christenson R. et al.* Development of video analytics with template matching methods for using camera as sensor and application to highway bridge structural health monitoring. // *Civil Struct. Health Monit.* – 2020. – V. 10. – Pp. 405–424.

51. *Alani A.M., Tosti F., Bianchini Ciampoli L., Gagliardi V., Benedetto A.* An integrated investigative approach in health monitoring of masonry arch bridges using GPR and InSAR technologies // *NDT & E Int.* – 2020. – V. 115.

52. *Selvakumaran S. et al.* Combined InSAR and Terrestrial Structural Monitoring of Bridges // *IEEE Transact. Geosci. Remote Sens.* 2020. – V. 58 (10). – Pp. 7141–7153.



53. *Kaloop M.R., Hwang W.S., Elbeltagi E., Beshr A., Hu J.W.* Evaluation of Doring-Goh bridge using ambient trucks through short-period structural health monitoring system // *Struct. Eng. Mech.* – 2019. – V. 69(3). – Pp. 347–359.

54. *Kaloop M.R., Kim K.H., Elbeltagi E. et al.* Service-Life Evaluation of Existing Bridges Subjected to Static and Moving Trucks Using Structural Health Monitoring System: Case Study // *KSCE Civ. Eng.* 24. 2020. – Pp. 1593–1606.

55. *Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V.* Detecting underground cavities using micro-tremor data: physical modelling and field experiment // *Geophys. Prospect.* – 2018. – V. 66 (2). – Pp. 342–353.

56. *Федин К.В., Грищенко А.А.* Диагностика состояния устойчивости колонн газовых скважин методом стоячих волн // *Процессы в геосредах.* – 2021. – № 1(27). – С. 1039–1046.

57. *Федин К.В., Колесников Ю.И., Нгомайезве Л.* Определение пустот под бетонными плитами крепления верховых откосов плотины Новосибирской ГЭС по акустическим шумам // *Процессы в геосредах.* – 2020. – № 4 (26). – С. 970–975.

58. *Eponeshnikova L., Dergach P., Duchkov A.* Reducing the Cost of Microseismic Monitoring for Ensuring Safety in Mining // 82nd EAGE Ann. Conf. Exhibit. Workshop Progr.: Abstracts. Amsterdam, 2020. – Pp. 1–5.

59. *Хайкин С.Э.* Физические основы механики. – М.: Наука, 1971. – 752 с.

60. <https://ksonline.ru/wp-content/uploads/2017/03/30-4.jpg>

61. <http://fotokto.ru/photo/view/3823728.html>

62. *Корольков Д.И.* Оценка остаточного ресурса строительных конструкций: монография / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2020. – 168 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	3
<b>1. Краткая теория стоячих волн</b> .....	5
<b>2. Обследование трубопровода на устойчивость опор по акустическим шумам</b> .....	8
2.1. Физическое моделирование .....	10
2.1.1. Модель трубопровода с жесткими креплениями .....	10
2.1.2. Модели трубопровода с нежестким креплением и потерей крепления .....	13
2.2. Полевой эксперимент .....	18
2.3. Обработка, сравнение результатов моделирования и эксперимента, анализ результатов .....	19
2.3.1. Волны в трубе, жестко закрепленной с двух сторон .....	19
2.3.2. Волны в трубе, жестко закрепленной с одной стороны и свободно лежащей с другой.....	21
2.3.2. Сравнение результатов экспериментальных данных и компьютерного моделирования.....	23
<b>3. Определение устойчивости моста по акустическим шумам</b> .....	28
3.1. Бугринский мост .....	28
3.1.1. Полевой эксперимент .....	29
3.1.2. Обработка, сравнение результатов моделирования и эксперимента, анализ результатов .....	30
3.2. Мосты на Ямале .....	36
3.2.1. Определение устойчивости сооружения по формам колебаний опор или свай.....	36

3.2.2. Полевой эксперимент .....	39
3.2.3. Обработка и анализ результатов.....	40
<b>4. Определение устойчивости маяка по акустическим шумам .....</b>	<b>44</b>
4.1. Полевой эксперимент .....	44
4.2. Обработка, анализ результатов.....	44
<b>5. Определение устойчивости зданий при площадной съемке .....</b>	<b>49</b>
5.1. Физический эксперимент .....	49
5.2. Моделирование методом конечных элементов.....	57
<b>6. Инструкция по обработке.....</b>	<b>62</b>
<b>Вопросы для самоконтроля .....</b>	<b>67</b>
<b>Библиографический список.....</b>	<b>69</b>

**Федин Константин Владимирович  
Печенегов Дмитрий Александрович**

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСПРЕСС-МЕТОДИКИ  
ПАССИВНОЙ СЕЙСМИКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ  
ИНЖЕНЕРНЫХ ЗАДАЧ**

**Учебное-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 02.05.2023. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 50 экз.  
Уч.-изд. л. 4,41. Печ. л. 4,75. Изд. № 184//22. Заказ № 147. Цена договорная

---

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