

**ВОЗМОЖНОСТИ СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА  
РЕКОНСТРУИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ И ХРАНИЛИЩ  
СЖИЖЕННОГО ГАЗА**

УДК 67.21.21

**Антоновская Г.Н.**

*Институт экологических проблем Севера УрО РАН*

**Капустян Н.К.**

*Институт экологических проблем Севера УрО РАН,  
Институт физики Земли РАН*

**Басакина И.М.**

*Архангельский научный центр УрО РАН*

**Климов А.Н.**

*Московский государственный строительный университет*

Проблемы обеспечения безопасности зданий и сооружений базируются на проведении инструментальных измерений параметров состояния конструкций и грунтов их оснований. Одним из методов обследования объектов и мониторинга их состояния является наблюдение их собственных колебаний, производимых сейсмометрическими датчиками – велосиметрами или акселерометрами. Динамические характеристики колебаний и, в первую очередь, их частотный состав, амплитуда на соответствующих частотах и суммарная амплитуда колебаний в разных точках сооружения являются теми параметрами, которые наиболее ярко отражают важные свойства объекта, в том числе его целостность.

Существенно, что анализ частот и амплитуд как свидетельствует о свойствах материалов сооружения, так и позволяет выявить нарушения сплошности. Основой подхода является сопоставление наблюдений на объекте и результатов расчета колебаний с построением наиболее адекватной объекту расчетной модели, используя современные строительные программы (например, методом конечных элементов – Лира®). Проиллюстрируем это на двух примерах: сначала на экспериментальных данных, полученных при обследовании сильно разрушенного здания, и затем на примере прогноза картины колебаний с построением системы мониторинга для крупных хранилищ сжиженного газа.

**Пример 1. Здание Преображенской гостиницы на берегу бухты Благополучия о. Б. Соловецкий.**

Гостиница построена в XIX в., является памятником архитектуры и представляет собой трехэтажное здание достаточно простой прямоугольной формы, план симметричен относительно центрального входа и представляет собой коридорную систему по длинной оси здания с рядом помещений (номеров), расположенных направо и налево от коридора. Простота конструктивной схемы определила здание как объект для про-

работки методики, а необходимость реставрации здания дала работам практическую направленность.

В настоящее время здание сильно повреждено: частично отсутствуют перекрытия, имеются трещины в стенах. Для его восстановления и возможности дальнейшего функционирования необходимо решить вопрос о мероприятиях по укреплению несущих конструкций – в данном случае стен. Для этого, помимо выявления трещин, необходимо определить реальные деформационные свойства материалов стен выветренной кирпично-бутовой кладки с раствором. Выполненные лабораторные исследования проб кирпича и раствора не дают нужных интегральных оценок – эффективных параметров жесткостей, которые определяют напряженно-деформированное состояние конструкций и отражаются в формах собственных колебаний.

В течение ряда лет на простых по форме сооружениях, в том числе на Преображенской гостинице, нами прорабатывается методика оценки состояния здания и материала по результатам сейсмометрических измерений в разных точках объекта. На соответствующий способ получен патент [1], идея которого развивается нами дальше. Суть способа состоит в том, что заключение о состоянии сооружения дается на основании сопоставления измерений колебаний на разных формах, выполняемых в разных точках здания, и расчетов. При составлении расчетной модели основные проблемы связаны с заданием параметров материала стен и перекрытий, условий закрепления здания в грунте.

Материал стен – кирпичная кладка на известковом растворе с бутовкой из кирпичного боя и бутового камня XIX в. из местных материалов с наличием более поздних вставок, стены сильно выветрены и имеют сеть трещин различного размера и глубины проникновения. Произведена стяжка здания с помощью металлических поясов на каждом из трех уровней. Перекрытия сохранились частично. Таким образом, в расчетной модели предстояло вести перебор широким набором параметров жесткости и плотности материалов здания. Осложняет ситуацию достаточно плохое состояние ленточного бутового фундамента и основания здания, вследствие чего произошла заметная даже визуально неравномерная осадка.

Современные расчетные программы, применяемые в строительстве (например, ANSYS®), позволяют отобразить множество деталей. Таким образом, решение задачи для получения картины динамики сооружения можно вести в двух направлениях. Первое – детальный учет всех особенностей, второе – задание осредненных, эффективных значений, позволяющих с хорошим приближением получить согласие с экспериментом. Мы избрали второй путь по двум причинам. Во-первых, все параметры здания не известны детально, экспериментальные данные характеризуются определенной погрешностью (не менее 10%), т. е. они по су-

шеству также осредненные. Во-вторых, методически правильно применять более простые расчетные программы для возможности освоения их более широким кругом специалистов.

Обмерные материалы, а также данные по шурфам вблизи фундамента были предоставлены Соловецким музеем-заповедником. Для уточнения параметров грунтов основания, определяющих закрепление здания, нами была проведена малоглубинная сейсморазведка. Получены разрезы до глубин примерно 10 м (от поверхности), т.е. заведомо больших, чем толщина деформируемого слоя основания. Верхние 3 м представлены техногенными отложениями и моренными песками. Ниже залегают ледниковые отложения, представленные супесью пластичной, серого цвета, с частыми прослоями песка насыщенного водой, с включениями гравия и гальки до 10%. На глубине порядка 8-10 м от рельефа находится вторая преломляющая граница, которая предположительно относится к кровле отложений, представленных суглинками с прослойками песка, насыщенного водой.

Таким образом, основными природными причинами, вызвавшими деформации в фундаменте и стенах гостиницы, являются процессы, протекающие в грунтах: многократное проявления морозного пучения, процессы суффозии, просадочные явления.

Сейсмометрические наблюдения: регистрация и обработка. Основной является методика [2], при которой в различных точках здания (возможно и на грунте) регистрируются микросейсмические колебания, постоянно присутствующие во всех точках планеты. Эти колебания содержат смесь сигналов разной природы (естественных и техногенных), в том числе собственные колебания зданий, также присутствующие постоянно. Возбуждение собственных колебаний может производиться как ветровыми пульсациями, так и сигналами, приходящими из грунта основания. Особенностью собственных колебаний является то, что они определяются конструкцией здания, материалом и способом закрепления его в грунте. Для каждого здания присутствует набор собственных колебаний – так называемых форм колебаний, являющихся соответственно основным тоном и обертонами, различающихся значениями частот (периодов) и амплитуд. Существенно, что каждая из форм представлена в спектре регистрируемых микросейсм узкополосным пиком на соответствующей частоте, что позволяет отделить данный сигнал от многих других широкополосных сигналов. От техногенных пиков, связанных с работой электромашин, собственные колебания зданий отличает то, что частоты для зданий стабильны (не плавают) во времени и не связаны с частотой электросети  $f \neq 50/N$  Гц ( $N$  – целое число).

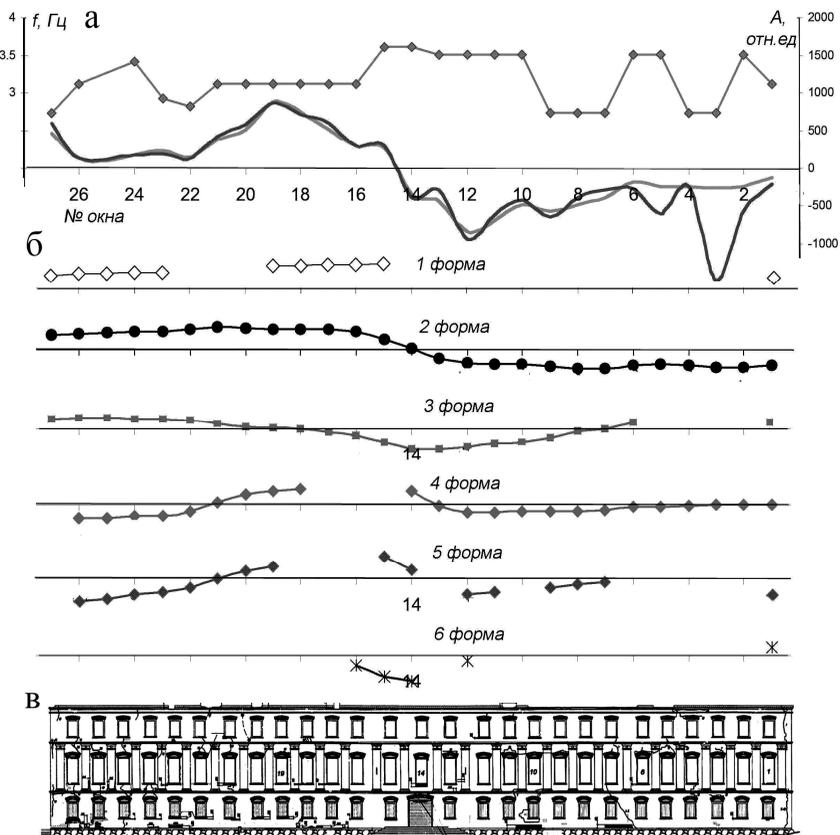
При натуральных наблюдениях сейсмометры располагались на подоконниках 2-го этажа гостиницы, это наиболее доступные места для про-

ведения измерений. Регистрация велась одновременно двумя автономными цифровыми трехканальными станциями с записью сигналов на ноутбук, сейсмометры СМ-ЗКВ (велосиметры) и несколькими трехкомпонентными акселерометрами фирмы Guralp® с автономными регистраторами GSR-24. Использование разных датчиков – велосиметров и акселерометров – позволило также решить вопросы комплексирования данных разных типов и понять, какие сейсмометры предпочтительны для подобных работ. Схема наблюдений была следующая: один датчик неподвижен (корреляционный), другие – перемещаемые по точкам на здании, что позволяло «сшивать» данные, получаемые в разные моменты времени. Датчики устанавливались по трем направлениям (Z, X, Y), наиболее информативными являются горизонтальные компоненты, они ориентированы в направлениях параллельно и перпендикулярно стенам фасадов. Был промерен набор точек на фасаде, на угловых секциях, а также в ключевых для динамики здания точках. Весь эксперимент занимает несколько часов, т.е. методика, во-первых, неразрушающая, и, во-вторых, достаточно оперативна.

При обработке сейсмических записей, полученных на здании, рассчитывались спектры мощности микросейсм и выделялись пики, присутствующие во всех точках объекта. Часть из них соответствует собственным частотам колебаний сооружения, другие – вынужденным, наведенным от техногенных источников (основной сигнал – от работы дизельной электростанции). Для собственных колебаний определялась амплитуда в каждой точке, затем для каждой частоты строился «профиль амплитуд» вдоль фасада здания. Помимо значений частот, для определения номера формы колебания важны соотношения фаз при наблюдениях в разных окнах. Использование автономных регистраторов GSR-24, синхронизованных от GPS или единых часов не дает нужной точности. Основу фазовых соотношений составляли наблюдения с велосиметрами, установленными на подоконниках в трех разных окнах и сведенные в единый файл данных. Проведя фильтрацию для каждой из частот собственных колебаний, видно, какие точки колеблются в фазе, а какие – в противофазе.

Сравнение результатов расчетов и эксперимента. Основой для сравнения являлось совпадения значений собственных частот и профиля амплитуд для наблюдаемых и расчетных форм собственных колебаний (рис.1,а). Следует учитывать, что на временных интервалах, принятых для натуральных наблюдений (20-30 мин), по сейсмометрическим данным значение собственной частоты колебаний можно определить с точностью до 0,05 Гц, амплитуду – до 20-30%. Также в каждой точке наблюдений возможны погрешности из-за трудностей фиксации сейсмометров на негоризонтальных элементах здания или плохого согласования этих элементов (например, подоконников) с телом здания.

## Предотвращение аварий зданий и сооружений



Сравнение экспериментального (темная линия на графике а) профиля амплитуд колебаний фасада Преображенской гостиницы (в) с суммированной формой (светлая линия на графике а) расчетной модели, полученной детальным подбором при сопоставлении форм колебаний с разным заданием параметров материала стен (б)

Рис. 1. Результаты сейсмометрических обследований фасада здания Преображенской гостиницы постройки XIX в.

При анализе спектров записей доминирующее колебание соответствует пику на частоте около 3 Гц – пик имел центральную частоту  $f = 2,7 \div 3,5 \text{ Гц}$  в зависимости от участка здания, в котором велось наблюдение (рис.1,а (график с ромбами)). Разброс значений связан с рядом причин: влиянием трещин, создающим дополнительные колебания, накладывающиеся на основные; наложением нескольких мод колебаний, близких по частоте. Обращает внимание на рис.1,а то, что правое крыло

гостиницы дает большие вариации частоты, чем левое. При обработке приняты значения амплитуд, соответствующие абсолютному максимуму в этом частотном диапазоне. Следует отметить также, что оценка величин амплитуд по спектрам дает абсолютные значения, при построении профиля колебаний вдоль фасада учитывались фазовые соотношения между точками (см.рис.1). Видно, что, несмотря на флуктуации, доминирует профиль колебаний, соответствующий второй форме.

На первом этапе при расчетах варьировались параметры жесткостей и плотностей стен и перекрытий, а также условия закрепления грунта таким образом, чтоб получить вторую форму колебаний с частотой, близкой к наблюдаемой. Более подробно этот вопрос рассмотрен в работе [3], где обсуждается проблема единственности и устойчивости решения. Следует отметить, что принятые параметры модели в основном соответствуют материалу стен и перекрытий по визуальному определению материала. Попытка получения большего совпадения с экспериментальной кривой путем введения в расчет основных трещин или устранения части перекрытий практически не изменила картину. Тем не менее, полученный результат обнадеживает с точки зрения возможности путем несложных сейсмометрических наблюдений получить оценку параметров материала сооружения.

При частой расстановке датчиков (см.рис.1) наблюдаются достаточно значительные флуктуации амплитуд, но полиномиальный тренд дает также кривую, характерную для второй формы колебаний. Сопоставление результатов мониторинга в течение ряда лет (2007-2009 гг.) указывает на то, что размах флуктуаций является параметром, характеризующим степень ослабления конструкции.

На рис.1,а показан профиль амплитуд на частоте основного максимума, положение которого на частотной оси в зависимости от точки наблюдения может варьироваться. Мы рассматривали полосу от 2,4 до 3,6 Гц. В верхней части рис.1 показана кривая значений доминирующих частот максимума, соответствующего собственным колебаниям здания. Учитывая вариации частоты, мы предположили, что регистрируемый максимум представлен не строго одной формой, а суперпозицией колебаний набора форм с близкими частотами. Расчет дает в полосе частот 2,4-3,6 Гц ряд из 6 форм (рис.1,б).

На основании расчетов и значений частот наблюдаемого максимума мы постарались подобрать такую суперпозицию расчетных колебаний, что максимально удовлетворить экспериментальной кривой. При этом предполагалось, что наличие трещин может существенно ослабить проявление соответствующей формы в конкретной точке. Нам это удалось (см.рис.1,а) – получено практически идеальное совпадение (выпадают только окна 5 и 3, где, по-видимому, сыграли роль трудности установки датчиков). На рис.1,б показано, какие точки и какие формы коле-

баний учитывались при суперпозиции. Видно, что 1-я форма присутствует во многих точках левого крыла и отсутствует для правого, что связано, по-видимому, с разницей в сочленении стен с фундаментом вследствие выветренности контакта. Форма 2 присутствует практически везде, что подтверждает правильность принятой модели колебаний в качестве первого приближения. Формы 3 и 4 также присутствуют в большинстве точек, причем для 3 формы отсутствие колебаний в правой части здания может быть связано с выветренными зонами под деревянными подоконниками окон. Отмечается присутствие более высокочастотных форм (4-6) в центральной части здания, где по плану расположен двусветный холл.

Помимо регистрации велосиметрами СМЗ-КВ в окнах 2 эт. здания, на его углах велись наблюдения 3-компонентными акселерометрами СМГ-5. На рис.2 схематично представлены амплитуды колебаний здания для 2-й формы, как наиболее демонстративной, на которую наложены значения перемещений углов по осям  $Y, Z$  – экспериментальные (ромбики на рис.2) и расчетные значения (квадратики на рис.2), причем последние получены суммированием 1-4 форм. В нижней части рис.2 показаны для  $Z$  компоненты амплитуды этих форм и их сумма для крайних окон переднего фасада.

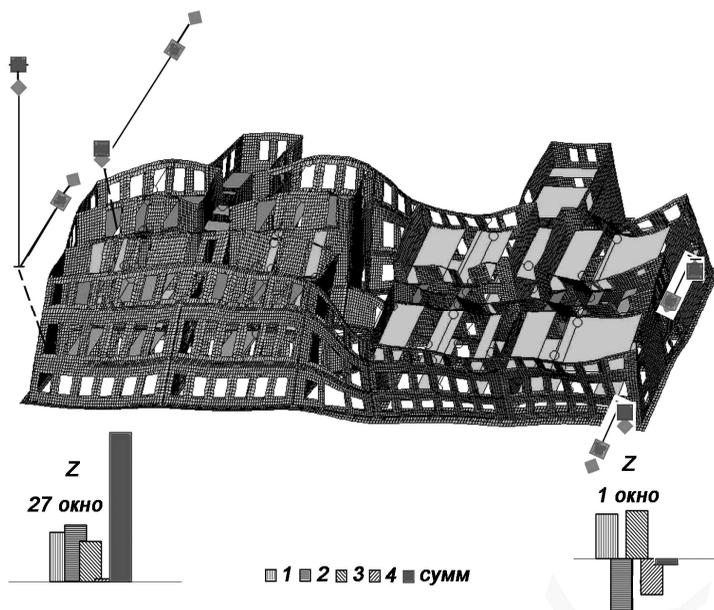


Рис. 2. Схема Преображенской гостиницы при колебаниях 2-й формы: 1-4 – формы колебаний гостиницы; сумм – суммирование всех форм

Видно также хорошее согласие эксперимента и расчета именно при суммировании форм с близкими частотами. Обратим внимание на следующее. Здание представляет собой конструкцию, симметричную в плане относительно центральной оси, проходящей через 14 окно, поэтому резонно ожидать симметрии в значениях величин перемещений при колебаниях. Но как в эксперименте, так и в суммарных расчетных значениях эта симметрия не соблюдается ни по оси Y, ни по оси Z. Это связано исключительно с особенностями суперпозиции колебаний, что продемонстрировано на рис.1. Мы подчеркиваем этот момент, т.к. возможна ситуация, когда по рекогносцировочным замерам разница в амплитудах по углам может трактоваться как разница в закреплении здания к фундаменту, в частности, левый передний угол может рассматриваться как имеющий очень малую связь с фундаментом, чего нет на самом деле.

Перейдем к профилю амплитуд колебаний по вертикали – рассмотрим результаты измерений при расстановке датчиков одновременно в 19 окне на подоконниках 1-го, 2-го и 3-го этажей (рис. 3). Видно, что суммирование форм дает хорошее совпадение с экспериментом, особенно на 1-м и 2-м этажах. На 3-м этаже реальные колебания происходят с большей амплитудой, чем расчетные, ввиду меньшей жесткости стен в верхней части, не перекрытой кровлей и более подверженной выветриванию. Учет только 2-й формы колебаний не дает нужной сходимости данных.

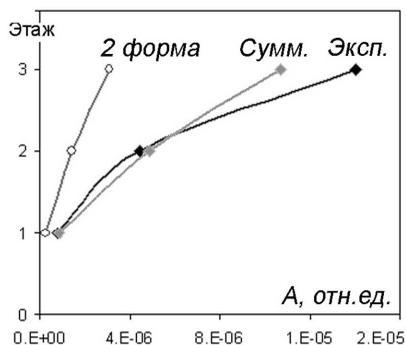


Рис. 3. Профиль амплитуд колебаний Преображенской гостиницы по вертикали

Приведенные материалы позволяют предложить некую оценку отношений расчетных и экспериментальных значений амплитуд  $R \sim A_R/A_E$ , отцентрированную таким образом, чтобы среднее значение по ансамблю  $\langle R \rangle = 1$ . На рис.4 показана такая оценка для наблюдений на переднем фасаде гостиницы, на врезке – распределение значений R. Пунктиром показана полоса, ограничивающая коридор стандартного отклонения относитель-

но медианного значения. Видно, что некоторые точки выходят из полосы. Приведенный ниже обмерный чертеж фасада показывает, что именно в этих точках наблюдается скопление трещин. Таким образом, полученную оценку  $R$  можно использовать для алгоритмизации обработки.

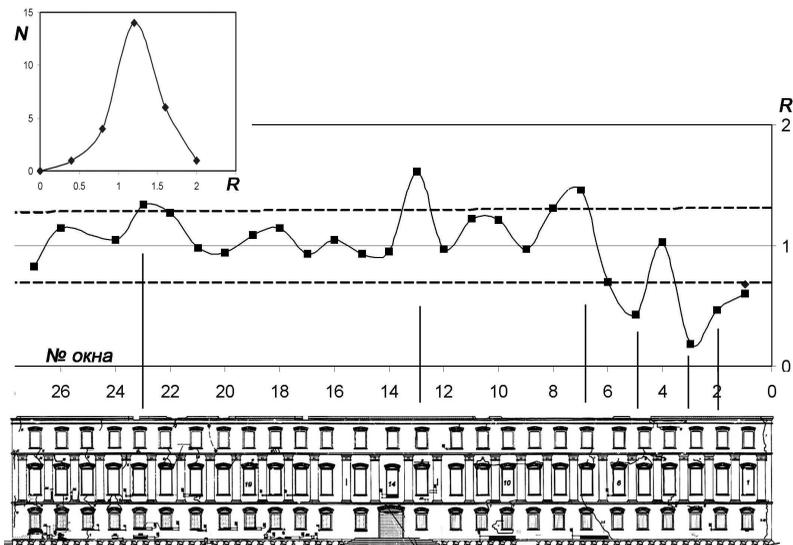


Рис. 4. Оценка  $R$  отношений расчетных и экспериментальных значений амплитуд Преображенской гостиницы и ее связь с реальной картиной состояния сооружения

### Пример 2. Хранилище сжиженного газа

Хранилище сжиженного газа представляет собой стальной стакан, заполненный жидким газом, находящийся внутри бетонного резервуара с крышкой (рис.5). Внутренний резервуар опирается на бетонное кольцо и отделен от внешнего изолирующим материалом. Основная сложность мониторинга состояния таких объектов состоит в том, что крайне нежелательно размещение датчиков (например, акусто-эмиссионных) внутри конструкции. В данном случае, пожалуй, единственный выход – регистрация собственных колебаний системы сейсмометрами, установленными на внешнем резервуаре.

Была построена расчетная модель сооружения (см.рис. 5), выполнен расчет параметров собственных колебаний и проведено изучение возможностей создания системы мониторинга объекта методом собственных колебаний. Форма собственных колебаний и их частоты зависят от условий закрепления резервуара, а именно от упругости основания и упругости среды, в которой находятся стенки резервуара.

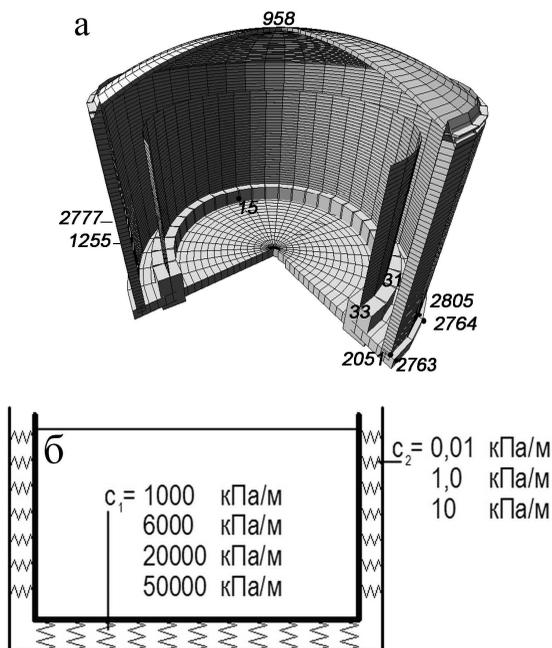


Рис. 5. Расчетная модель хранилища сжиженного газа:  
 а – цифры – номера элементов, в которых размещены гипотетические датчики колебаний;  
 б – схематический разрез с параметрами изолирующего материала

Для выявления зависимости динамических характеристик резервуара от способа его закрепления и упругости среды были проведены численные эксперименты, в которых варьировались значения коэффициента постели для дна резервуара ( $C_1$ ) – учет упругости основания; и коэффициент постели стенки резервуара ( $C_2$ ) – учет упругости среды (см. рис. 5). Численное моделирование различных вариантов закрепления резервуара выявило следующие особенности:

- при малых значениях коэффициентов постели дна резервуара  $C_1$  (1000 кПа/м, 6000 кПа/м) в формах колебаний резервуара присутствуют формы колебания дна. Причем при увеличении коэффициента постели  $C_1$  частота колебаний дна повышается, и колебания наступают на формах более высокого номера. При этом значение коэффициента постели стенки  $C_2$  практически не оказывает влияния на частоту колебаний дна, но влияет на номер, с которого начинают появляться формы колебания дна (табл. 1);
- при больших значениях коэффициента постели дна резервуара  $C_1$  (20000 кПа/м, 50000 кПа/м) формы колебаний дна отсутствуют.

## Предотвращение аварий зданий и сооружений

При увеличении параметра  $C_1$  не происходит заметного влияния на распределение частот, соответствующих определенным формам колебаний стенки (табл.2).

- увеличение параметра  $C_1$  при постоянном  $C_2$  ведет увеличению частоты первых форм колебаний при уменьшении наблюдаемого диапазона частот (табл.3).

Таблица 1

$C_1$ , кПа/м	$C_2$ кПа/м	Номер формы, с которого появляются колебания днища	Соответствующая частота, Гц
0,01	1000	30	0,84
0,01	6000	76	2,06
10	6000	46	2,06

Таблица 2

$C_1$ , кПа/м	$C_2$ , кПа/м	Частоты 1-100 форм, Гц	Частоты 101-200 форм, Гц
10	20000	1,25 – 2,62	
10	50000	1,26 – 2,64	
0,01	20000	0,22 – 2,33	2,33 – 3,20
0,01	50000	0,26 – 2,33	2,33 – 3,20

Таблица 3

$C_1$ , кПа/м	$C_2$ , кПа/м	Диапазон форм	Диапазон частот, Гц
0,01	50000	1 – 200	0,26 – 3,20
1,0	50000	1 – 100	0,47 – 2,36
10	50000	1 – 100	1,26 – 2,64

Таким образом, численное моделирование показывает, что, наблюдая собственные колебания, возможно вести мониторинг состояния изоляционного материала, причем основываясь сразу на нескольких характеристиках (частота, номер формы).

На рис.6 показаны схема деформации резервуара, заполненного сжиженным газом (1), форма колебаний, характерная для днища (2) и стенки (3). На рис. 7 и 8 – примеры форм собственных колебаний внутреннего и внешнего резервуаров.

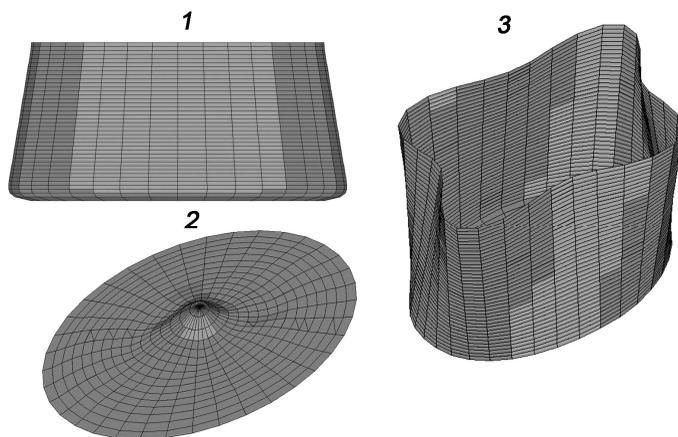


Рис. 6. Схема деформации резервуара

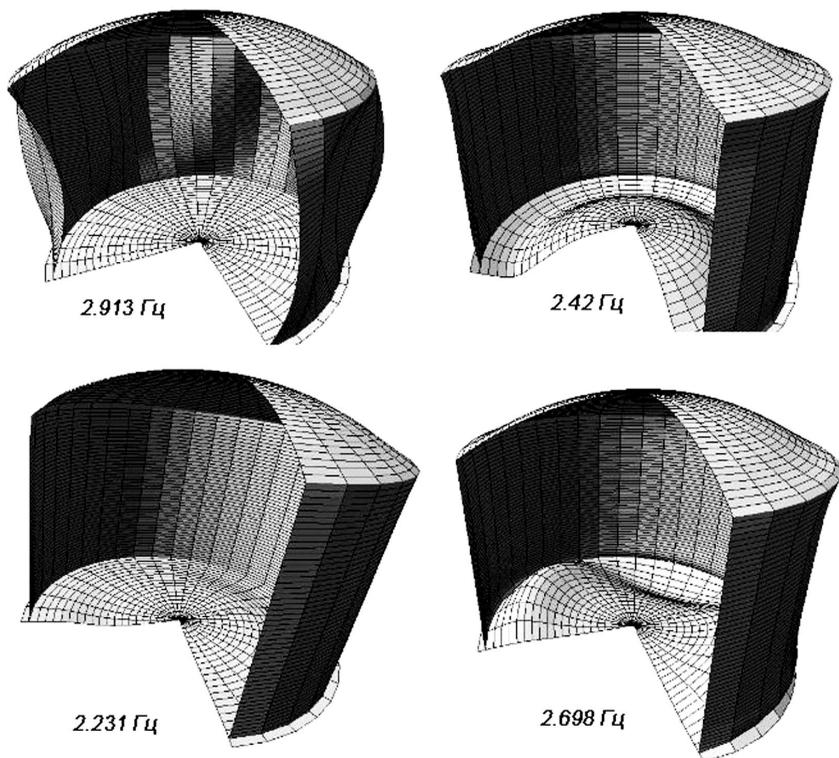


Рис. 7. Примеры форм собственных колебаний внешнего резервуара

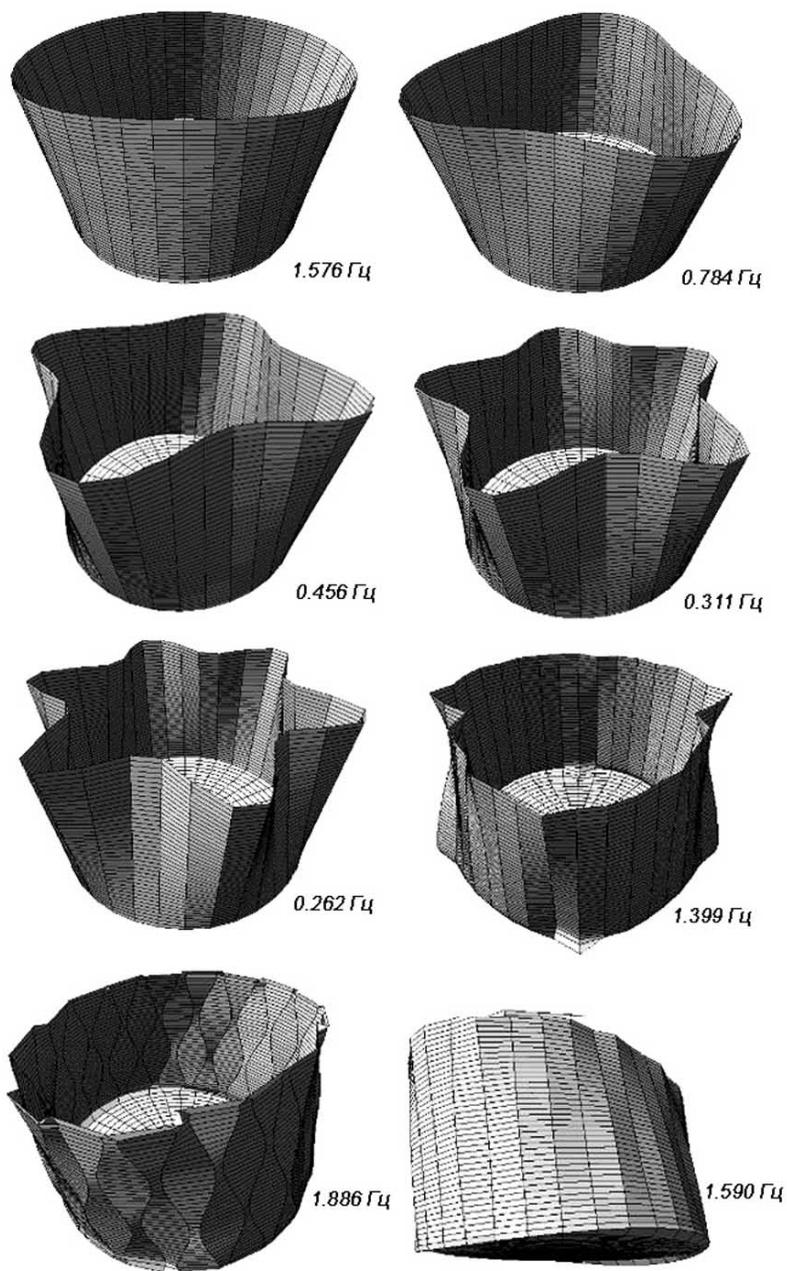


Рис. 8. Примеры форм собственных колебаний внутреннего резервуара

Как было показано в примере 1, суммируя собственные колебания, можно получить картину колебаний в определенных точках объекта с хорошей точностью, совпадающей с реальностью. Воспользовавшись этим фактом, мы выбрали несколько точек, отмеченных на рис.5, в которых «установили» гипотетические датчики колебаний, причем оси X, Y, Z направили так, что в горизонтальной плоскости оси совпадают с радиальными и тангенциальными осями в точках. Точки были выбраны следующим образом – вблизи днища (удобство установки датчиков в натуре), причем на стенке (т. 1255, 2051, 2805) и на фундаменте (т. 2777, 2763, 2764), на противоположных концах диаметров (15 и 33 для внутреннего резервуара и внешнего (т. 1255, 2051), с шагом  $20^\circ$  между точками (т. 31-33, 2051-2805, 2763-2764). Затем по результатам расчетов были составлены синтетические спектры мощности наблюдаемых колебаний (рис.9), поглощение колебаний изоляционным материалом не учитывалось, так как это не оказывает принципиального влияния на результат.

Анализ рис.9 показывает следующее:

- частоты собственных колебаний внутреннего резервуара начинаются с частот от 0,2 Гц и выше, в то время, как для внешнего – примерно от 2 Гц и выше (отмечено на рис.9 пунктиром). Таким образом, ниже 2 Гц мы наблюдаем в чистом виде колебания внутреннего стакана. Методически это важно, так как в этом диапазоне частот мы можем вести мониторинг внутренней части хранилища;
- в горизонтальной плоскости присутствует отчетливый пик на частоте 1,4 Гц (29 форма колебаний), по мощности на 3 порядка выше всех прочих колебаний, что существенно упрощает задачу экспериментального выделения собственных колебаний. Именно этот пик может быть взят как основной для мониторинга.
- датчики, размещенные диаметрально противоположно дают одинаковые значения, но сдвиг на  $20^\circ$  существенно меняет картину. Установка на стенке внешнего резервуара или рядом на фундаменте практически не влияет на результат. Все это важно для наиболее выгодного размещения приборов.

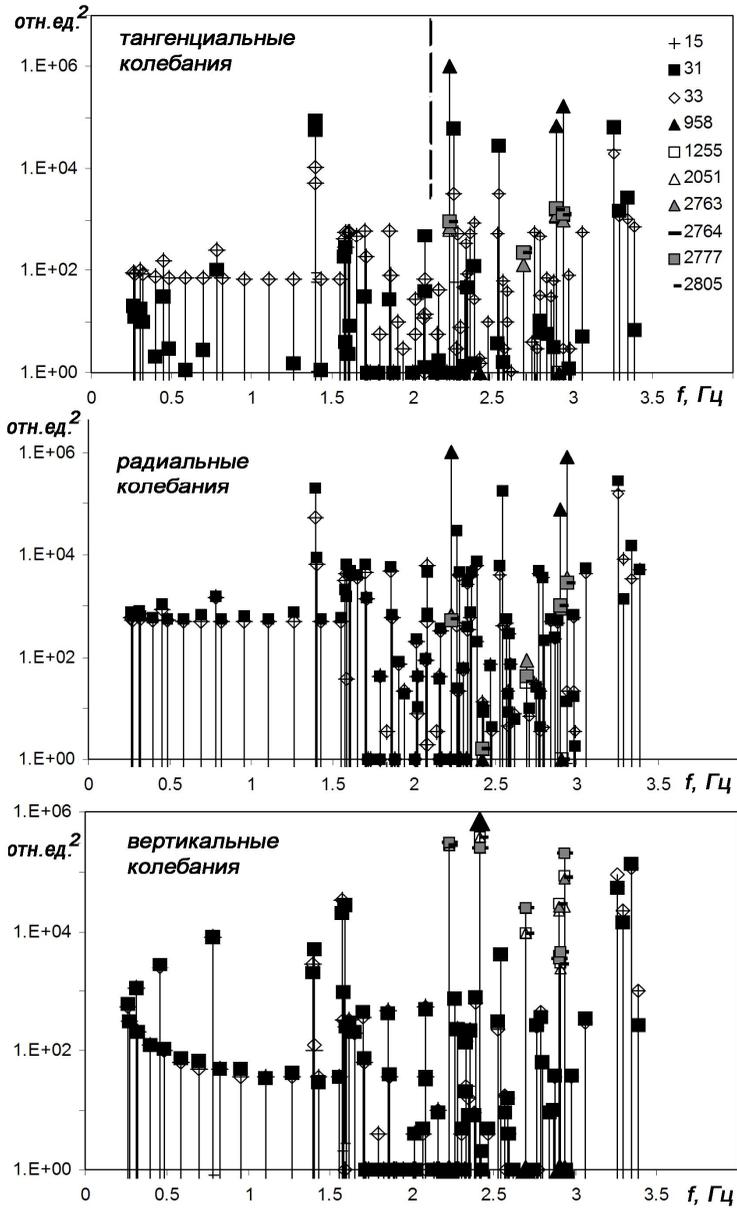


Рис. 9. Синтетические спектры мощности наблюдаемых колебаний резервуара

### Вывод

Представлена новая возможность сейсмометрических наблюдений для оценки параметров материала сооружения и мониторинга за его состоянием путем анализа записей микросейсм на объекте и сопоставления их с расчетной схемой. Практическое применение данные работы могут найти в первую очередь в задачах реконструкции зданий и мониторинга ответственных объектов.

### Библиографический список

1. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В., Басакина И.М., Янович А.А. Способ определения параметров физического состояния здания и/или сооружения. Патент RU 2365896. Заявка № 2008113087.
2. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н. Инженерно-сейсмические исследования геологической среды и строительных конструкций с использованием ветровых колебаний зданий. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 156 с.
3. Антоновская Г.Н., Янович А.А. Сопоставление сейсмометрических измерений и расчетов динамики сооружений // Шестая Всеукраинская научно-техническая конфер. «Строительство в сейсмичных районах Украины». Киев: НДІБК, 2008. С. 253-259.