Проведение микродинамических испытаний аппаратно-программным мобильным диагностическим комплексом «Стрела-П»

Введение

Цель предложенной презентации дать наглядное представление интересующимся лицам по проверке и контролю прочности, устойчивости и определению физического износа (остаточного ресурса) зданий и сооружений с помощью АПМДК «Стрела-П».

АПМДК «Стрела-П» разработан в ООО «Центр исследований экстремальных ситуаций» (ЦИЭКС), обеспечивающий диагностику состояния эксплуатируемых зданий и сооружений. Данный комплекс представляет собой новое поколение аппаратуры для динамического анализа устойчивости зданий и сооружений и вышеуказанных параметров строений, основанный на автоматическом компьютерном анализе изменений спектральных характеристик обследуемого здания сопоставлением (отношением) экспериментально замеряемых и расчетных (проектных) жесткостей опасных сечений конструкций по отношению к квадратам соответствующих частот собственных колебаний.

Комплекс предназначен для оперативного неразрушающего контроля и мониторинга состояния несущих конструкций зданий и сооружений при решении задач по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, а так же для оценки сейсмостойкости объектов в сейсмически активных регионах.

Комплекс позволяет провести микродинамические испытания импульсным методом и оценку технического состояния объектов в соответствии с руководящими документами по обследованию и мониторингу технического состояния зданий, на основании результатов которых принимается решение о возможности дальнейшей эксплуатации зданий и сооружений, безотлагательном ремонте отдельных конструктивов объекта в процессе эксплуатации или в составе текущего или капитального ремонта, и являющимся наиболее информативным методом экспресс-диагностики, предшествующим принятию решения о проведении комплексного (детального) инструментального обследования несущих конструкций, включающего в себя определение прочностных характеристик и физических характеристик материалов данных конструкций ультразвуковым методом или механическим методом неразрушающего контроля, в соответствии с руководящими документами, в составе капитального ремонта.

Состав АПМДК «Стрела-П»

Комплекс «Стрела–П» включает следующие основные компоненты:

- шесть измерительных модулей;

- базовый модуль;

-переносной высокопроизводительный многофункциональный компьютер (ноутбук) с батарейным электропитанием на рабочем месте оператора АПМДК «Стрела-П» (с программным обеспечением «CentBox»);

- пять соединительных 6–жильных высокопрочных измерительных кабелей,

- пластичные грузы массой 20 кг – 1 шт. и 40 кг – 1 шт.

-аккумуляторный блок и переходные кабеля

Измерительные модули предназначены для преобразования ускорений механических колебаний объектов в электрический сигнал.

Каждый измерительный модуль содержит сертифицированный трехкомпонентный акселерометрический датчик колебаний со встроенными калиброванными усилителями. Измерительные модули, входящие в состав комплекса «Стрела–П», выполнены на базе сертифицированного сейсмоприемника пьезоэлектрического А1638.

Базовый модуль предназначен для преобразования в цифровой вид аналоговых сигналов, получаемых с измерительных модулей, и передачи их в компьютер комплекса или во встроенный компьютер. Содержит сертифицированное многоканальное 14-разрядное микропроцессорное программно-аппаратное устройство (типа Е-14-440) аналого-цифрового преобразования (АЦП) и ввода данных в компьютер по USB–интерфейсу.

Программный пакет «CentBox» — специализированное программное обеспечение, предназначенное для сбора, обработки, анализа и хранения аналоговых сигналов, получаемых от измерительных модулей – аналоговых пьезоэлектрических акселерометров.

Состав АПДМК «Стрела П»

- **Измерительные модули**

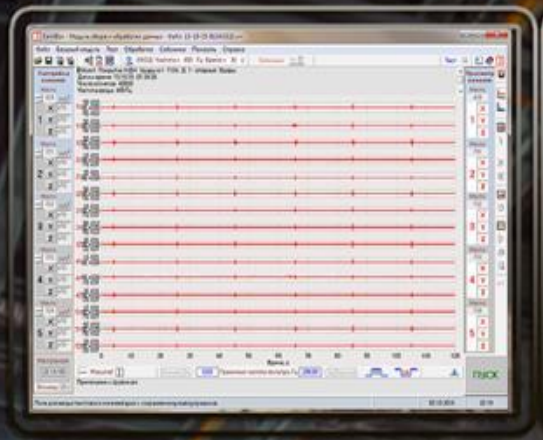
- **Базовый модуль**

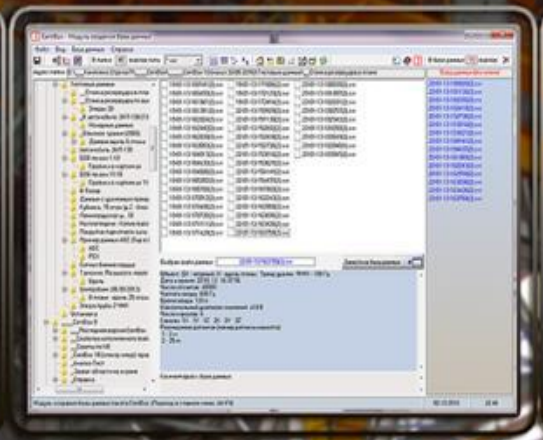
- **Пластичные грузы на 20 и 40 кг**

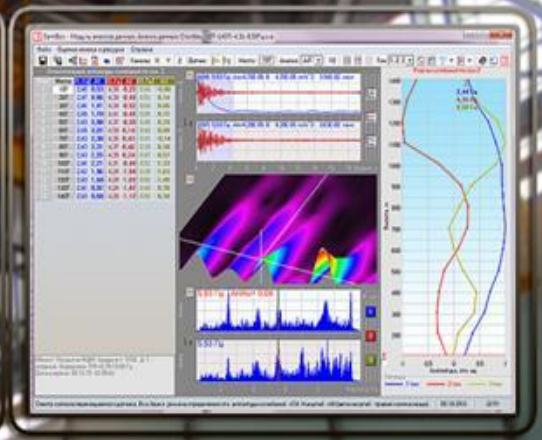
СБОР И ОБРАБОТКА ДАННЫХ ВИБРАЦИИ

СОЗДАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ



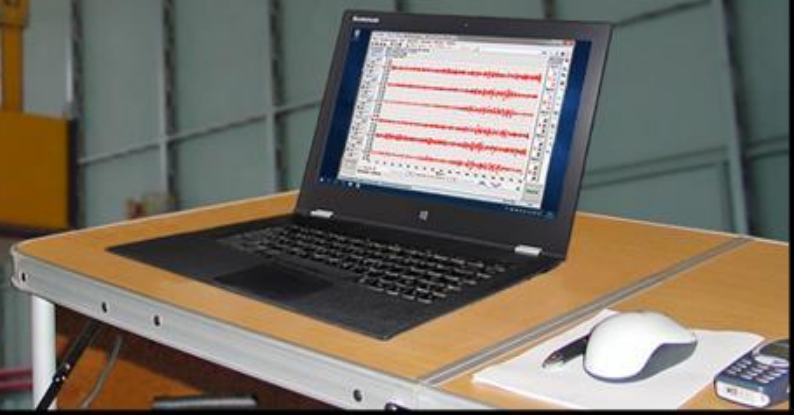




Аппаратно-программный диагностический комплекс «Стрела-П»

с пакетом программного обеспечения «CentBox»

Для сбора, обработки и анализа сигналов вибрации при оперативном неразрушающем контроле зданий, сооружений и других строительных конструкций



МИКРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

Основные руководящие документы по мониторингу технического состояния и определению динамических параметров зданий и сооружений

Одним из требований обеспечения безопасности здания или сооружения в процессе эксплуатации, в соответствии со статьей 36 главы 5 Федерального закона РФ от 30 декабря 2009 г. № 384–ФЗ «Технического регламента о безопасности зданий и сооружений», является проведение мероприятий по мониторингу состояния оснований и строительных конструкций зданий и сооружений в процессе эксплуатации.

Система мониторинга технического состояния несущих конструкций регламентирована межгосударственным стандартом ГОСТ 31937–2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния», который включает в себя кроме предварительного (визуального) осмотра конструкций также инструментальное определение динамических параметров.

Динамические параметры зданий (сооружений) включают в себя периоды (или частоты) и логарифмические декременты собственных колебаний основного тона, проявляющиеся при динамических нагрузках.

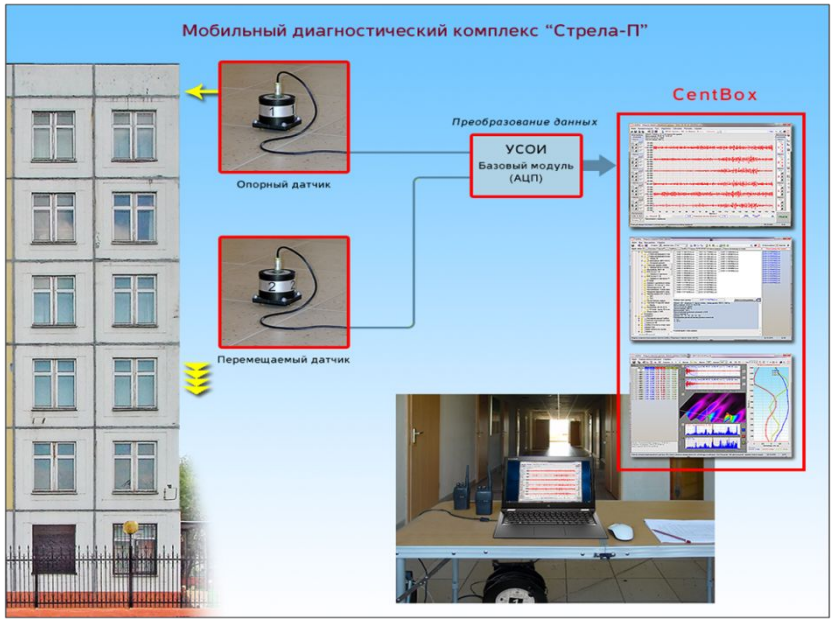
Определение периода собственных колебаний, соответствующих ведущим формам, а так же относительных перемещений рассматриваемых точек с помощью удара по несущим конструкциям пластичным грузом массой 30-50кг, возможно при проведении микродинамических испытаний импульсным методом, регламентированного «Правилами обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений» (СП 13-102-2003, ГОССТРОЙ РОССИИ).

Правила и инструментальный метод определения значений периода и логарифмического декремента основного тона собственных колебаний зданий определен межгосударственным стандартом ГОСТ 34081–2017 «Здания и сооружения. Определение параметров основного тона собственных колебаний».

Методика проведения микродинамических испытаний здания импульсным методом

Методика определения динамических характеристик строительных конструкций по их свободным колебаниям, возбуждаемым воздействием непосредственно на конструкцию внешней импульсной нагрузкой (микродинамические испытания импульсным методом), включает следующие операции:

- подготовку комплекса к использованию и развертывание комплекса на месте проведения динамических испытаний;
- расстановка измерительных датчиков на конструкциях;
- возбуждение и регистрацию колебаний;
- камеральная обработка и анализ данных, полученных по итогам микродинамических испытаний;
- обобщение материалов исследований и составление заключения с выводами по результатам микродинамических испытаний, а именно оценки категории технического состояния, физического износа и остаточного ресурса здания;



Рабочее место оператора АПДМК «Стрела-П». Возбуждение и регистрация колебаний.

Камеральная обработка и анализ данных, полученных по итогам микродинамических испытаний

При обработке сигналов используются современные алгоритмы фильтрации и усреднение во времени откликов затухающих гармонических колебаний.

Осуществляется частотный анализ данных с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) и определяются преобладающие собственные частоты колебаний конструкции.

Примененная методика позволяет экспериментально определять собственные формы колебаний конструкции здания — формы колебаний на одной из собственных частот — путем анализа изменения передаточных функций, которые вычисляются по спектрам частот сигналов, полученных от измерительных модулей, расположенных в здании.

Для определения собственных форм колебаний сравнивались спектры Фурье реакций здания на силовое воздействие пластичным грузом в разных точках измерений с учетом амплитуды и фазы колебаний. Собственные формы колебаний позволяют правильно соотнести частоту колебаний с тем или иным тоном и в ряде случаев указывают на наличие или отсутствие повреждений конструкций здания.

Обобщение материалов исследований и составление заключения с выводами по результатам обследования о техническом состоянии здания

Основными динамическими характеристиками, определяющими ресурс несущей способности здания (для оценки физического износа и остаточного ресурса здания), являются:

- значения частот и периодов собственных колебаний по первой и второй формам в продольном и поперечном направлениях, отличие их от нормативных величин, заложенных в проект здания;
- соотношения между частотами и периодами собственных колебаний здания в продольном и поперечном направлениях, их отличие от нормативных (проектных) значений;
- степень затухания колебаний и возможность разделения низших форм собственных колебаний.

Информативность динамических характеристик заключается в том, что они зависят от конструктивного исполнения, качества монтажа, характеристик материала конструкций, от имеющихся дефектов, то есть при износе, старении или накоплении повреждений в конструкциях здания происходит перераспределение внутренних усилий, в результате чего меняется матрица жесткости основных элементов сооружения, снижаются собственные частоты, увеличиваются амплитуды и период колебаний и возрастает величина декремента собственных колебаний, то есть количество поглощаемой конструкцией энергии (логарифмический декремент собственных колебаний рассматривается как мера диссипации упругой энергии для данного тона колебаний).

Изменения температуры, влажность, осадка грунта, деятельность людей и работа оборудования внутри здания, ползучесть материала и другие факторы приводят к появлению в несущих элементах здания микротрещин и других повреждений.

При наличии повреждений происходит снижение жесткости (физический износ) строительных конструкций, что вызывает уменьшение частот их собственных колебаний по отношению к значениям частот собственных колебаний исправных конструкций.

По измеренным временным зависимостям амплитуд и частотным спектрам колебаний конструкций экспериментально определяются основные динамические характеристики здания: значения частот (периодов) и логарифмических декрементов собственных колебаний здания.

Оценка износа и остаточного ресурса объекта проводится методом сравнения частот собственных колебаний конструкций здания первого тона, полученных при настоящих испытаниях, с частотами, определенными по эмпирическим формулам для исправных зданий.

Отклонение частот собственных колебаний конструкций здания первого тона, полученных при настоящих испытаниях, от частот, определенными по эмпирическим формулам для исправных зданий, указывает на наличие дефектов или на несоблюдение правил эксплуатации.

Сравнение измеренных частот колебаний здания со значениями, полученными эмпирическим путем для исправного здания аналогичной конструкции, позволяют сделать сравнительную оценку технического состояния и остаточный ресурс здания.

Оценка степени повреждения здания проводится по Таблице 7 Методики оценки и сертификации инженерной безопасности зданий и сооружений, (далее по тексту - Методики МЧС) в зависимости от изменения фактического периода собственных колебаний здания по сравнению с нормативным значением.

Степень повреждения	**Увеличение периода собственных колебаний, %**
1 - без повреждения - легкая	0 - 10
2 - умеренная	11 - 30
3 - сильная	31 - 60
4 - тяжелая	61 - 90
5 - катастрофическая	91 - 100

Таблица 7 из Методики МЧС - Степени повреждения зданий

Инженерный риск обрушения здания (сооружения) и первоочередные мероприятия в зависимости от степени повреждения зданий и сооружений определяются по Таблице 8 Методики МЧС

Степень повреждения	**Инженерный риск обрушения здания (сооружения), 1/год**	**Мероприятия**
1	$10^{-6} – 10^{-4}$	Не требуются
2	$10^{-4} – 10^{-3}$	Текущий ремонт
3	$10^{-3} – 10^{-2}$	Усиление и восстановление несущей способности поврежденных конструкций
4	$10^{-2} – 10^{-1}$	Немедленная эвакуация людей. Снос либо капитальные восстановительные работы
5	$10^{-1} – 1$	Снос

Таблица 8 из Методики МЧС - Инженерный риск обрушения здания (сооружения) и первоочередные мероприятия

Оценка физического износа и остаточного ресурса здания

Здание, как упруго–деформируемая система, имеет *n* частот и соответствующих им форм собственных колебаний. Частоты и формы собственных колебаний определяются конструктивными характеристиками — значениями и распределением масс и жесткостей.

Массы конструктивных элементов здания сравнительно постоянны во времени, но их жесткости могут постепенно снижаться. После завершения строительства здания в нем развиваются процессы естественного старения, его конструкции испытывают дополнительные механические напряжения, связанные с воздействиями разного вида.

Изменения температуры, влажность, осадка грунта, деятельность людей и работа оборудования внутри здания, ползучесть материала и другие факторы приводят к появлению в несущих элементах здания микротрещин и других повреждений.

При наличии повреждений происходит снижение жесткости (физический износ) строительных конструкций, что вызывает уменьшение частот их собственных колебаний по отношению к значениям частот собственных колебаний исправных конструкций.

В целях оперативной оценки физического состояния эксплуатируемых объектов возможен подход, основанный на сопоставлении экспериментальных и расчетных (проектных) изгибных жесткостей опасных сечений упругих конструкций по отношению квадратов соответствующих частот собственных колебаний (частота колебаний пропорциональна корню квадратному из жесткости).

В «Энциклопедия безопасности: строительство, промышленность, экология: в 3–х т.» (Т. 1: Аварийный риск. Взрывные и ударные воздействия. — М.: Наука, 2005. — 696 с.) через формулы и перевод угловой частоты к частоте выражаемой в герцах показано, что квадрат отношения значений частоты прямо пропорционален отношению значения изменившейся жесткости к значению исходной жесткости *i*–й формы колебаний, и формула принимает следующий вид:

$$\left(\frac{f_i^{t+\Delta t}}{f_i^t}\right)^2 = \frac{C_i^{t+\Delta t}}{C_i^t}$$

Показатель уменьшения жесткости конструкций (в процентах) по *i*-й форме собственных колебаний можно определить как дефицит жесткости , равный:

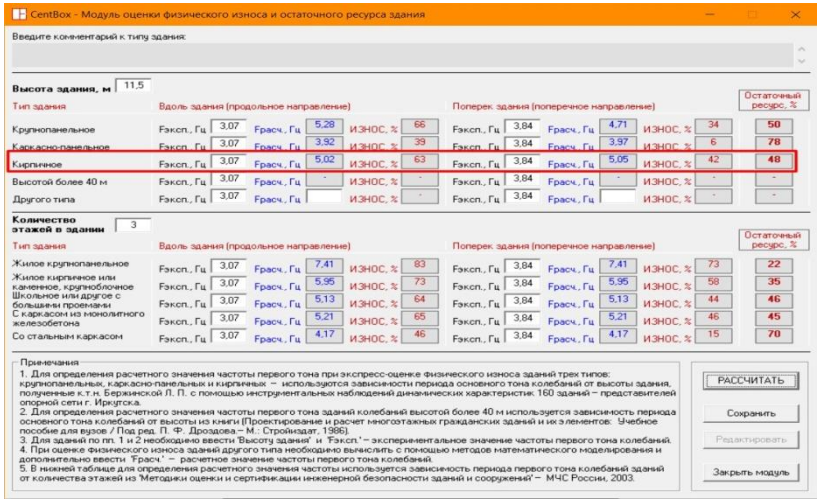
$$dC_i = 100 \cdot \frac{C_i^t - C_i^{t+\Delta t}}{C_i^t} = 100 \cdot \left[1 - \left(\frac{f_i^{t+\Delta t}}{f_i^t}\right)^2\right]$$

При положительном значении величины *dC* строительная конструкция имеет дефицит жесткости (физический износ), а при отрицательном — обладает запасом жесткости.

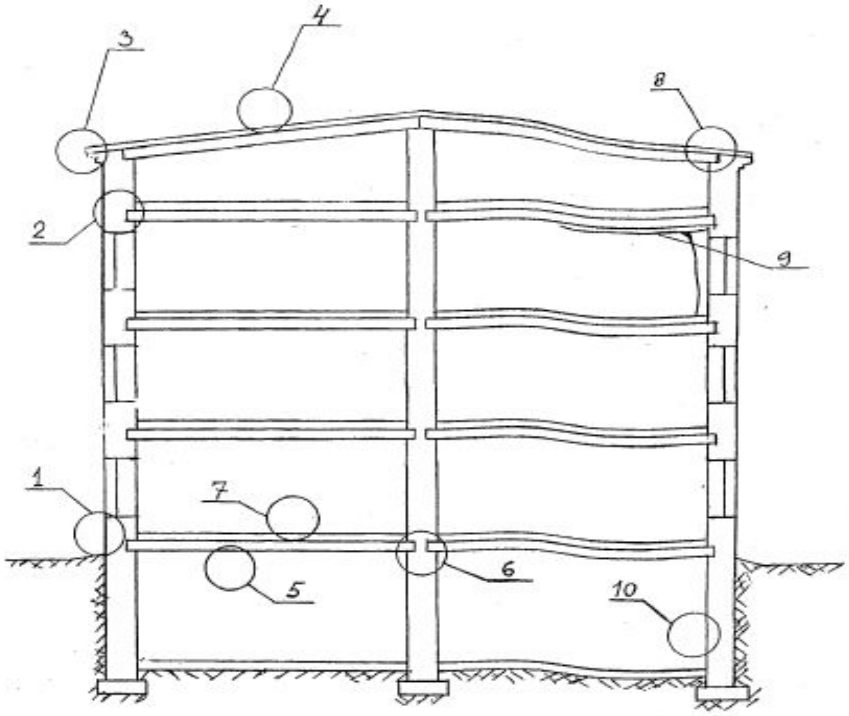
Параметр относительного износа от изменения частоты собственных колебаний здания из [16], в процентах, определяется по формуле:

$$\xi = \left[1 - \left(\frac{f_i^{t+\Delta t}}{f_i^t}\right)^2\right] * 100\%$$

Остаточный ресурс Р объекта из [16] определяется как дополнение до единицы (или в процентах – до 100%) величины износа, по формуле Р =1- ξ .



Уязвимые места и характерные повреждения в конструкциях зданий влияющие на жесткость и устойчивость



Характерные повреждения конструкций жилых и общественных зданий

1 - расслоение кладки цоколя; 2 - повреждение опор деревянных балок; 3 - расслоение кладки карниза; 4 - протечки и разрушение кровли; 5 - коррозия или образование трещин в железобетонных балках перекрытия; 6 - трещины в кладке в месте опор ригелей; 7 - коррозия и трещины в железобетонных плитах перекрытий; 8 - гниль маурлата и стропил; 9 - трещины в перегородках и поперечных стенах; 10 - трещины и протечки в стене подвала

Оценка сейсмостойкости здания

На объектах находящихся в сейсмическом районе, дополнительно возможно провести оценку сейсмостойкости объекта.

При землетрясениях здания и сооружения (объекты) испытывают значительное кинематическое возбуждение, вызванное колебаниями грунта. Повреждения или разрушения конструкций происходят при этом из-за чрезмерной деформации.

Предельно допустимые прогибы и перемещения конструкций регламентированы правилами СП 20.13330.2016 («Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*»). В п. 15.2 данных правил указывается, что предельные прогибы элементов конструкций покрытий и перекрытий следует отсчитывать от изогнутой оси, соответствующей состоянию элемента в момент приложения нагрузки, от которой вычисляется прогиб. «Для элементов конструкций зданий и сооружений, предельные прогибы и перемещения которых не оговорены настоящим и другими нормативными документами, вертикальные и горизонтальные прогибы и перемещения от постоянных, длительных и кратковременных нагрузок не должны превышать 1/150 пролета или 1/75 вылета консоли».

В соответствии с изменениями №1 к СП 14.13330.2014 (далее по тексту – изменения к СП) по объекту, расположенному в сейсмическом районе, определяется расчетная сейсмичность площадки при фоновой сейсмичности района по степени сейсмической опасности А,В или С (в баллах).

Для оценки сейсмостойкости объектов применяется динамический метод анализа, т.е метод расчета на воздействие в виде акселерограммы колебаний грунта в основании здания путем численного интегрирования уравнений движения (согласно изменений к СП 14.13330.2014).

В окне модуля сбора и обработки данных в режиме оценки реальной сейсмостойкости сооружения имеется таблица с перечнем оцифрованных акселерограмм реальных землетрясений. Акселерограмма землетрясения - это запись однокомпонентного процесса изменения значения ускорения грунта, сделанная во время землетрясения, для фиксированного направления: север-юг (N-S), запад-восток (W-E). Всего в таблице - 28 акселерограмм 14 землетрясений.

Модуль сбора и обработки данных в режиме оценки реальной сейсмостойкости объекта синтезирует акселерограмму на основе выбранной оператором акселерограммы реального землетрясения путем ее масштабирования под максимальное расчетное ускорение грунта, соответствующее выбранной интенсивности землетрясения.

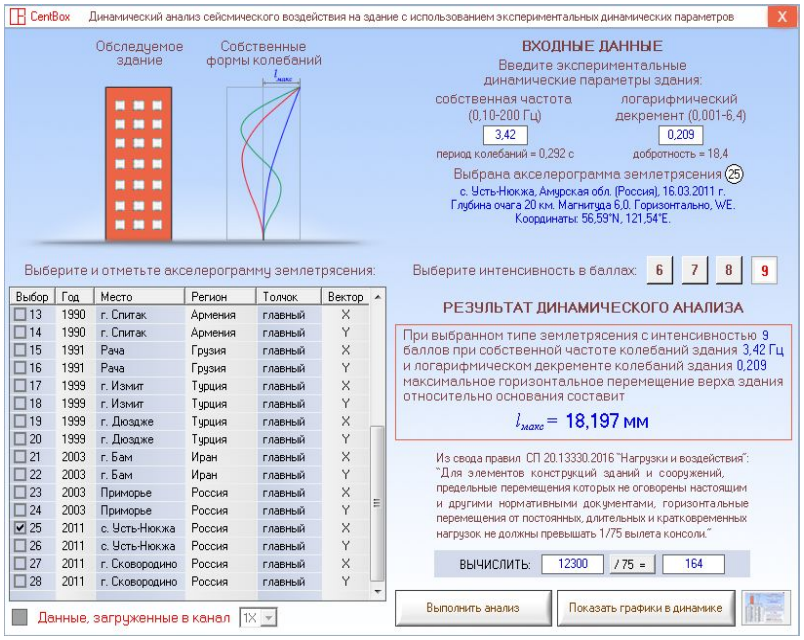
Для синтезирования акселерограммы под требуемую интенсивность землетрясения для определенного испытания загружается файл данных, содержащий оцифрованную акселерограмму, наиболее подходящую для местных сейсмологических условий, для землетрясения интенсивностью N баллов.

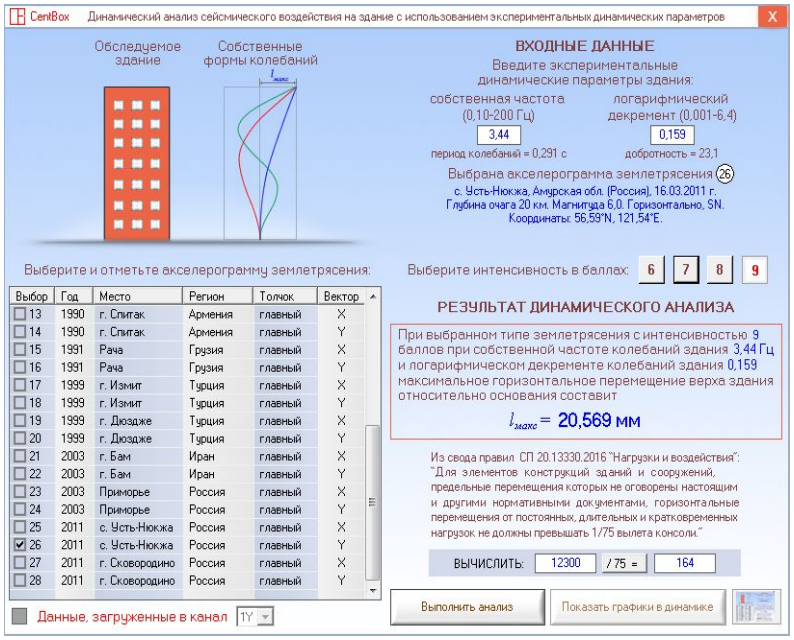
Программный пакет CentBox выполняет математическое моделирование колебаний здания как линейной колебательной системы с одной степенью свободы с сосредоточенной массой, имеющей реальные динамические параметры (частоту собственных колебаний и логарифмический декремент колебаний), полученные экспериментально для данного здания.

В результате динамического анализа вычисляется максимальная амплитуда перемещений верха объекта относительно основания, и строится график перемещения верха объекта относительно основания.

Пример оценки максимально возможных амплитуд перемещений верха здания относительно основания при землетрясении интенсивностью 9 баллов показан на следующем слайде.

Как следует из рисунков, можно ожидать, что максимальная амплитуда перемещений верха здания казармы инв.№123 относительно основания при землетрясении интенсивностью 9 баллов не превысит – по оси X - 18,197 мм (1,8 см.), по оси Y - 20,569 мм (2,05 см).





Эти значения в 8 раз меньше предельно допустимых прогибов и перемещений здания, которые регламентированы правилами СП 20.13330.2016 .

Согласно правилам СП 20.13330.2016 , вертикальные и горизонтальные прогибы и перемещения от постоянных, длительных и кратковременных нагрузок не должны превышать 1/75 вылета консоли. Для данного здания предельно допустимая амплитуда перемещений его верха, составляющая 1/75 от его высоты (12300 мм), равна 164 мм.

Таким образом, оценка сейсмостойкости здания показала, что данное здание выдержит землетрясение интенсивностью 9 баллов типа землетрясения, которое может случиться в данном регионе, при условии соблюдения при строительстве требований проекта и норм проектирования по строительству в сейсмических районах на 1955 год.

Определение характеристик состояния фундамента при анализе форм колебаний

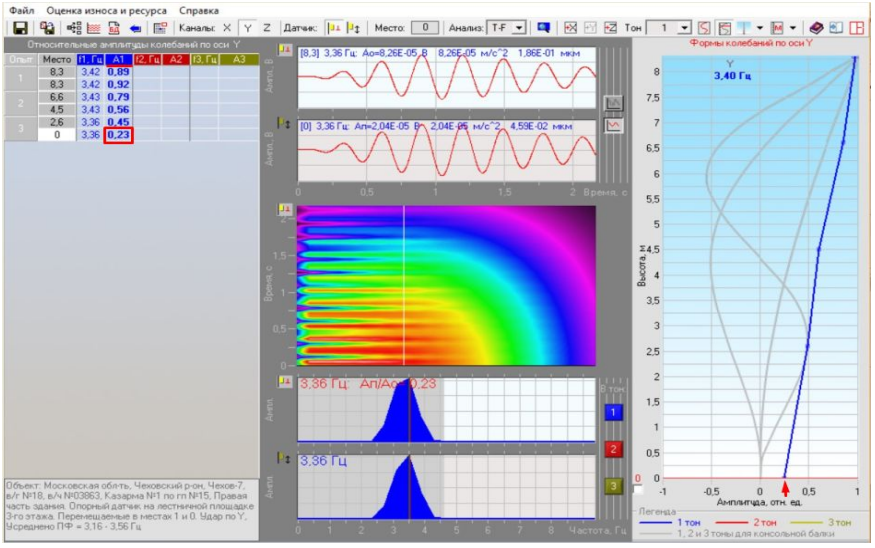
Из научной статьи Савина С.Н., д.т.н, профессора и др. «Анализ конечно-элементной модели зданий, поврежденных в результате чрезвычайных ситуаций» опубликованной в «Вестнике гражданских инженеров,2019,№2(73)», известно следующее: «Определяющее влияние на значение собственной частоты колебаний по первому тону оказывает степень податливости грунтов основания. На основании большого количества исследований нами была принята предельная величина относительной податливости в уровне фундамента, равная 10%. Есть предположение, что до этого уровня податливости нет смысла учитывать её влияние на значение собственной частоты колебаний по первому тону…».

То есть, если относительные перемещения фундамента при колебаниях составляют более 10 %, то фундамент защемлен не достаточно жестко.

Относительное перемещение фундамента определяют по значению собственной формы колебаний первого тона на отметке, соответствующей верхнему уровню фундамента .

Ниже приведен пример, по результатам микродинамических испытаний здания казармы, расположенной в Московской области. В окне подмодуля анализа данных модуля анализа базы данных видно что значение относительной амплитуды перемещений на уровне фундамента равно 0,23. Это означает, что амплитуда перемещений фундамента составляет 23 % относительно максимальной амплитуды перемещений здания на других высотных уровнях.

В связи с наличием относительных перемещений фундамента при колебаниях (более 10%) рекомендуется на таких объектах провести комплекс мероприятий по обследованию грунтов основания и фундамента здания, в соответствии с СНиП, СП и другими нормативными документами, в составе капитального ремонта.

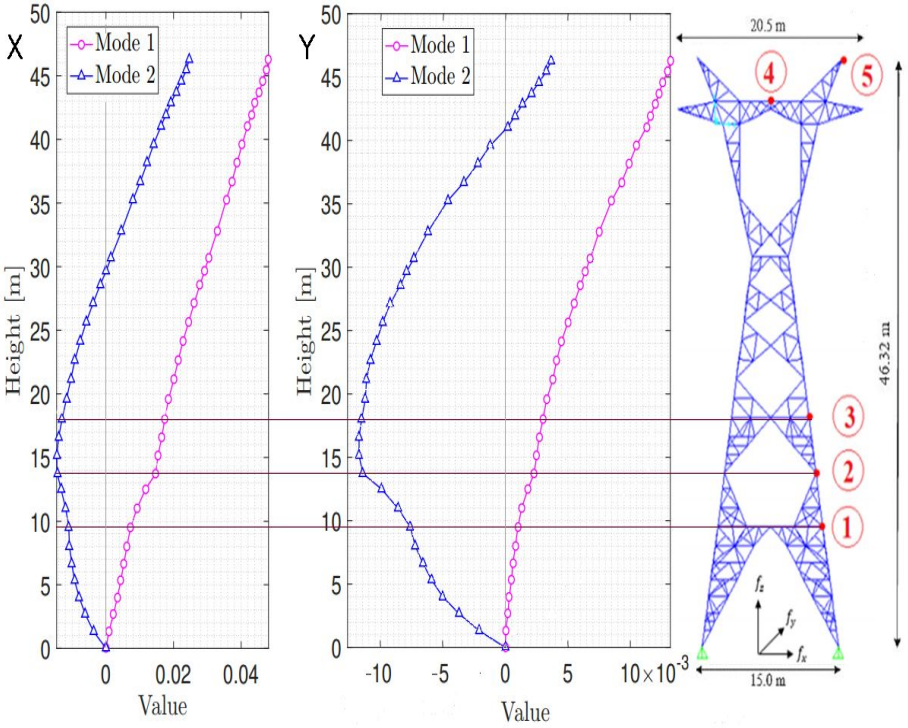


Примеры определения динамических параметров объектов и микродинамических испытаний АПМДК «Стрела-П»

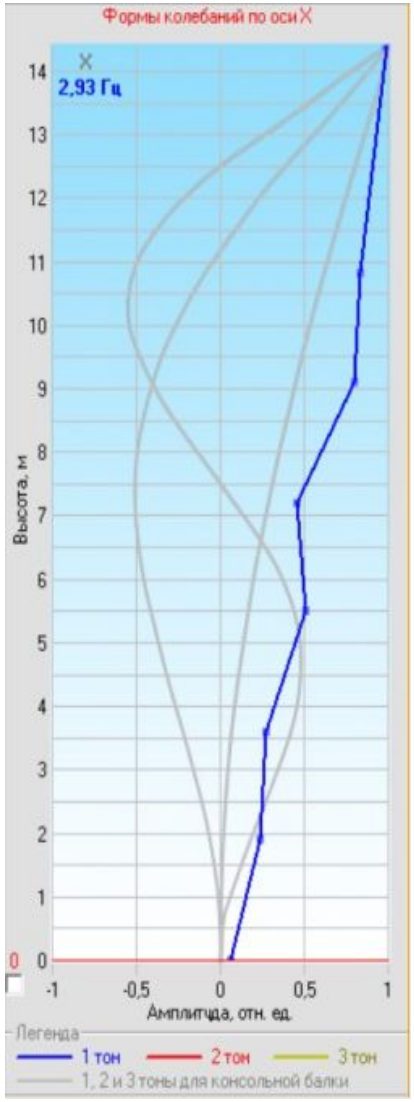
Микродинамические испытания зарубежом

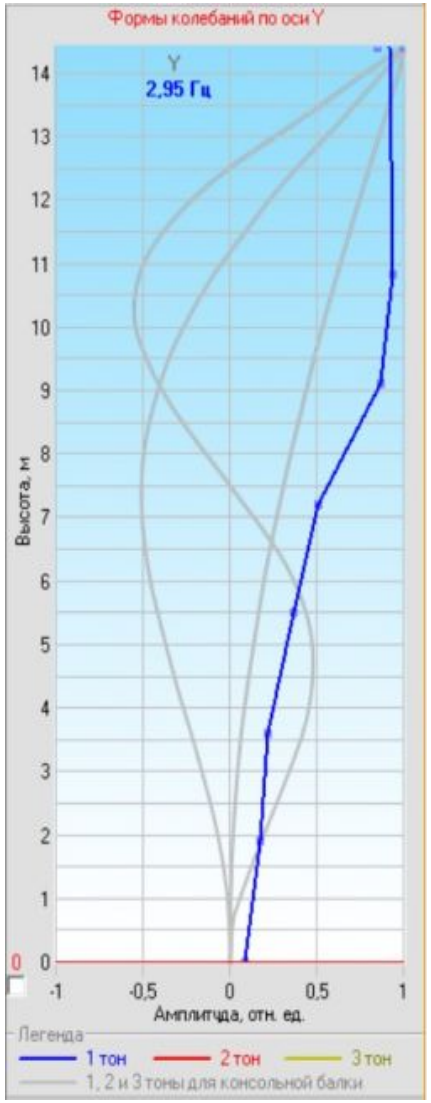
Определение динамических параметров объектов методом свободных колебаний используется зарубежом.

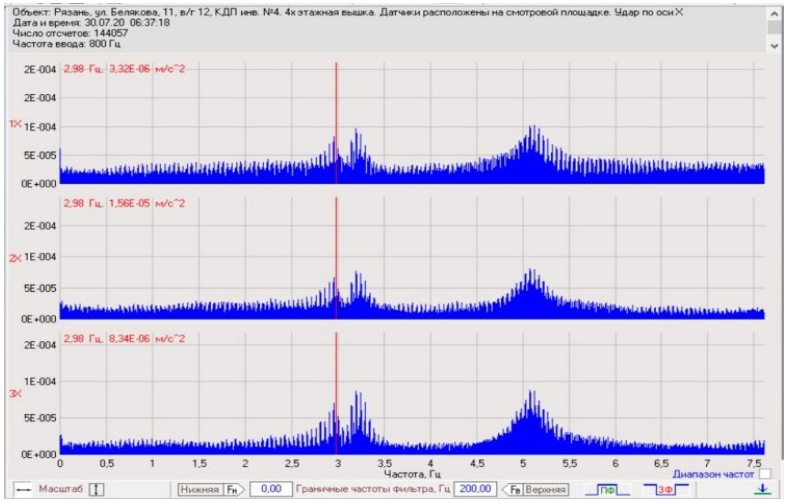
Из статьи R. Karami-Mohammadi, M. Mirtaheri, M. Salkhordeh and M. A. Hariri-Ardebili «Vibration Anatomy and Damage Detection in Power Transmission Towers with Limited Sensors», 2020г.

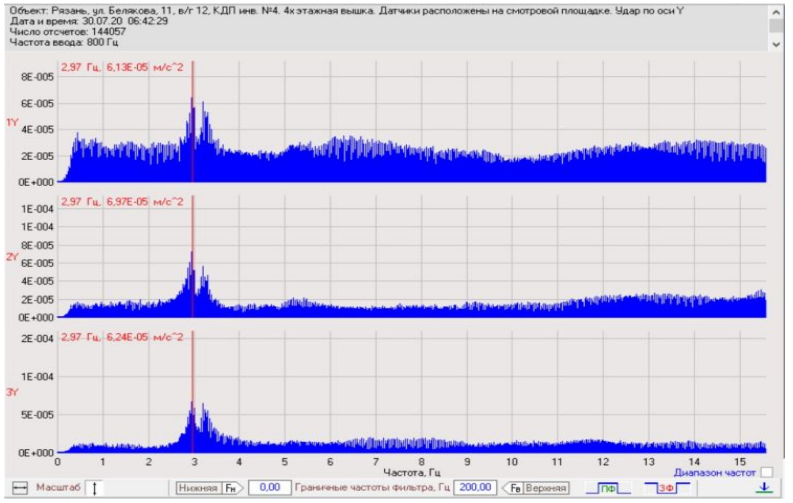


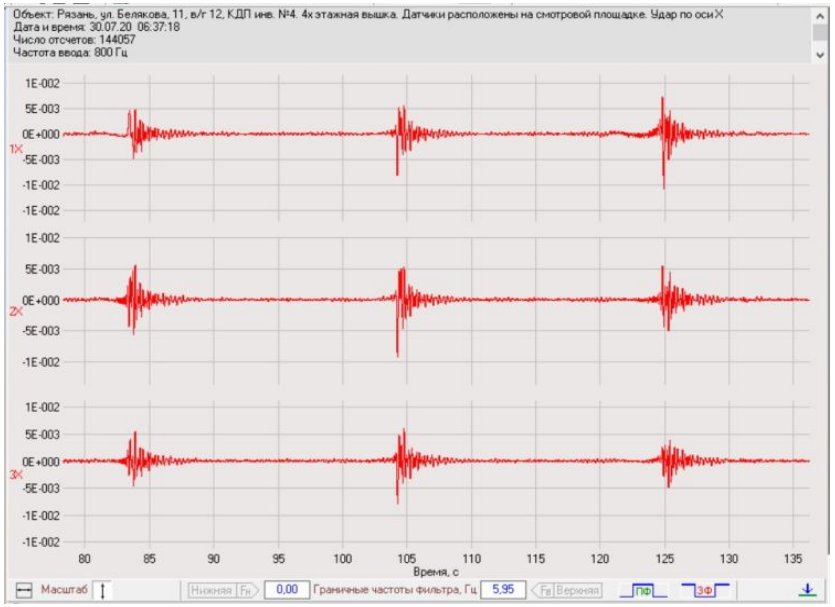
Результаты микродинамических испытаний здания КДП инв.№4 (5 эт.), 1969 г.п. г.Рязань

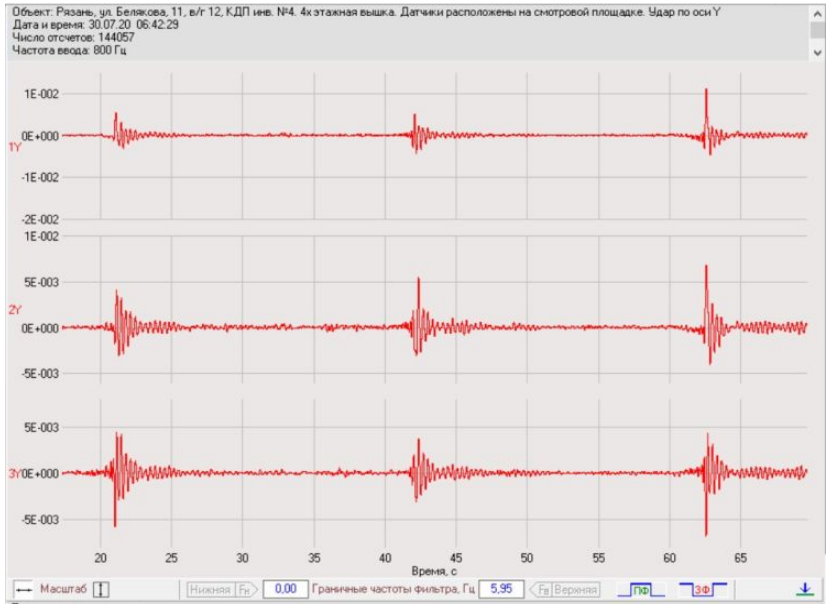












Краткое описание результатов микродинамических испытаний

У здания КДП инв.№4 отклики и спектры сигналов имеют следующие признаки:

- сигналы датчиков, которые находятся рядом в одной точке измерений и имеют одинаковое направление, схожи между собой и имеют схожую полярность

- последовательные отклики похожи друг на друга

- присутствует колебательный характер у большинства откликов

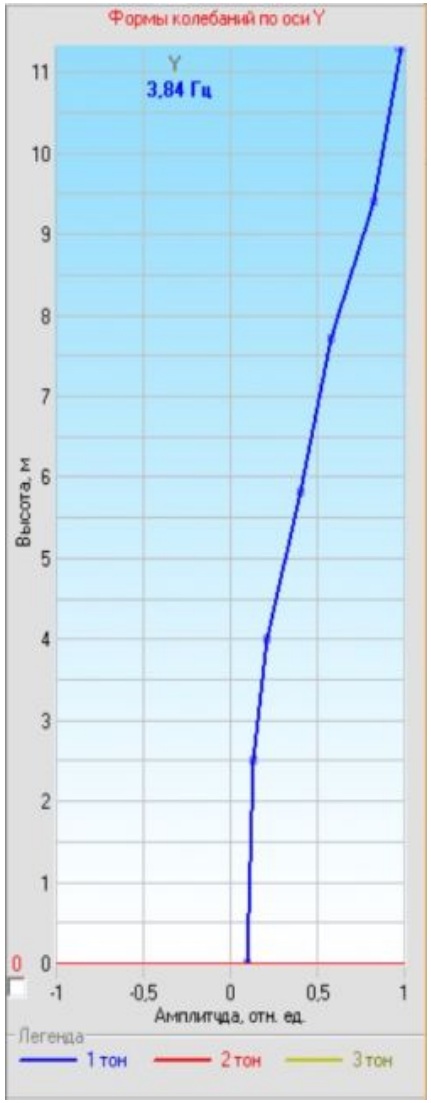
- как следует из графиков спектров у обследуемого здания на ожидаемой собственной частоте первой формы колебаний здания ($\leq$ 5,95 Гц), для направления колебаний вдоль оси X и вдоль оси Y, в полосе частот, содержащую локальный максимум спектра сигнала, ясно выражены спектральные пики.

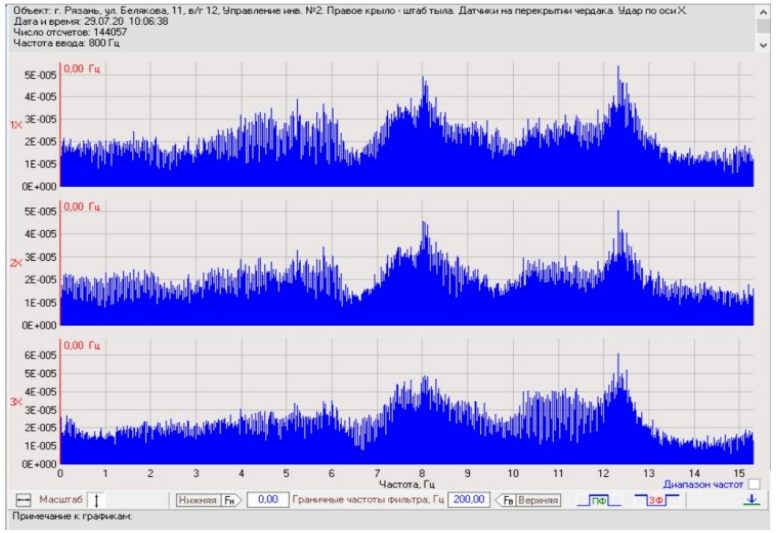
Такой вид сигналов и спектров сигналов свидетельствует о том, что при ударных воздействиях в здании возбуждаются преимущественно свободные колебания, что присуще зданиям с умеренным физическим износом.

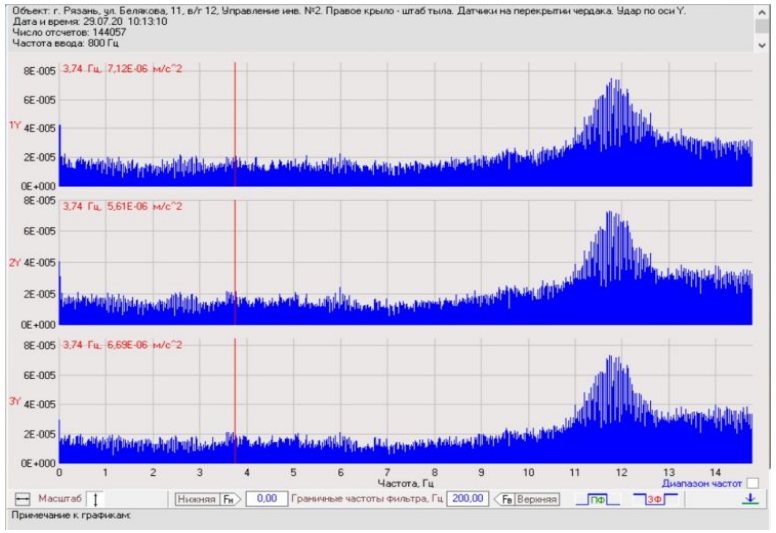
Увеличение периода собственных колебаний исправных зданий составило 43,03%, сильная степень повреждения. Установленная категория технического состояния здания, по результатам микродинамических испытаний – ограниченно-работоспособное.

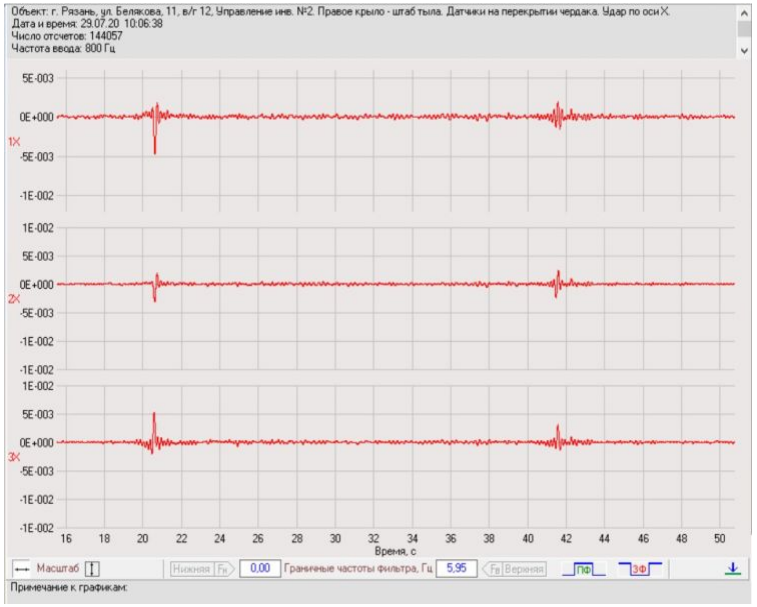
Фото дефектов несущих конструкций здания КДП инв.№4, 5 эт., 1969 г.п., г.Рязань

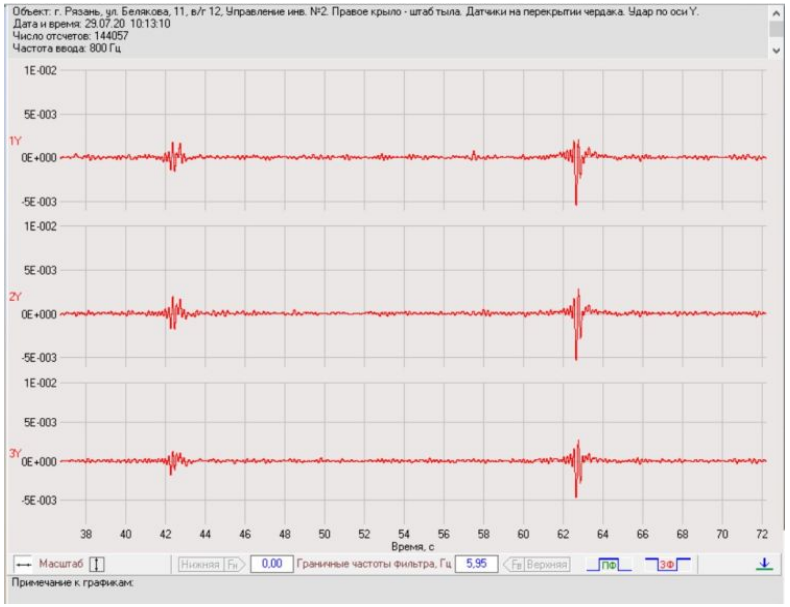
Результаты микродинамических испытаний здания управления инв.№2 (3 эт.), 1939 г.п., г.Рязань











Краткое описание результатов микродинамических испытаний

У здания управления инв.№2 отклики и спектры сигналов имеют следующие признаки:

- различаются сигналы датчиков, которые находятся рядом в одной точке измерений и имеют одинаковое направление (некоторые сигналы имеют разную полярность);

- последовательные отклики отличаются друг от друга (в том числе полярностью)

-отсутствует колебательный характер у большинства откликов

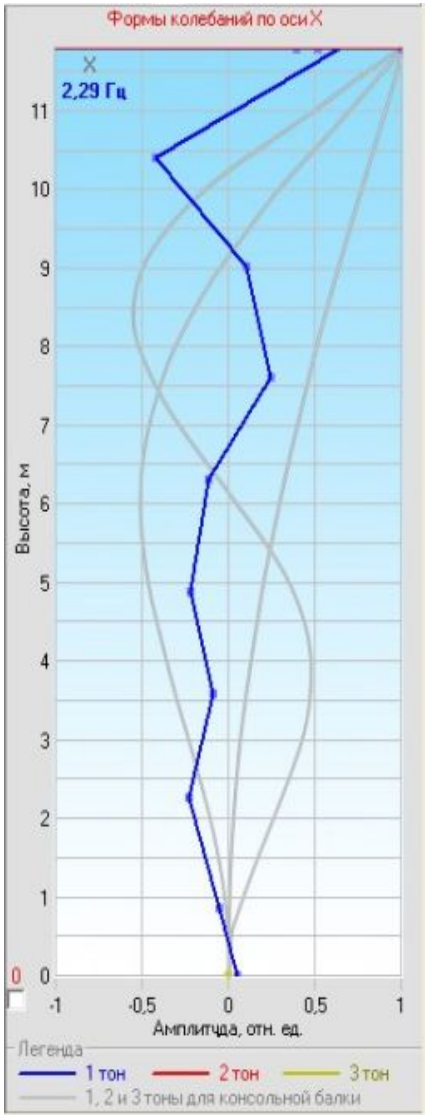
- как следует из графиков спектров у обследуемого здания на ожидаемой собственной частоте первой формы колебаний здания ($\leq$ 5,95 Гц), для направления колебаний вдоль оси X, в полосе частот, содержащую локальный максимум спектра сигнала, не совсем ясно выражены спектральные пики.

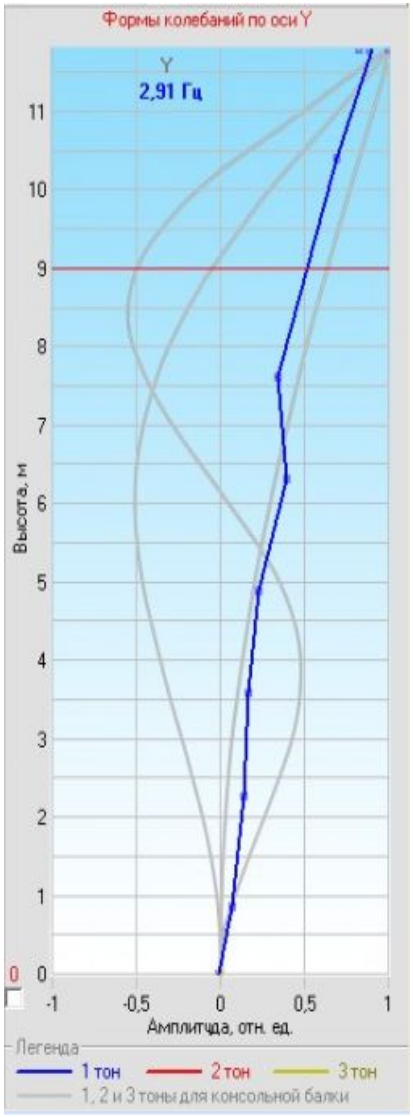
Такой вид сигналов и спектров сигналов свидетельствует о том, что при ударных воздействиях в здании возбуждаются преимущественно случайные вынужденные колебания, а не свободные колебания, и свободные колебания в полосе ожидаемой частоты собственных колебаний малы, что присуще зданиям с большим физическим износом.

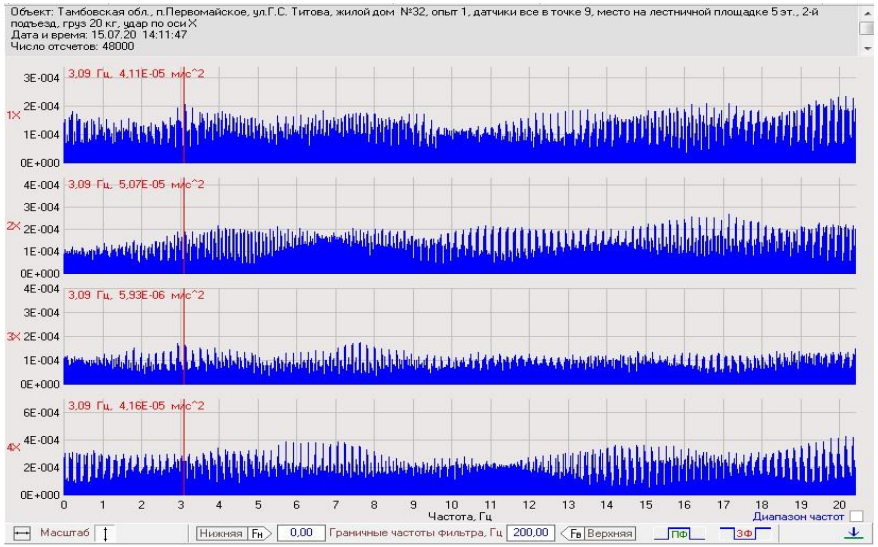
Увеличение периода собственных колебаний исправных зданий составило 63,81%, тяжелая степень повреждения. Установленная категория технического состояния здания, по результатам микродинамических испытаний – аварийное.

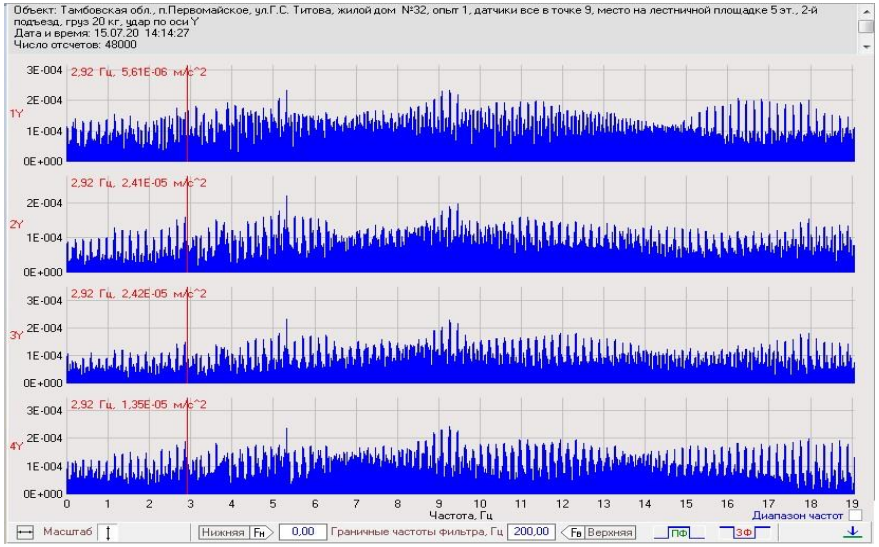
Фото дефектов несущих конструкций здания управления инв.№2, 3 эт., 1939 г.п., г.Рязань

Результаты микродинамических испытаний жилого дома инв.№308 (5 эт.), 1970 г.п., Первомайское, Тамбовская область









Краткое описание результатов микродинамических испытаний

У здания жилого дома отклики и спектры сигналов имеют следующие признаки:

- различаются сигналы датчиков, которые находятся рядом в одной точке измерений и имеют одинаковое направление (некоторые сигналы имеют разную полярность);

- последовательные отклики отличаются друг от друга (в том числе полярностью)

-отсутствует колебательный характер у большинства откликов

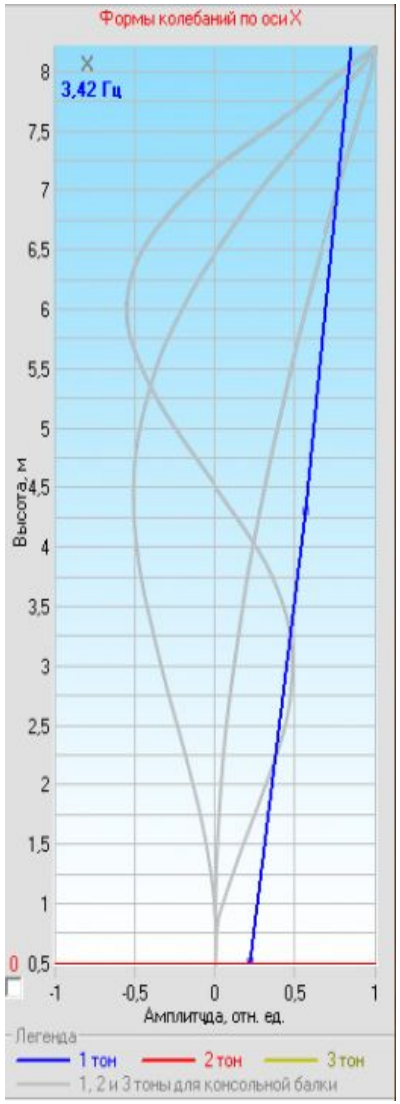
- как следует из графиков спектров у обследуемого здания на ожидаемой собственной частоте первой формы колебаний здания ($\leq$ 4,35 Гц), для направления колебаний вдоль оси X и вдоль оси Y, в полосе частот, содержащую локальный максимум спектра сигнала, не совсем ясно выражены спектральные пики.

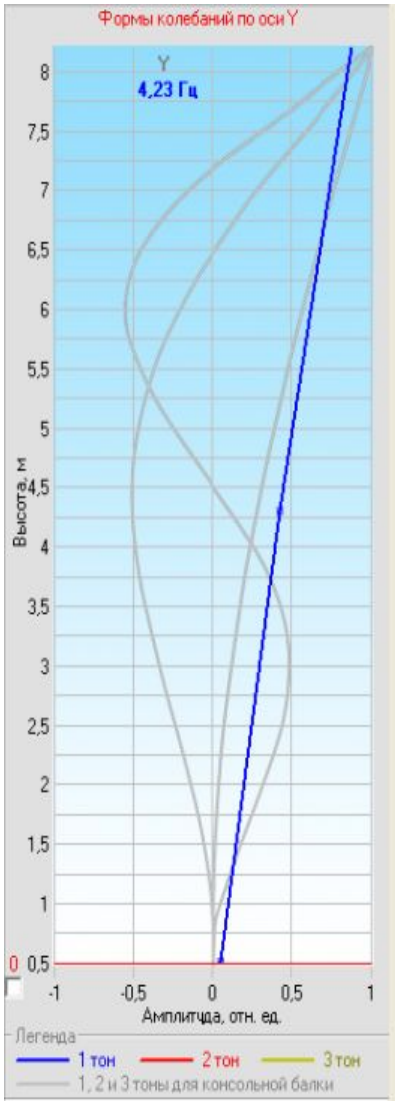
Такой вид сигналов и спектров сигналов свидетельствует о том, что при ударных воздействиях в здании возбуждаются преимущественно случайные вынужденные колебания, а не свободные колебания, и свободные колебания в полосе ожидаемой частоты собственных колебаний малы, что присуще зданиям с большим физическим износом.

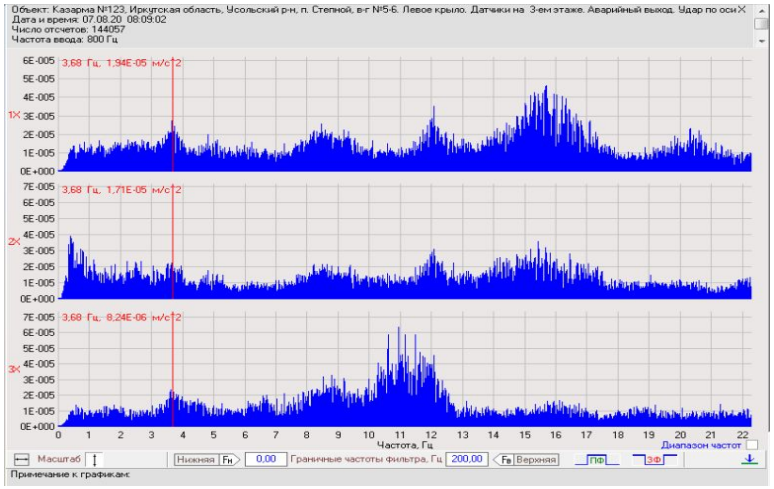
Увеличение периода собственных колебаний исправных зданий составило 68,5%, тяжелая степень повреждения. Установленная категория технического состояния здания, по результатам микродинамических испытаний – аварийное.

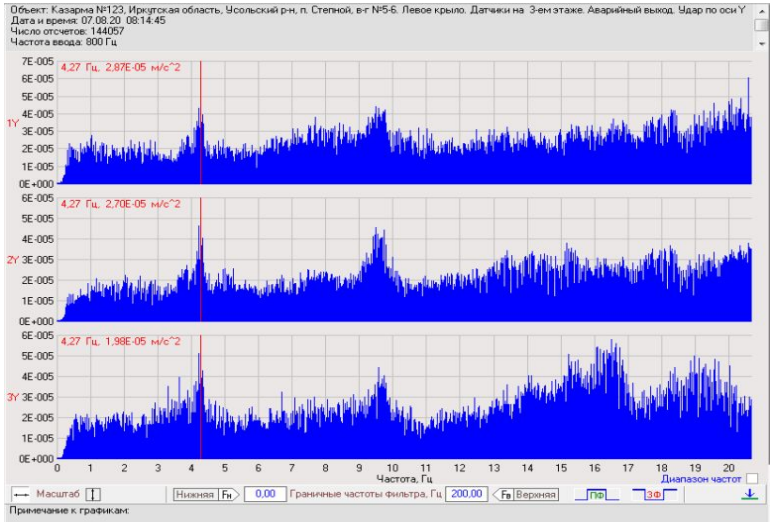
Фото дефектов несущих конструкций жилого дома, 5 эт., п.Первомайское, Тамбовская область

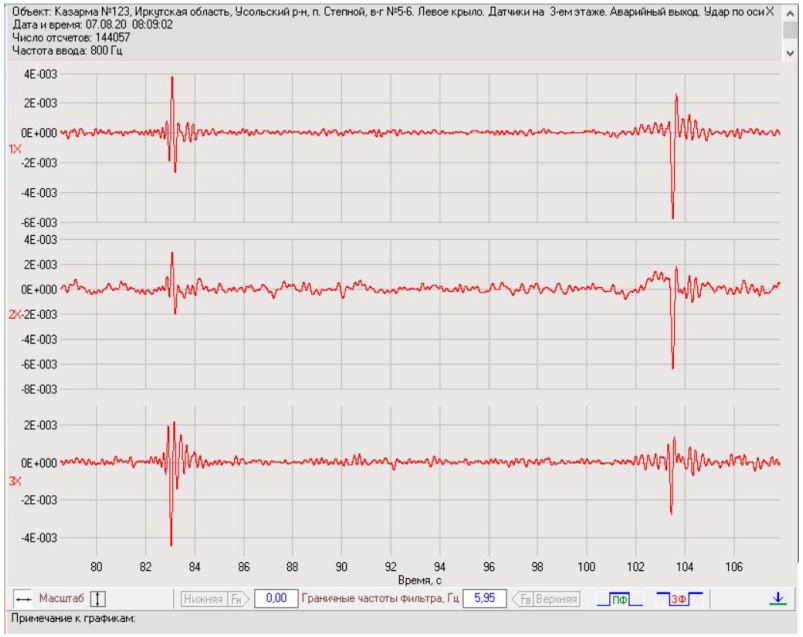
Результаты микродинамических испытаний здания казармы инв.№123 (3 эт.), 1955 г.п., п.Степной, Иркутская обл.

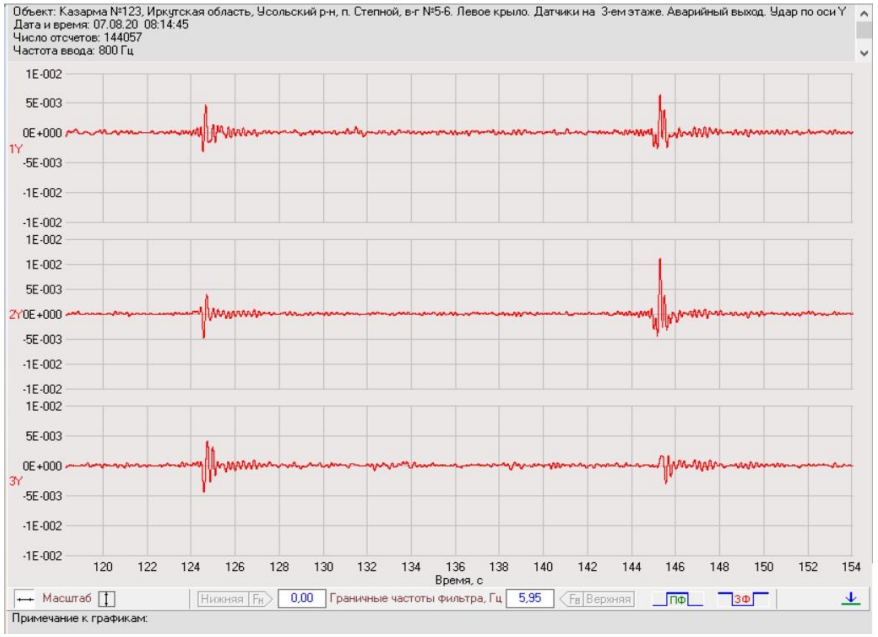












Краткое описание результатов микродинамических испытаний

У здания казармы инв.№123 отклики и спектры сигналов имеют следующие признаки:

- сигналы датчиков, которые находятся рядом в одной точке измерений и имеют одинаковое направление, различаются между собой и имеют схожую полярность

- последовательные отклики отличаются друг от друга

- колебательный характер присутствует не у всех откликов

- как следует из графиков спектров у обследуемого здания на ожидаемой собственной частоте первой формы колебаний здания ($\leq$ 5,95 Гц), для направления колебаний вдоль оси X и вдоль оси Y, в полосе частот, содержащую локальный максимум спектра сигнала, ясно выражены спектральные пики.

Такой вид сигналов и спектров сигналов свидетельствует о том, что при ударных воздействиях в здании возбуждаются преимущественно свободные колебания, что присуще зданиям с умеренным физическим износом.

Увеличение периода собственных колебаний исправных зданий составило 42,66%, сильная степень повреждения. Установленная категория технического состояния здания, по результатам микродинамических испытаний – ограниченно-работоспособное.

Фото дефектов несущих конструкций здания казармы инв.№123, 3 эт., 1955 г.п., п.Степной, Иркутская обл.

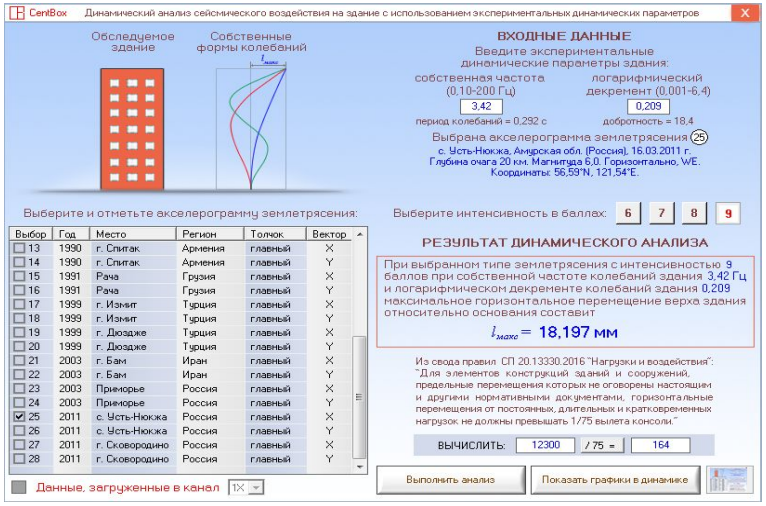
Оценка сейсмостойкости здания казармы инв.№123 (3 эт.), 1955 г.п., п.Степной, Иркутская обл.

В связи с тем, что объект находится в сейсмическом районе, дополнительно проведена оценка сейсмостойкости здания казармы инв.№123.

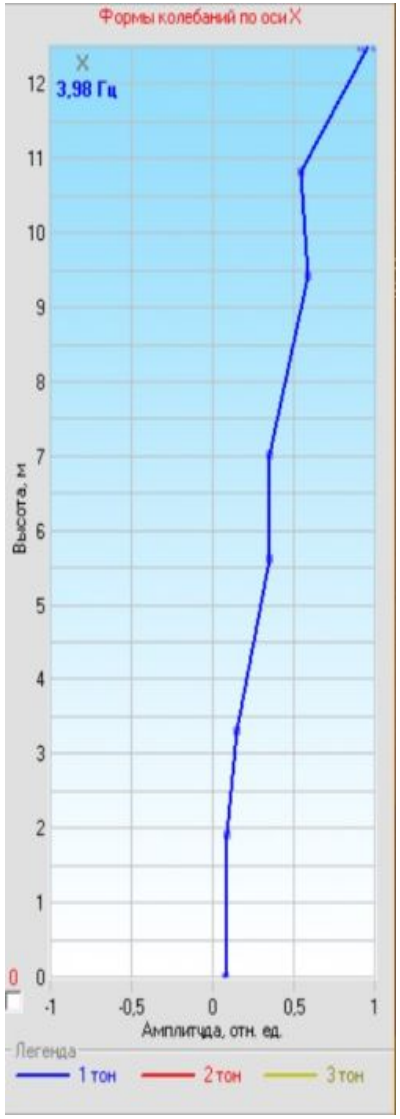
Для примера по моделированию колебаний здания взята минимально полученная собственная частота по оси X – 3,42 Гц (по) и полученное значение логарифмического декремента колебаний к данной собственной частоте – 0,209 (по оси X) .

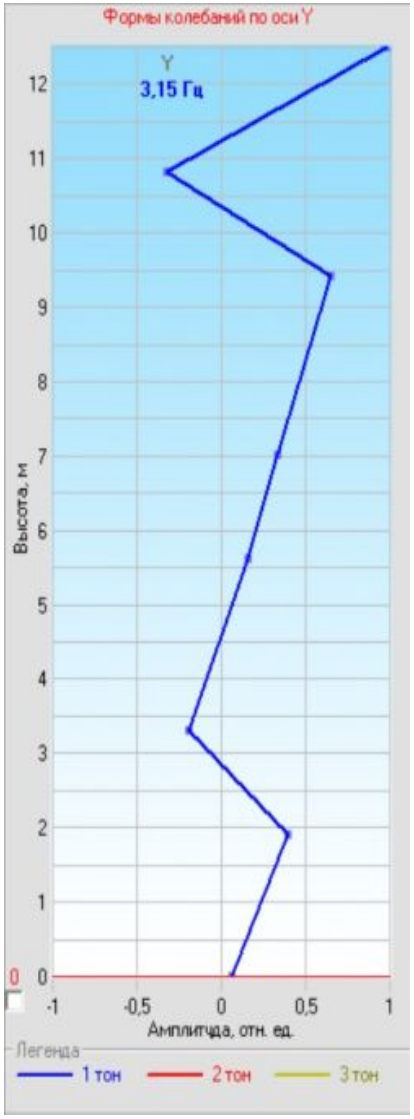
Как следует из рисунка на этом слайде, можно ожидать, что максимальная амплитуда перемещений верха здания относительно основания при землетрясении интенсивностью 9 баллов не превысит по оси X - 18,197 мм (1,8 см.). Это значение в 9 раз меньше предельно допустимой амплитуды перемещений его верха, составляющей 1/75 от его высоты (12300 мм), равной 164 мм.

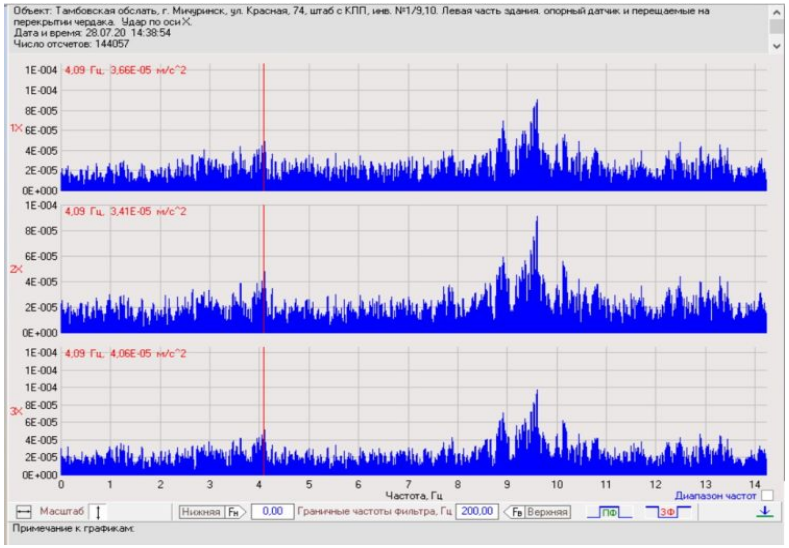
Оценка сейсмостойкости здания показала, что данное здание выдержит землетрясение интенсивностью 9 баллов типа землетрясения, которое может случиться в данном регионе, при условии соблюдения при строительстве казармы инв.№123 требований проекта и норм проектирования по строительству в сейсмических районах на 1955 год.

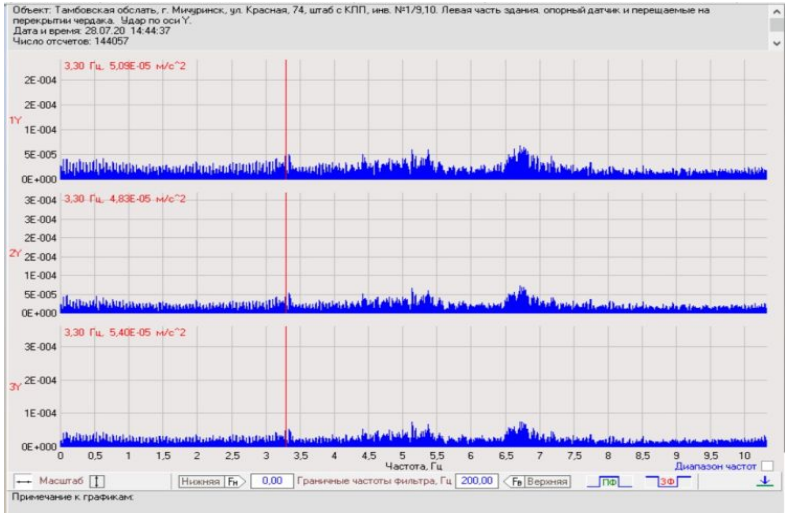


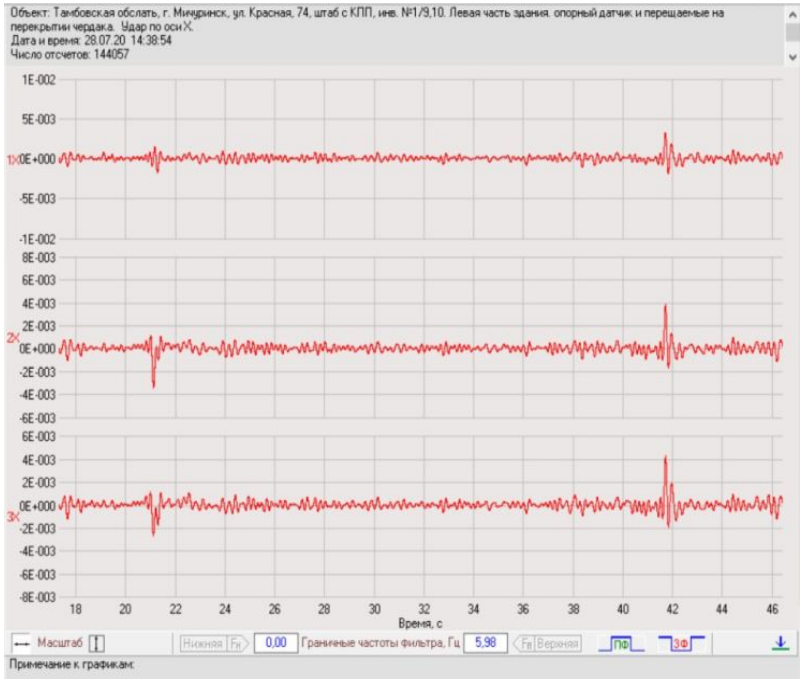
Результаты микродинамических испытаний здания штаба с КПП (инв.№9,10), 3 эт., 1954 г.п., г. Мичуринск, Тамбовская обл.

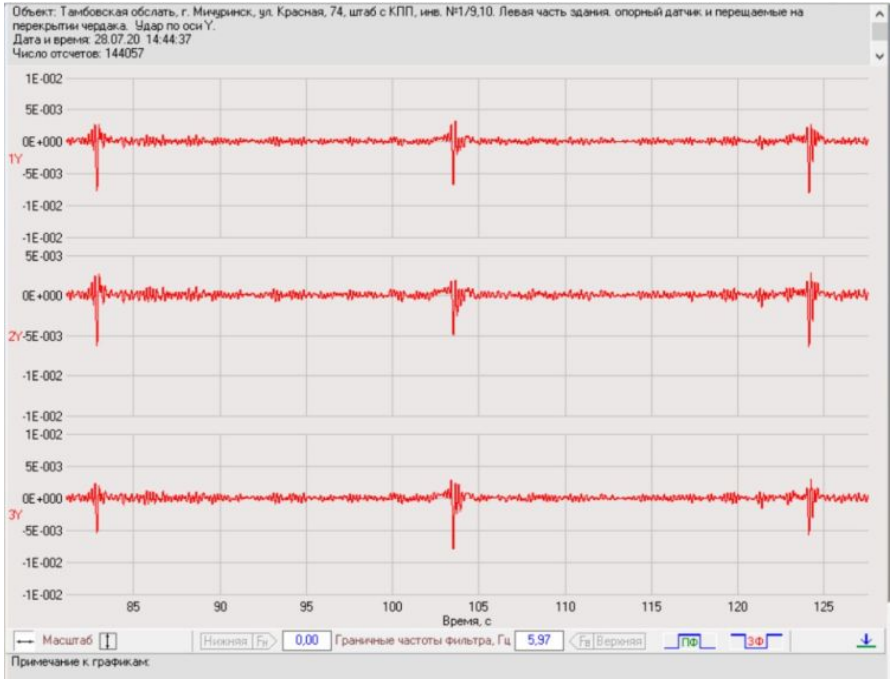












Краткое описание результатов микродинамических испытаний

У здания штаба с КПП (инв.№9,10) отклики и спектры сигналов имеют следующие признаки:

- сигналы датчиков, которые находятся рядом в одной точке измерений и имеют одинаковое направление, различаются между собой и имеют схожую полярность

- последовательные отклики отличаются друг от друга

- колебательный характер присутствует не у всех откликов

- как следует из графиков спектров у обследуемого здания на ожидаемой собственной частоте первой формы колебаний здания ($\leq$ 5,95 Гц), для направления колебаний вдоль оси X и вдоль оси Y, в полосе частот, содержащую локальный максимум спектра сигнала, ясно выражены спектральные пики.

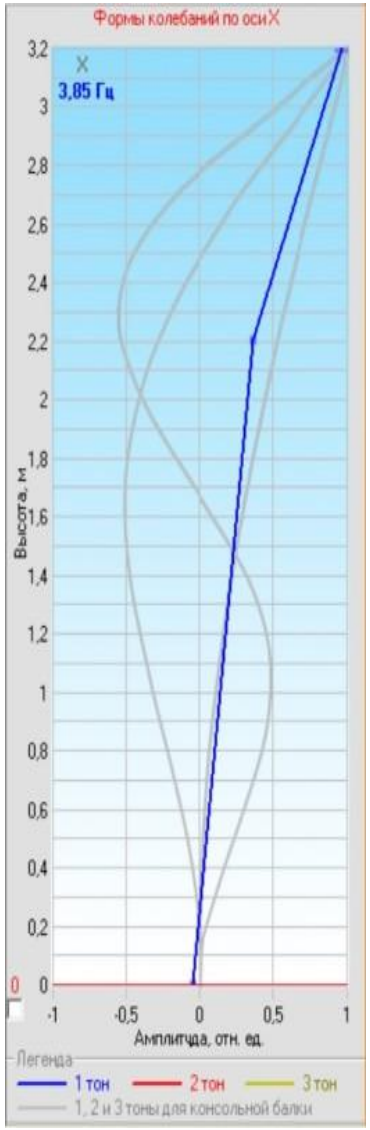
Такой вид сигналов и спектров сигналов свидетельствует о том, что при ударных воздействиях в здании возбуждаются преимущественно свободные колебания, что присуще зданиям с умеренным физическим износом.

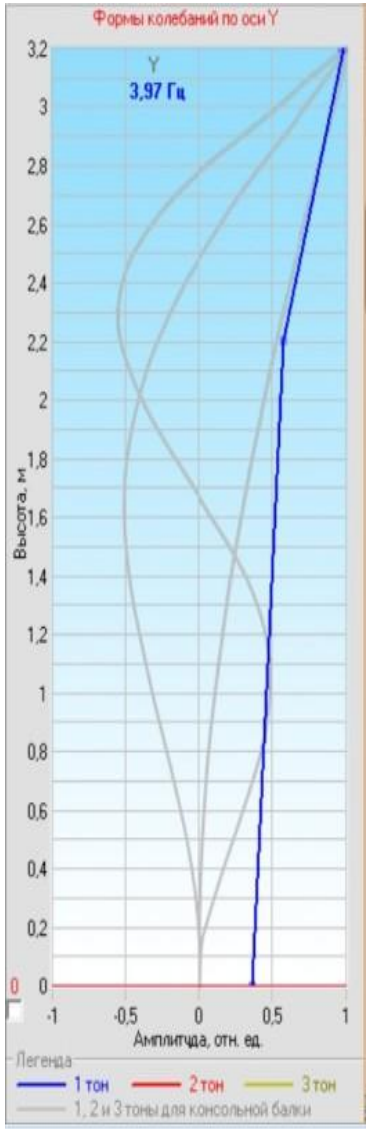
Максимальное увеличение периода собственных колебаний исправных зданий составило 46,0%, сильная степень повреждения.

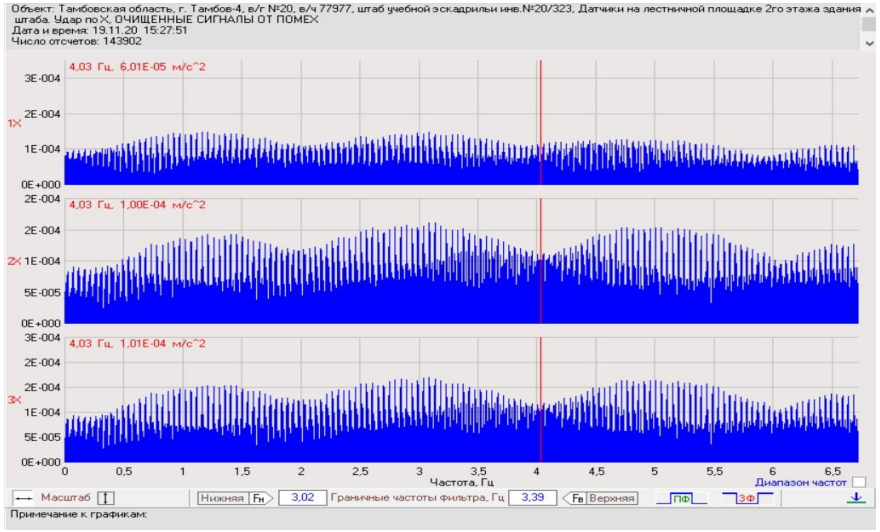
Установленная категория технического состояния здания, по результатам микродинамических испытаний – ограниченно-работоспособное.

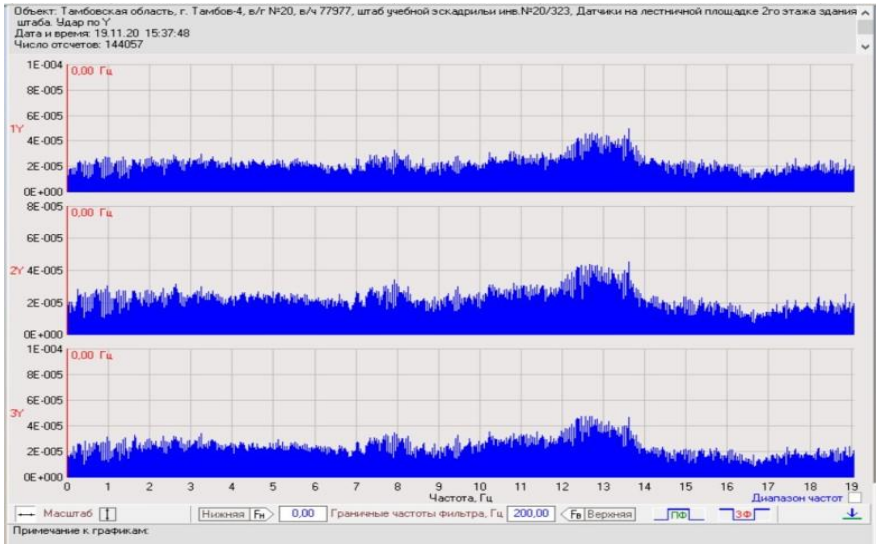
Фото дефектов несущих конструкций здания штаба с КПП (инв.№9,10), 3 эт., 1954 г.п., г. Мичуринск, Тамбовская обл.

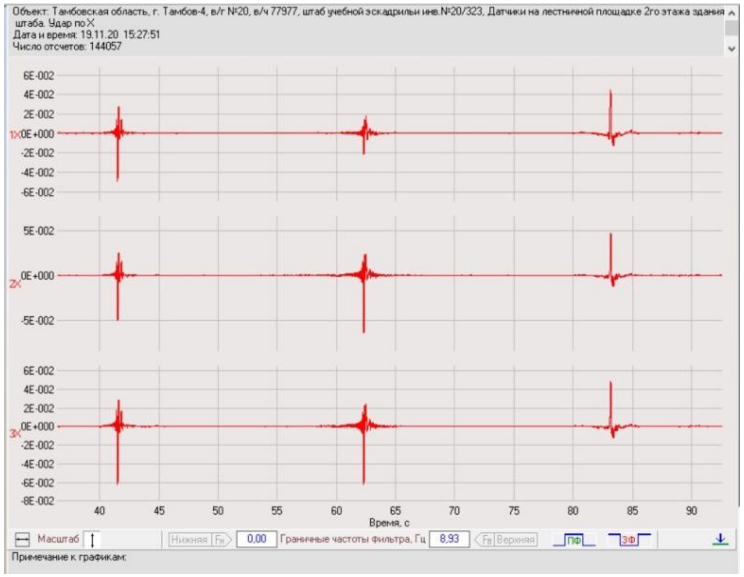
Результаты микродинамических испытаний здания штаба УАЭ инв.№323 (2 эт.), 1931 г.п., Тамбовская обл., г. Тамбов

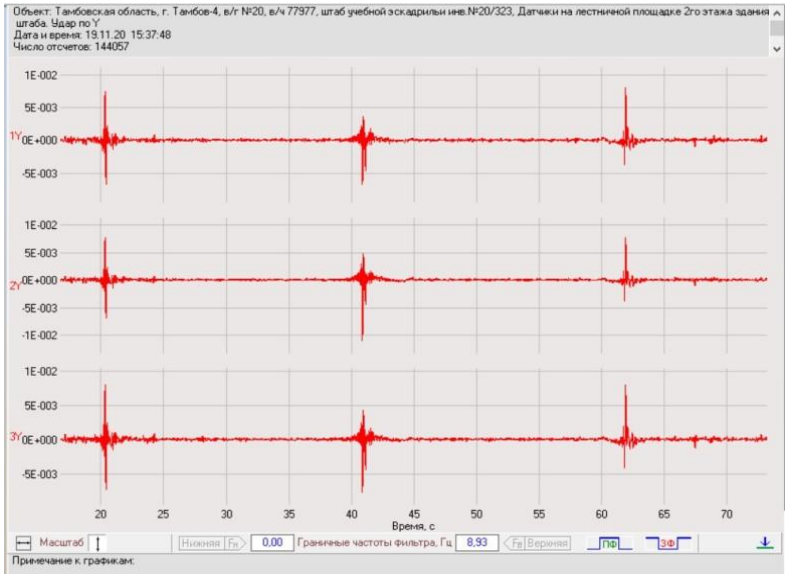












Краткое описание результатов микродинамических испытаний

У здания штаба УАЭ инв.№323 отклики и спектры сигналов имеют следующие признаки:

- сигналы датчиков, которые находятся рядом в одной точке измерений и имеют одинаковое направление, схожи между собой и имеют одинаковую полярность

- последовательные отклики отличаются друг от друга

- колебательный характер отсутствует у большинства откликов

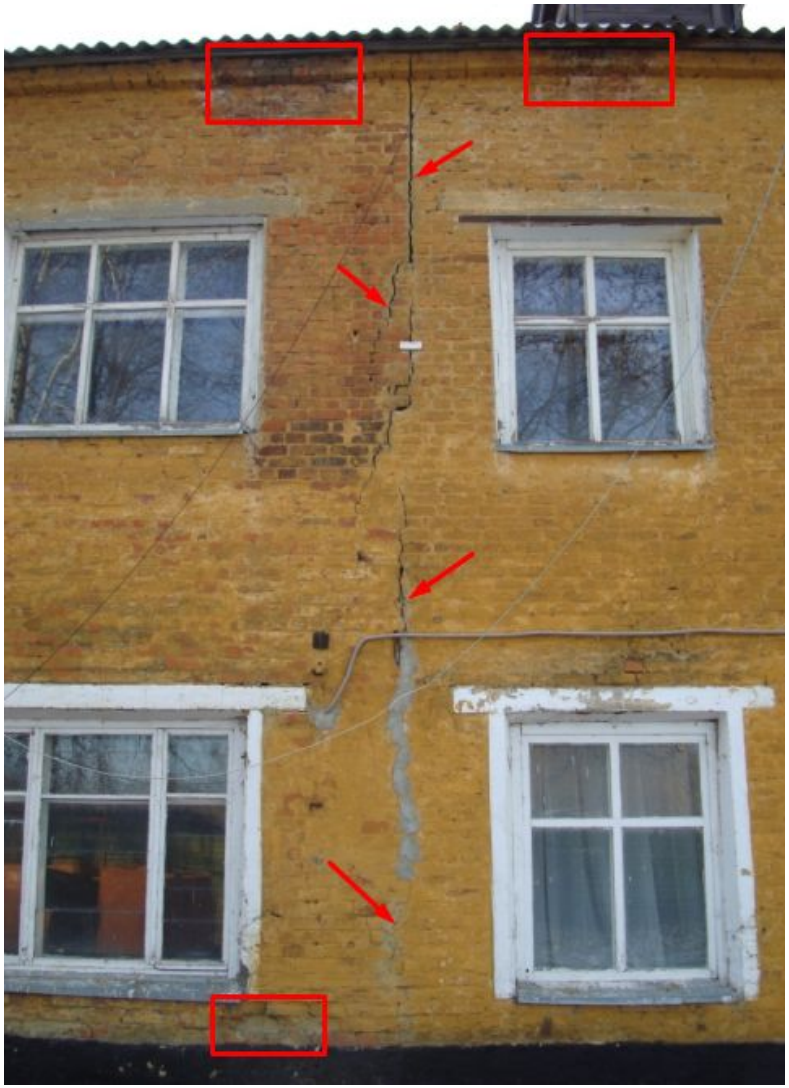
- как следует из графиков спектров у обследуемого здания на ожидаемой собственной частоте первой формы колебаний здания (≤ 8,93 Гц), для направления колебаний вдоль оси X и вдоль оси Y, в полосе частот, содержащую локальный максимум спектра сигнала, отсутствуют явно выраженные спектральные пики.

Такой вид сигналов и спектров сигналов свидетельствует о том, что при ударных воздействиях в здании возбуждаются преимущественно не свободные колебания, а случайные вынужденные, что присуще зданиям с большим физическим износом, а так же вызвано конструктивными особенностями объекта: деревянные перекрытия и балки предположительно во взаимодействии с несущими стенами не обеспечивают необходимую пространственную жесткость.

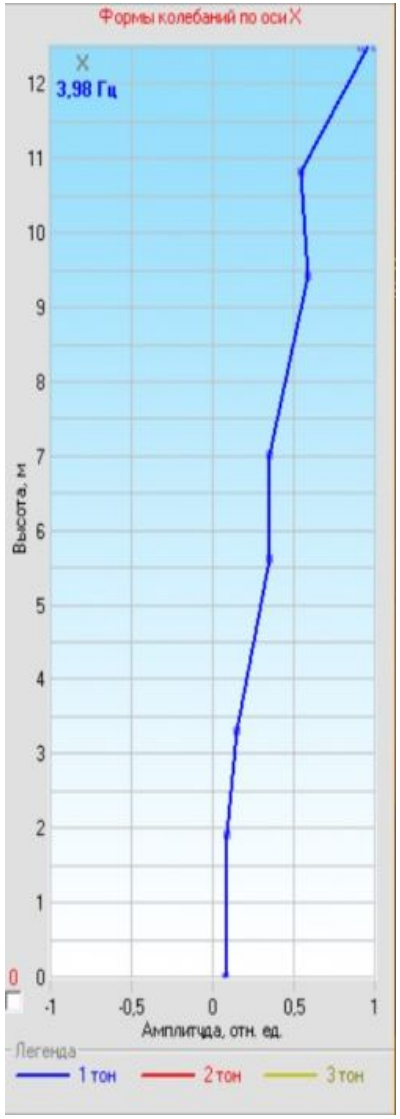
Максимальное увеличение периода собственных колебаний исправных зданий составило 76,87 %, тяжелая степень повреждения.

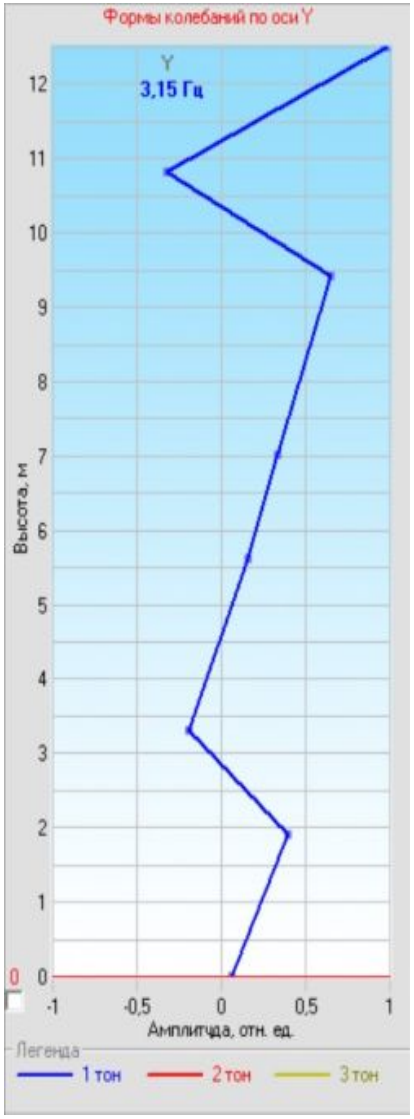
Установленная категория технического состояния здания, по результатам микродинамических испытаний – аварийная.

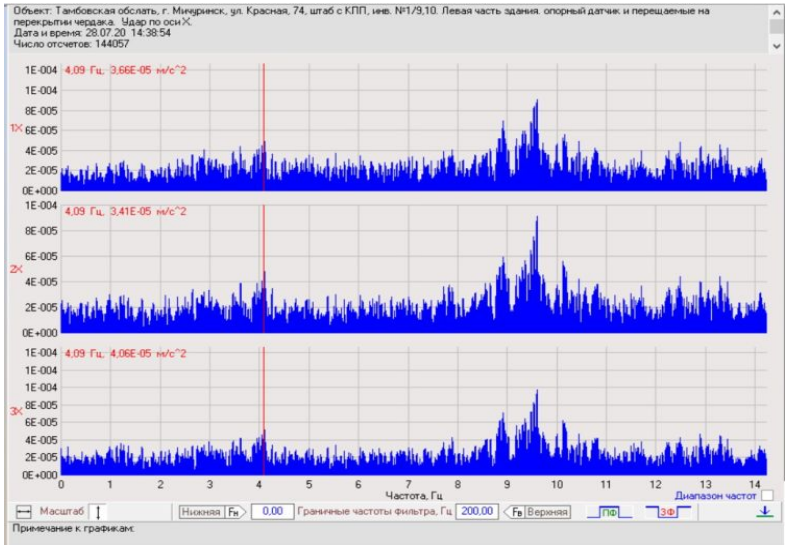
Фото дефектов несущих конструкций здания штаба УАЭ инв.№323 (2 эт.), 1931 г.п., Тамбовская обл., г. Тамбов

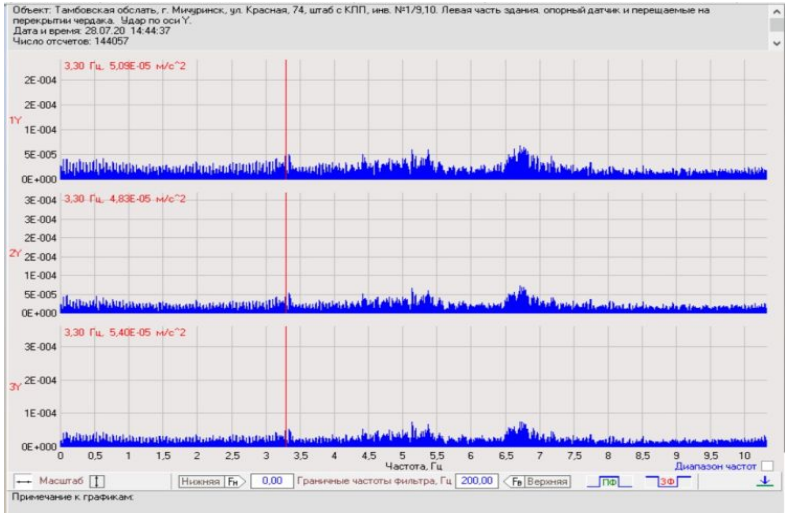


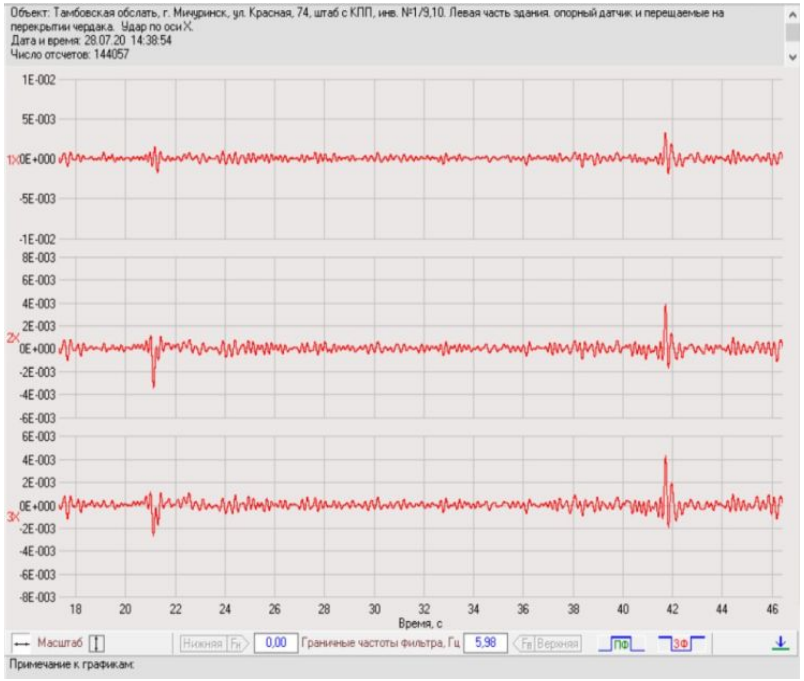
Результаты микродинамических испытаний здания штаба с КПП (инв.№9,10), 3 эт., 1954 г.п., г. Мичуринск, Тамбовская обл.

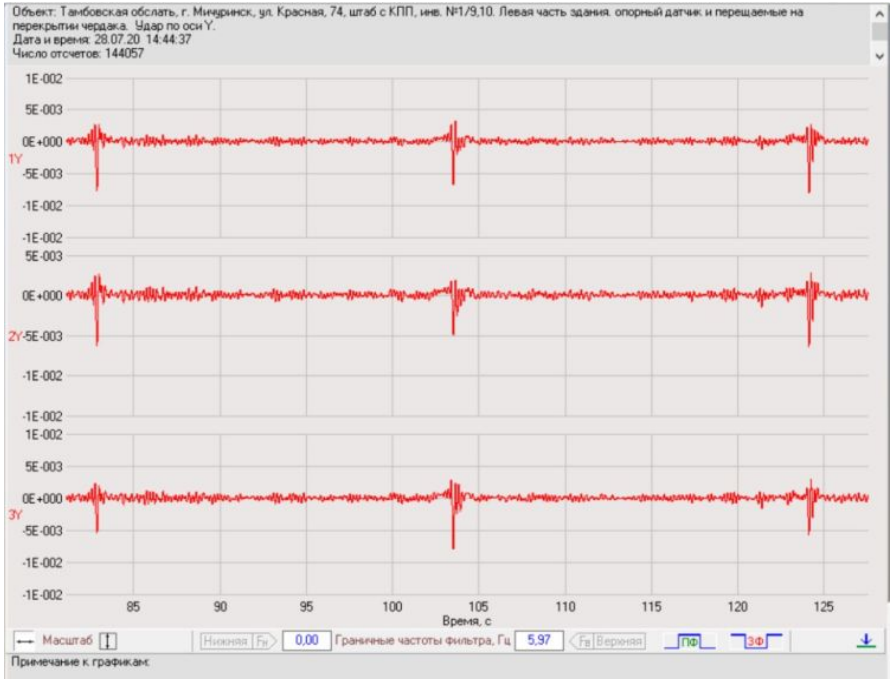












Краткое описание результатов микродинамических испытаний

У здания штаба с КПП (инв.№9,10) отклики и спектры сигналов имеют следующие признаки:

- сигналы датчиков, которые находятся рядом в одной точке измерений и имеют одинаковое направление, различаются между собой и имеют схожую полярность

- последовательные отклики отличаются друг от друга

- колебательный характер присутствует не у всех откликов

- как следует из графиков спектров у обследуемого здания на ожидаемой собственной частоте первой формы колебаний здания ($\leq$ 5,95 Гц), для направления колебаний вдоль оси X и вдоль оси Y, в полосе частот, содержащую локальный максимум спектра сигнала, ясно выражены спектральные пики.

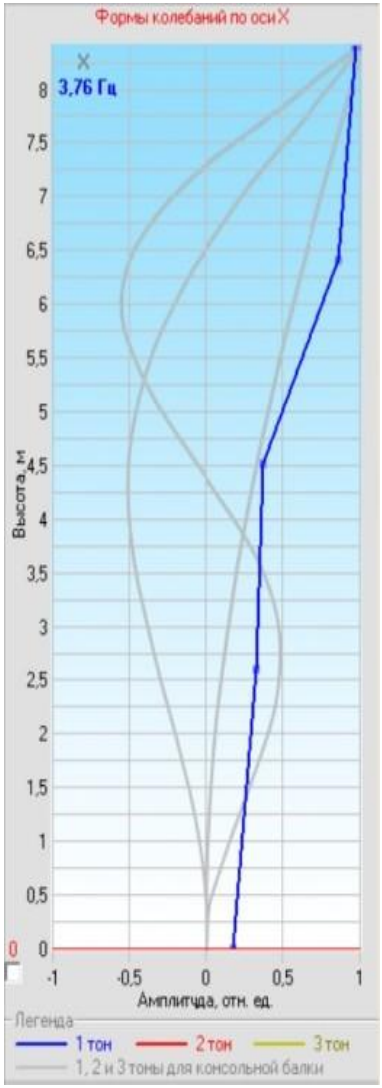
Такой вид сигналов и спектров сигналов свидетельствует о том, что при ударных воздействиях в здании возбуждаются преимущественно свободные колебания, что присуще зданиям с умеренным физическим износом.

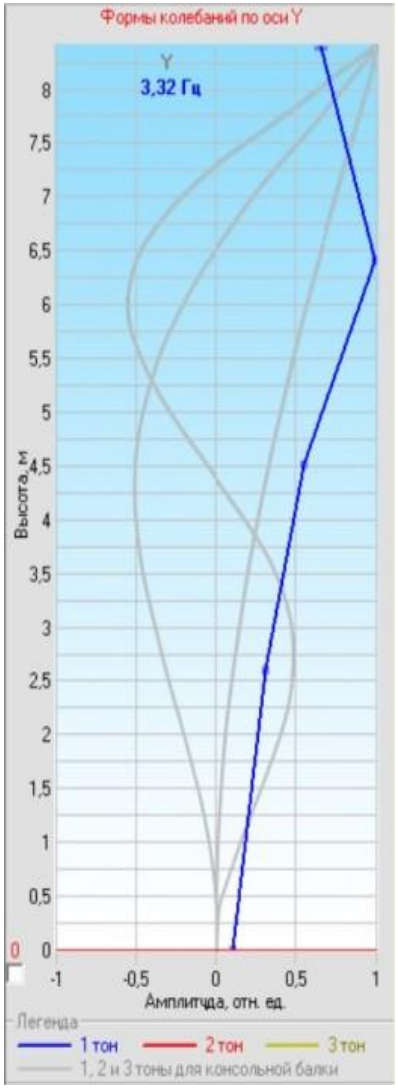
Максимальное увеличение периода собственных колебаний исправных зданий составило 46,0%, сильная степень повреждения.

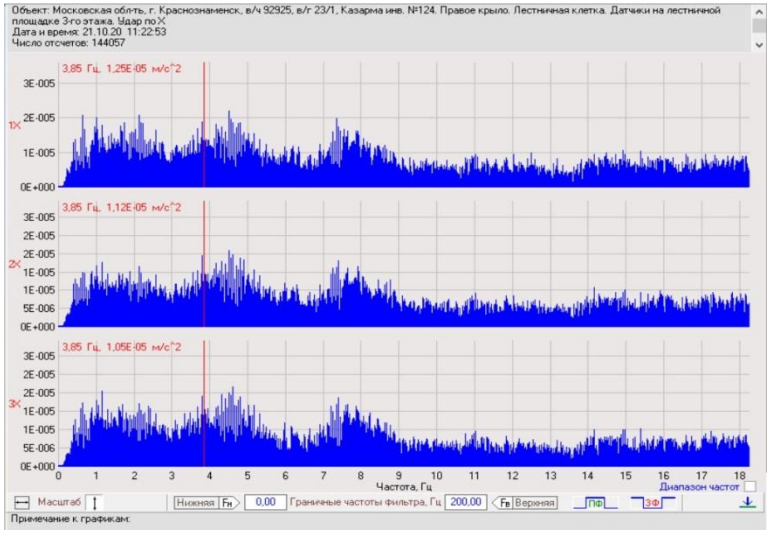
Установленная категория технического состояния здания, по результатам микродинамических испытаний – ограниченно-работоспособное.

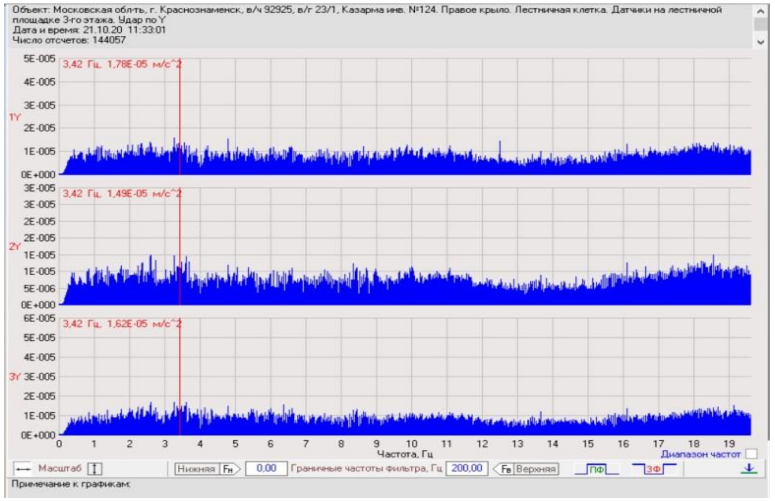
Фото дефектов несущих конструкций здания штаба с КПП (инв.№9,10), 3 эт., 1954 г.п., г. Мичуринск, Тамбовская обл.

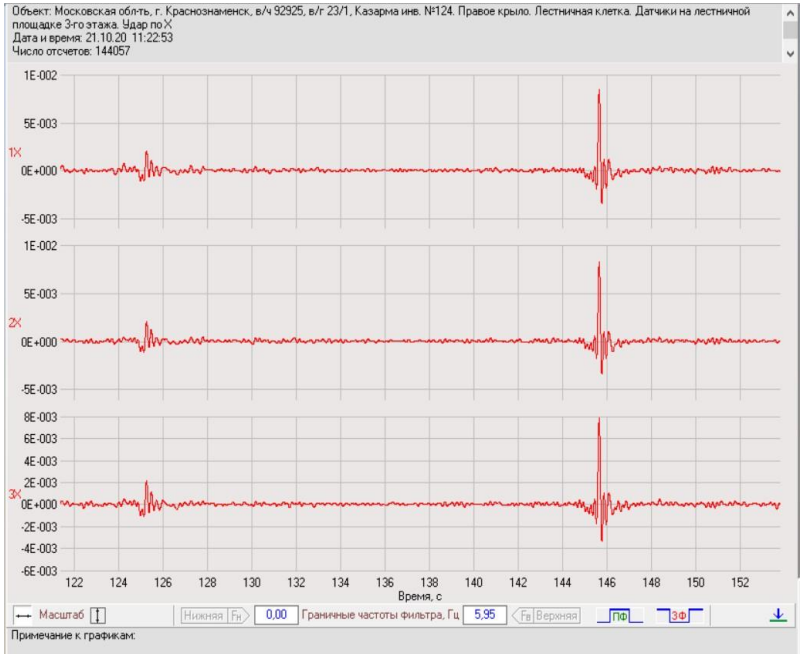
Результаты микродинамических испытаний здания казармы инв.№124 (3 эт.), 1977 г.п., Московская обл., г. Краснознаменск, в/г №23/1

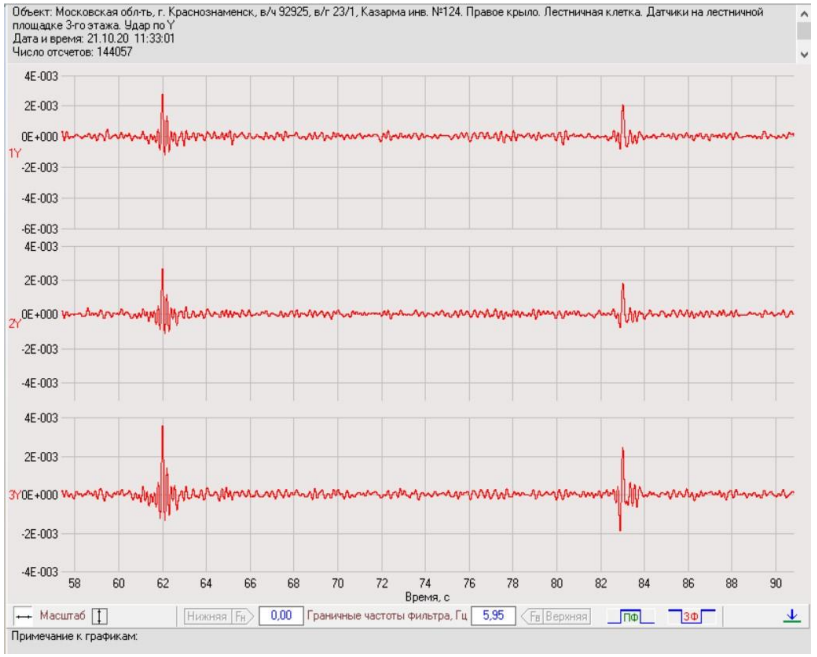












Краткое описание результатов микродинамических испытаний

У здания казармы инв.№124 отклики и спектры сигналов имеют следующие признаки:

- сигналы датчиков, которые находятся рядом в одной точке измерений и имеют одинаковое направление, между собой не отличаются и имеют схожую полярность

- последовательные отклики отличаются друг от друга

- колебательный характер присутствует у большинства откликов

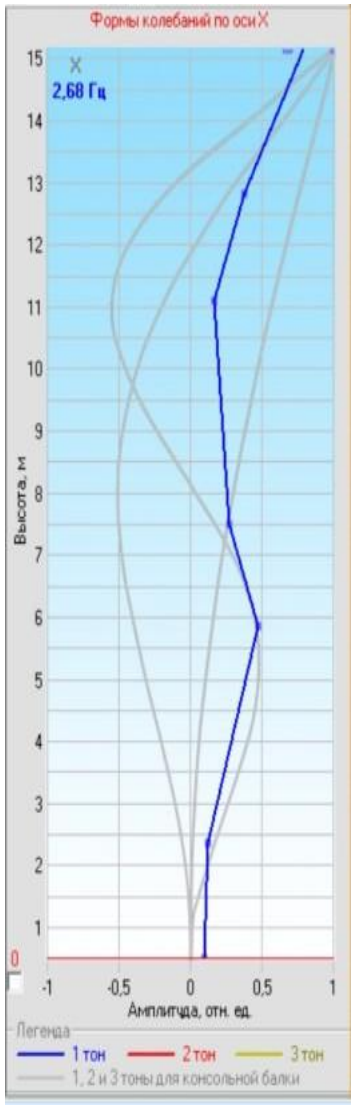
- как следует из графиков спектров у обследуемого здания на ожидаемой собственной частоте первой формы колебаний здания ($\leq$ 5,95 Гц), для направления колебаний вдоль оси X и вдоль оси Y, в полосе частот, содержащую локальный максимум спектра сигнала, ясно выражены спектральные пики.

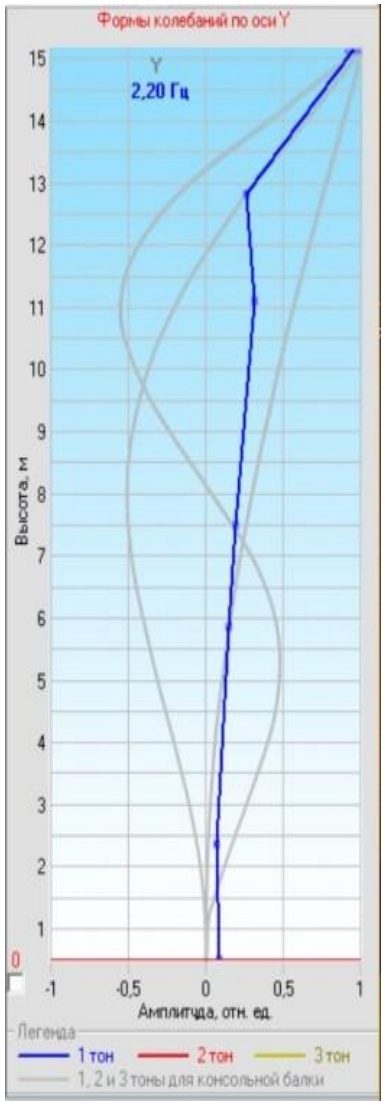
Такой вид сигналов и спектров сигналов свидетельствует о том, что при ударных воздействиях в здании возбуждаются преимущественно свободные колебания, что присуще зданиям с умеренным физическим износом.

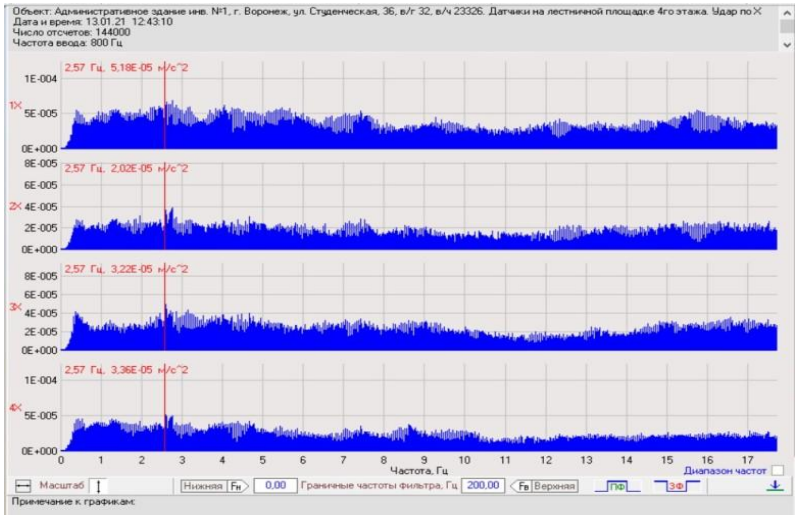
Среднее увеличение периода собственных колебаний исправных зданий составило 36,00 %, сильная степень повреждения. Установленная категория технического состояния здания, по результатам микродинамических испытаний – ограниченно-работоспособное.

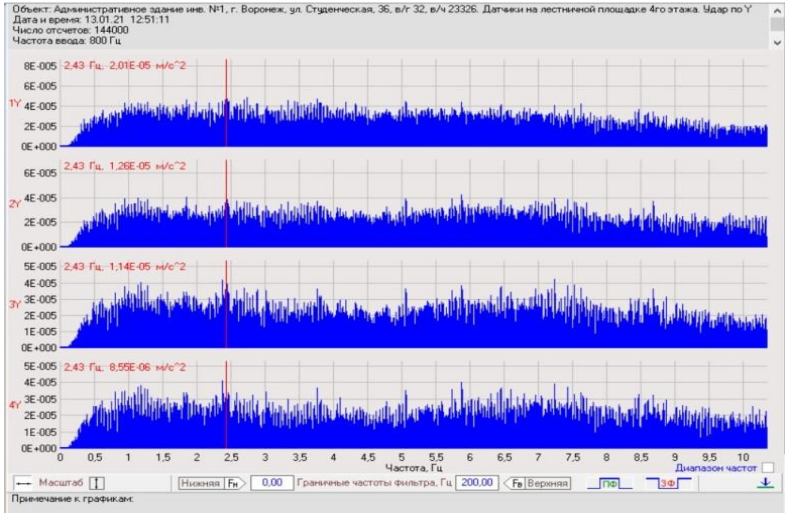
Фото дефектов несущих конструкций здания казармы инв.№124 (3 эт.), 1977 г.п., Московская обл., г. Краснознаменск, в/г №23/1

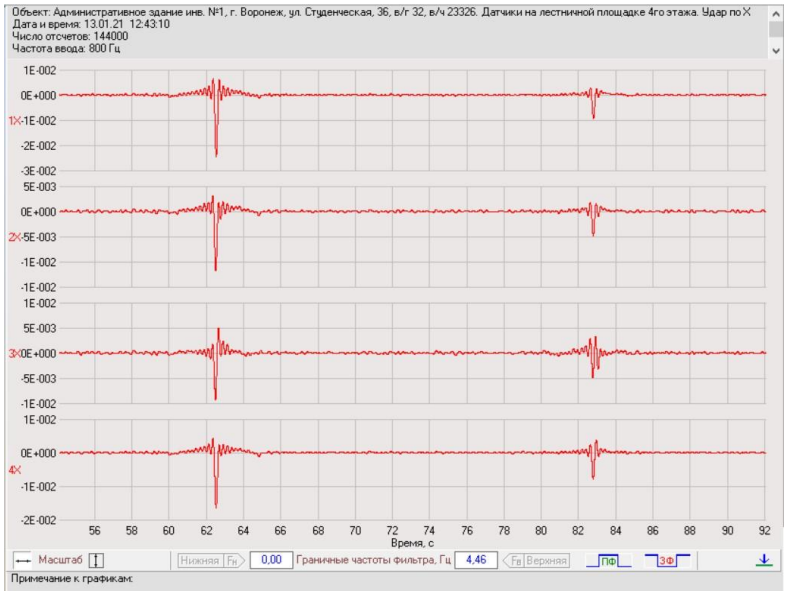
Результаты микродинамических испытаний административного здания инв.№ 1 (4 эт.), 1877 г.п., Воронежская обл., г. Воронеж, в/г №32

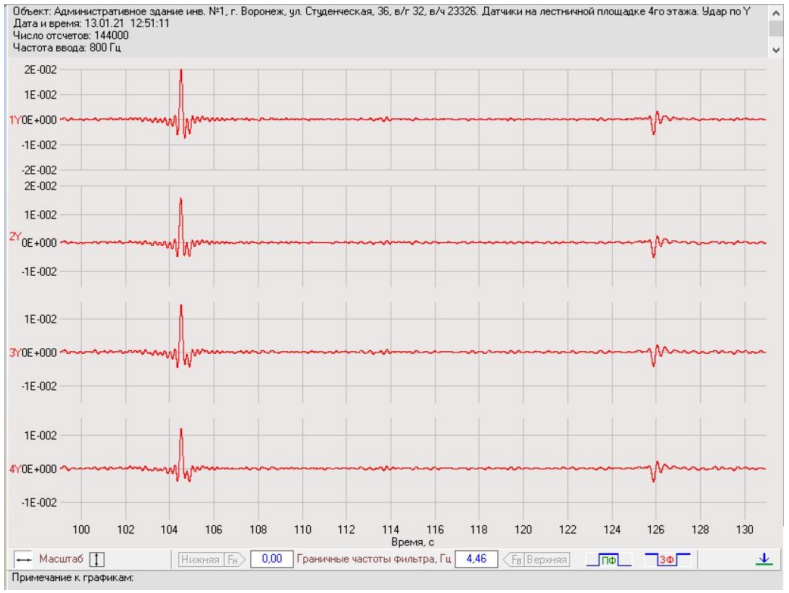












Краткое описание результатов микродинамических испытаний

У административного здания инв.№1 отклики и спектры сигналов имеют следующие признаки:

- сигналы датчиков, которые находятся рядом в одной точке измерений и имеют одинаковое направление, между собой не отличаются и имеют схожую полярность

- последовательные отклики отличаются друг от друга

- колебательный характер присутствует у большинства откликов

- как следует из графиков спектров у обследуемого здания на ожидаемой собственной частоте первой формы колебаний здания ($\leq 4{,}46$ Гц), для направления колебаний вдоль оси X и вдоль оси Y, в полосе частот, содержащую локальный максимум спектра сигнала, ясно выражены спектральные пики.

Такой вид сигналов и спектров сигналов свидетельствует о том, что при ударных воздействиях в здании возбуждаются преимущественно свободные колебания, что присуще зданиям с умеренным физическим износом.

Максимальное увеличение периода собственных колебаний исправных зданий составило 58,54 %, сильная степень повреждения. Данное увеличение периода собственных колебаний предположительно вызвано конструктивными особенностями объекта: деревянные перекрытия и балки предположительно во взаимодействии с несущими стенами не обеспечивают необходимую пространственную жесткость, а так же наличие пристройки (из [12] - являясь эквивалентом присоединенной массы, пристройка значительно снижает собственную частоту колебаний основного здания).

Установленная категория технического состояния здания, по результатам микродинамических испытаний – ограниченно-работоспособное.

Фото дефектов несущих конструкций административного здания инв.№ 1 (4 эт.), 1877 г.п., Воронежская обл., г. Воронеж, в/г №32

Основные понятия и определения

Период колебаний *- промежуток времени, в течение которого совершается одно полное колебание.*

Частота *- число колебаний, совершенных за единицу времени*

Амплитуда гармонических колебаний *(вибрации),* или кратко, *амплитуда, — максимальное значение величины (характеризующей вибрацию) при гармонических колебаниях (вибрации).*

Спектр частот — это *совокупность частот гармонических составляющих колебаний расположенных в порядке возрастания.*

Свободные колебания *(вибрация) — колебания (вибрация) системы, происходящие без переменного внешнего воздействия и поступления энергии извне.*

Вынужденные колебания *(вибрация) — колебания (вибрация) системы, вызванные и поддерживаемые силовым и (или) кинематическим возбуждением.*

Собственная частота колебаний *(вибрации) линейной системы,* или кратко, *собственная частота — любая из частот свободных колебаний (вибрации) линейной системы.*

Собственная форма колебаний *(вибрации) системы,* или кратко, *собственная форма — форма колебаний (вибрации) линейной системы, колеблющейся с одной из собственных частот.*

Динамические характеристики конструкций, зданий и сооружений, полученные при анализе их свободных колебаний это - периоды и формы, а также логарифмические декременты колебаний.

Быстрое преобразование Фурье (БПФ) — это алгоритм быстрого вычисления дискретного преобразования Фурье (ДПФ). То есть, алгоритм вычисления за количество действий, меньшее чем, требуемых для прямого (по формуле) вычисления ДПФ.

Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) *— это одно из преобразований Фурье, широко применяемых в алгоритмах цифровой обработки сигналов.*

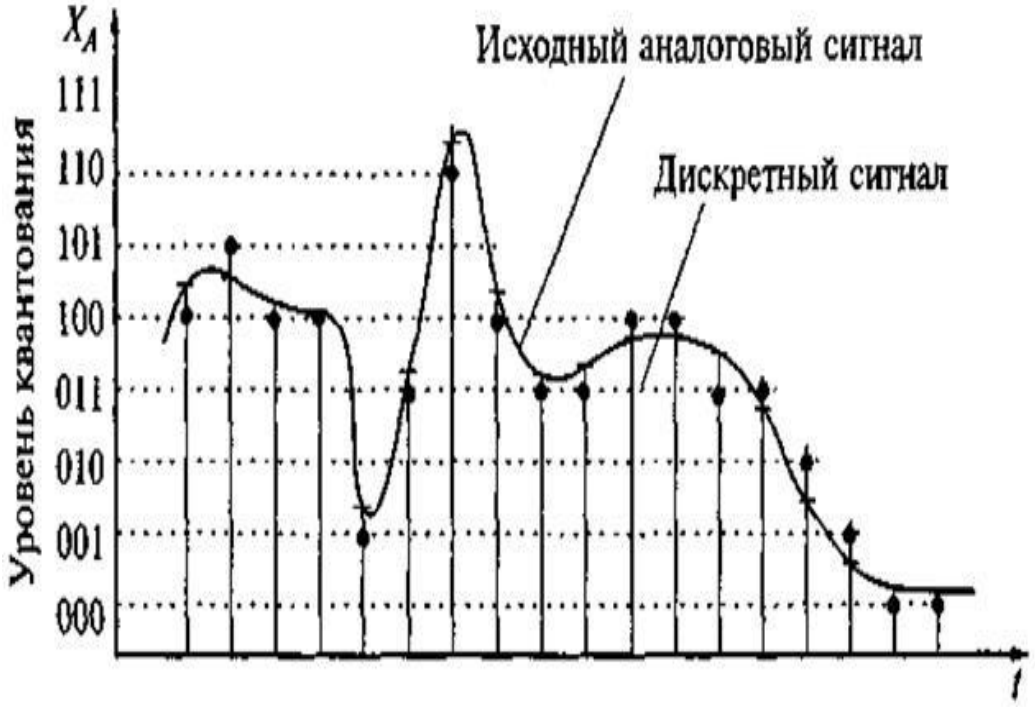


Рисунок 4 – Вид ДПФ

Логарифмический декремент колебаний и добротность колебательной системы

***Логарифмический декремент колебаний**, или кратко, логарифмический декремент (недопустимо — логарифмический декремент затухания)* — это *натуральный логарифм отношения двух последовательных максимальных или минимальных значений величины при затухающих свободных колебаниях (рисунок 1).*

Логарифмический декремент собственных колебаний рассматривается как мера диссипации (рассеивания) упругой энергии для данного тона колебаний.

Логарифмический декремент колебаний обратно пропорционален числу колебаний.

***Добротность колебательной системы** называется число, показывающее во сколько раз сила упругости больше силы сопротивления.*

Чем больше добротность, тем медленнее происходит затухание, тем затухающие колебания ближе к свободным гармоническим.

Чем больше логарифмический декремент затухания, тем меньше число колебаний, следовательно и добротность колебательной системы.

На рисунке 2 показан типичный пример затухающих свободных колебаний

$$\delta = \ln \frac{a_N}{a_{N+1}}$$

Рисунок 1 – Формула определения логарифмического декремента колебаний

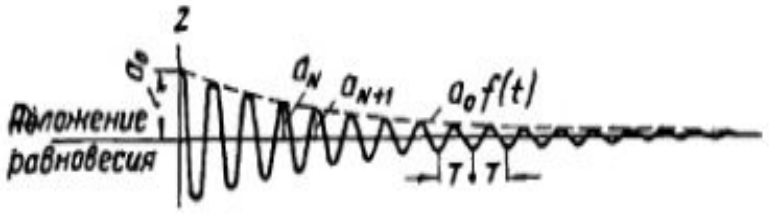


Рисунок 2 – Пример затухающих свободных колебаний

По мере старения здания возрастает значение логарифмического декремента колебаний. Это можно проиллюстрировать графиком на рисунке 3, построенным КТН Сотиным В.Н. из ООО «ЦИЭКС», по данным из патента Российской Федерации № 2140625 «Способ определения физического состояния зданий и сооружений», авторы: Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Барышев В.Г., Кузьменко А.П.

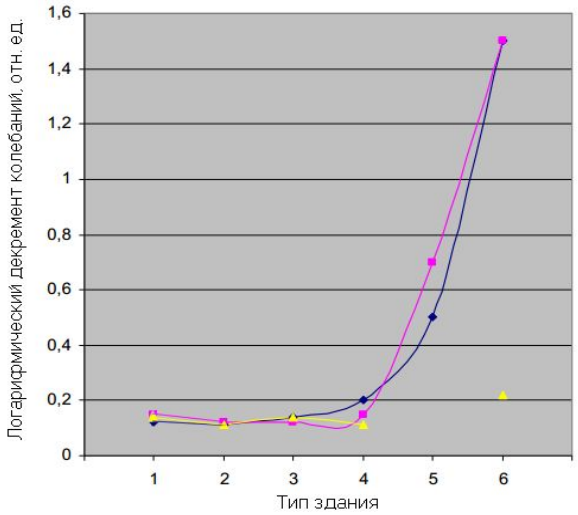


Рисунок 3 - Влияние старения здания на значение логарифмического декремента колебаний:
— 1 тон; — 2 тон; — 3 тон

Тип здания	Характеристика	Построен	Состояние
1	7 этажей, Н = 24 м, ж/б	1991- 1999	Удовлетворительное
2	4 этажа, Н = 12,6 м, кирпичное	1961	Подлежит ремонту
3	4 этажа, Н = 12,6 м, кирпичное	1961	Подлежит ремонту
4	4 этажа, Н = 12,6 м, кирпичное	1960	Аварийное состояние
5	3 этажа, кирпичное	1928	Подлежит ремонту
6	2 этажа, Н = 15,3 м, кирпичное	1887	Решается вопрос о сносе

Спектр частот и тон собственных колебаний зданий

Здание или сооружение является колебательной диссипативной упругой системой. Диссипативная система – это система, в которых происходит, диссипация, т.е. рассеивание энергии.

Количество частот собственных колебаний упругой системы равно числу ее степеней свободы. Это значит, что система с N степенями свободы, предоставленная себе после нарушения равновесия, может совершать N независимых собственных колебаний с различными частотами, или, как говорят, может иметь N тонов собственных колебаний. Независимыми эти колебания называются потому, что при определенных начальных условиях движения система может колебаться по одному тону, любому из N ее тонов. На рис.5 показаны собственные колебания системы с тремя степенями свободы, происходящие одновременно по всем тонам, при определенных начальных условиях.

Совокупность частот собственных колебаний конструкций, расположенных в возрастающей последовательности, называют спектром частот собственных колебаний конструкции или здания. Частоту, имеющую на этом спектре порядковый номер k, называют k–й частотой или частотой k–го тона собственных колебаний. **Первую (наивысшую) частоту называют основной частотой или частотой основного тона.**

Для примера на рисунке 6 представлен спектр сигналов ускорений колебаний с выделением границ резонансных пиков частот собственных колебаний.

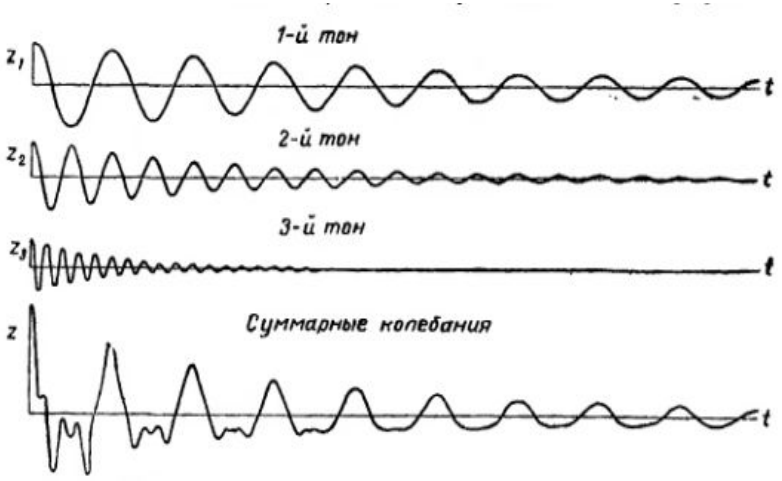


Рисунок 5 – Собственные затухающие колебания системы с 3-мя степенями свободы

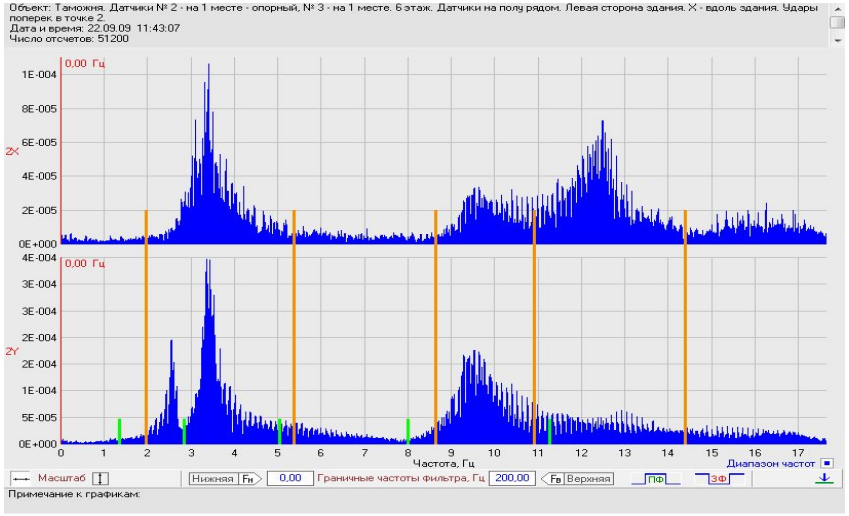


Рисунок 6 – Спектр сигналов ускорений колебаний

Формы колебаний зданий

Упругая конфигурация, которую принимает здание, или конструкция, при собственных колебаниях по какому-либо одному тону, называется формой собственных колебаний здания (или конструкции) по этому тону. Данному тону собственных колебаний здания (или конструкции) отвечает единственная форма колебаний.

Форма колебаний – это кривая, показывающая положение точек колебательной системы относительно положения равновесия в фиксированный момент времени .

Основные формы свободных колебаний зданий и сооружений схематично представлены на рисунке 7.

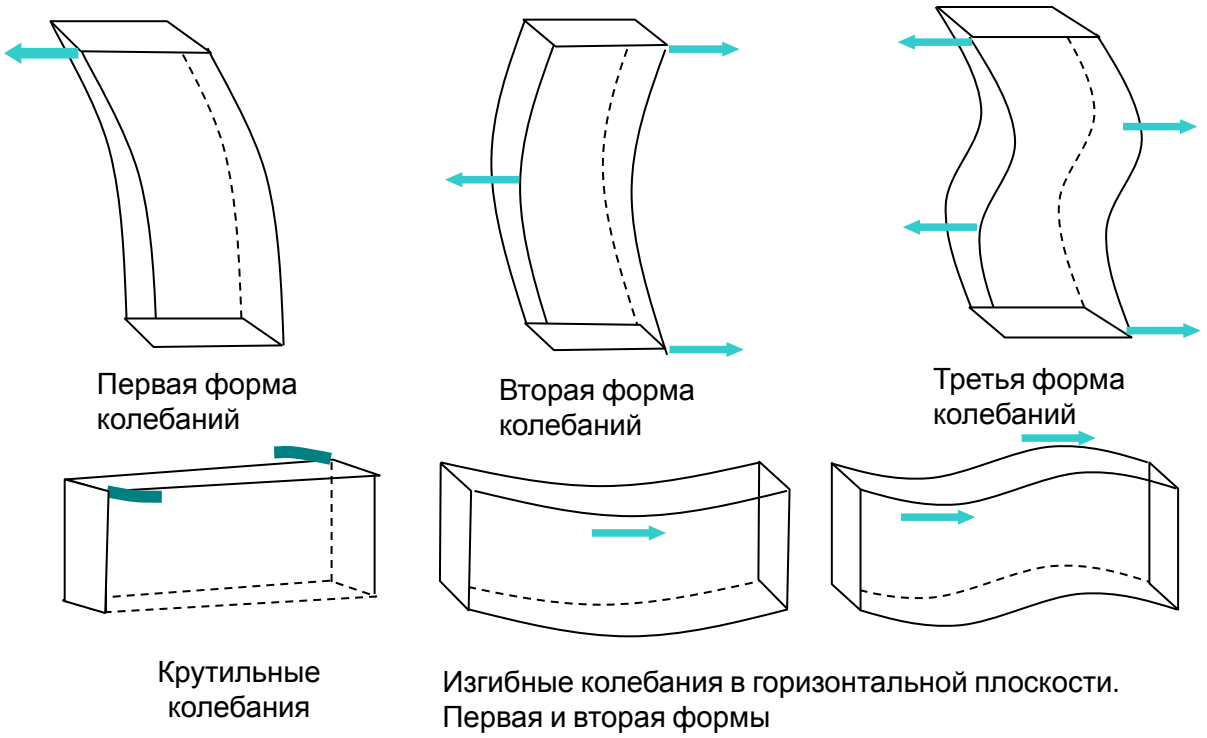
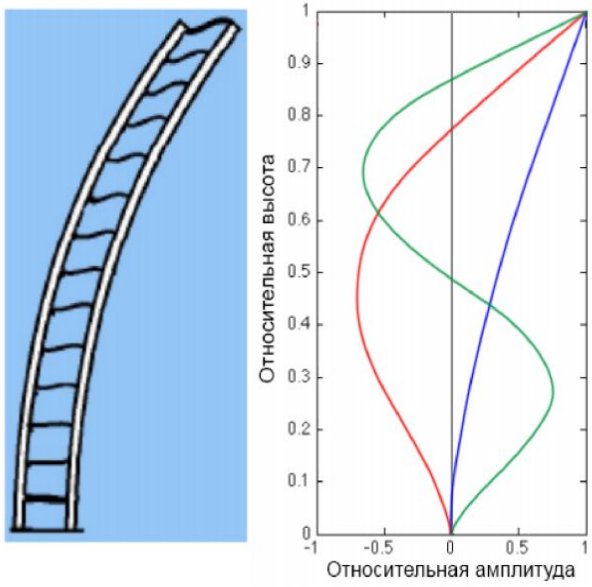


Рисунок 7 - Основные формы колебаний зданий и сооружений

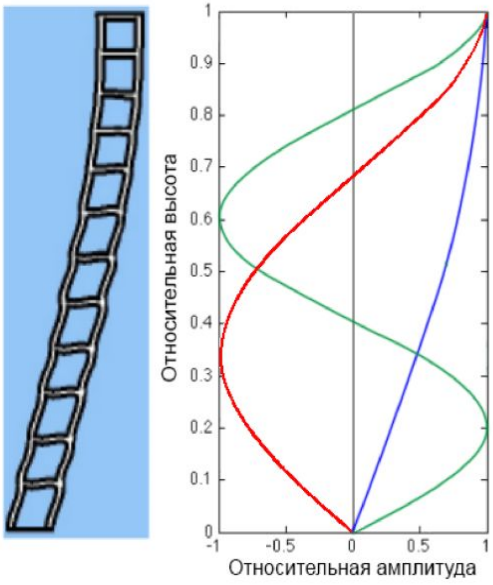
Виды деформаций по формам колебаний

Поведение существующих зданий обусловливается в основном двумя основными механизмами:

Изгибная деформация



Сдвиговая деформация



Формы колебаний: форма 1; форма 2; форма 3

Изгибная деформация: стены более жесткие, чем плиты перекрытий (железобетонные стены жесткости).
Сдвиговая деформация: стены мягче, чем плиты перекрытий (железобетонный каркас).

Из работы: Philippe Guéguen «Building seismic response and structural health monitoring»

Список использованной литературы

1. Федеральный закон от 30.12.2009 № 384–ФЗ (в ред. Федерального закона от 02.07.2013 №185-ФЗ) «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

2. ГОСТ 31937–2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния», ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2014г.

3. СП 13–102–2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений» — Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2003г.

4. ГОСТ 34081–2017. «Здания и сооружения. Определение параметров основного тона собственных колебаний», ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2017г.

5. Методика оценки и сертификации инженерной безопасности зданий и сооружений. -М.: МЧС России, 2003г.

6. R. Karami-Mohammadi, M. Mirtaheri, M. Salkhordeh and M. A. Hariri-Ardebili «Vibration Anatomy and Damage Detection in Power Transmission Towers with Limited Sensors», 2020г.

7. Савин С.Н., И.Л. Данилов, Сейсмобезопасность зданий и территорий, -Спб., Учебное пособие Учебники для ВУЗов. Специальная литература Лань ,2015г.

8. Савин С.Н., д.т.н, профессор и др. «Анализ конечно-элементной модели зданий, поврежденных в результате чрезвычайных ситуаций» / «Вестник гражданских инженеров,2019,№2(73)»

9. Энциклопедия безопасности: строительство, промышленность, экология: в 3–х т./ Т. 1: Аварийный риск. Взрывные и ударные воздействия. — М.: Наука, 2005г.

10. Справочник по динамике сооружений / под ред. Б.Г. Коренева, И.М. Рабиновича. М.: Стройиздат, 1972г.

11. Динамический расчет несущих конструкций зданий/ под ред. Е.С. Сорокина – М.: Стройиздат, 1956.

12. Савин С.Н. Техническая диагностика прочностных характеристик зданий и сооружений на основе анализа форм их собственных колебаний.-МО РФ, 2006г.

13. Проектирование и расчет многоэтажных гражданских зданий и их элементов: Учебное пособие для вузов / Под ред. П. Ф. Дроздова – М.: Стройиздат, 1986.

14. СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах»

15. СП 20.13330.2016 («Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*»)

16. Котляровский В.А., д.т.н., Сущев С.П., к.т.н., Ларионов В.И., к.т.н. «Применение мобильных диагностических комплексов для оценки прочности, устойчивости и остаточного ресурса зданий и сооружений»/ Промышленная безопасность, 2004г.