

Григорьев Владимир Викторович, доцент кафедры математики, эконометрики и информационных технологий факультета международных экономических отношений, МГИМО (У) МИД России, 119454, Москва, пр. Вернадского, 76, 8 (985) 997-07-44, grigorievv@mail.ru

Логинов Евгений Леонидович, профессор РАН, дважды лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, начальник службы Ситуационно-аналитического центра Минэнерго России, 107996, ГСП-6, г. Москва, ул. Щепкина, дом 42, 8 (903) 100-78-24, E-mail: evgenloginov@gmail.com

УДК 627.82:550.34

DOI: 10.36535/0869-4179-2021-04-5

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ И ПРОВЕДЕНИЮ СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИХ ОБСЛЕДОВАНИЙ И МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗДАНИЙ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Кандидат техн. наук *А.П. Кузьменко, В.С. Сабуров, Д.Б. Короленко, Л.А. Короленко*
Федеральный исследовательский центр информационных
и вычислительных технологий

На основе результатов сейсмометрических обследований разработаны методические рекомендации по проведению обследований и мониторинга технического состояния зданий различного назначения для обеспечения их безопасной эксплуатации. В работе приведены основные требования по организации и проведению обследований и сейсмометрического мониторинга, требования к средствам измерения, программам сбора, обработки и интерпретации данных, выбору параметров регистрации колебаний. Детально рассмотрены определение динамических характеристик 1-й группы (частот и форм собственных колебаний, диссипативных характеристик, скоростей распространения упругих волн), расчёт динамических характеристик 2-й группы (упругих характеристик несущего каркаса здания и основания), оценка динамических характеристик 3-й группы (реакция на ветровую нагрузку и сейсмическое воздействие, сценарий разрушения).

Ключевые слова: сейсмометрический мониторинг, детальное сейсмометрическое обследование, сейсмические события, динамические характеристики, формы и частоты собственных колебаний.

RECOMMENDATIONS FOR THE ORGANIZATION AND CONDUCTING OF SEISMOMETRIC SURVEYS AND MONITORING OF THE TECHNICAL CONDITION OF BUILDINGS FOR VARIOUS PURPOSES

Ph.D (Tech) A.P. Kuzmenko, V.S. Saburov, D.B. Korolenko, L.A. Korolenko
Federal research center for information and computational technologies

Based on the results of seismometric surveys, the authors developed guidelines for conducting surveys and monitoring the technical condition of buildings for various purposes to ensure their safe operation. The article provides basic requirements for the organization and conducting of surveys and seismometric monitoring, requirements for measuring instruments, programs for collecting, processing and interpreting data, the choice of parameters for recording vibrations. The paper describes in detail the definition of the dynamic characteristics of the 1st group (frequencies and forms of natural vibrations, dissipative characteristics, velocities of propagation of elastic waves), the calculation of the dynamic characteristics of the 2nd group (the elastic characteristics of the supporting frame of the building and the base), the assessment of the dynamic characteristics of the 3rd group (response to wind load and seismic impact, destruction scenario).

Keywords: seismometric monitoring, detailed seismometric survey, seismic events, dynamic characteristics, forms and frequencies of natural vibrations.

Разработанные в ФИЦ ИВТ рекомендации предназначены для оценки и сертификации инженерной безопасности зданий различного назначения на основе комплексного анализа их геометрических, физико-механических и динамических параметров, полученных в результате проведения инженерно-сейсмометрических обследований и сейсмометрического мониторинга технического состояния с помощью инженерно-сейсмометрических станций без использования силового воздействия на объект.

Здания являются наиболее распространёнными строительными сооружениями, назначением которых является обеспечение нормальных условий проживания и работы людей. Анализ технического состояния существующих и вновь возводимых зданий показывает, что количество зданий, требующих обследования, увеличивается с каждым годом, что является следствием ряда факторов: физического и морального их износа, перевооружения и реконструкции производственных зданий промышленных предприятий, реконструкции малоэтажной старой застройки, использования зарубежных методов проектирования, применения новых строительных материалов и технологий строительства.

Особенно важно осуществлять проведение обследований после разного рода техногенных и природных воздействий (пожары, землетрясения и т.п.), а также при реконструкции старых зданий и сооружений, что часто связано с изменением действующих нагрузок, конструктивных схем и необходимостью учета современных норм проектирования зданий.

Общей целью обследований технического состояния строительных конструкций и зданий в целом являются выявление степени физического износа, причин, обуславливающих их состояние, фактической работоспособности и разработка мероприятий по обеспечению их эксплуатационных качеств. Исключительно большое значение имеют обследования, позволяющие производить оценку прочности и надёжности зданий и сооружений в целом.

Согласно [1,2] при проведении сейсмометрического обследования здания любого типа требуется измерение частот и логарифмического декремента затухания первых форм собственных колебаний в основных осях здания. Данные динамические характеристики могут быть использованы только для замещающей модели здания в виде модели колебаний одномассового осциллятора, что не позволяет корректно оценить упругие характеристики строительной системы здание – грунтовое основание. Необходимо также отметить, что в нормативных документах отсутствуют рекомендации по проведению сейсмометрических измерений и обработки регистрационных записей колебаний. Поэтому в ФИЦ ИВТ были разработаны рекомендации по организации и проведению сейсмометрических обследований и мониторинга технического состояния зданий различного назначения.

Разработка рекомендаций была произведена на основе анализа результатов, которые были получены при проведении сейсмометрических обследований ряда зданий различного назначения и конструктивного исполнения. Рекомендации содержат правила проведения всех технологических процедур, выполняемых при проведении сейсмометрических обследований и сейсмометрического мониторинга технического состояния зданий.

В основной части рекомендаций приведены:

– общие требования к проведению сейсмометрических наблюдений для обеспечения достоверности, достаточности и представительности натурных данных, порядок проведения подготовительного и основного этапов сейсмометрического обследования, форма отчёта по результатам обследования;

– основные положения организации и проведения сейсмометрического мониторинга;

– основные требования к средствам измерения, программам сбора, обработки и интерпретации данных;

– рекомендации по выбору параметров регистрации колебаний и обработки данных;

– содержание научно-технического отчёта.

Инженерно-сейсмометрическое обследование зданий рекомендуется проводить в два этапа.

1. *Предварительное обследование* включает: сбор информации, предварительные измерения, оценку объёма ожидаемых результатов, назначение схем наблюдения и согласование технического задания.

2. *Сейсмометрическое обследование:*

2.1. Измерение динамических характеристик 1-й группы: частот и форм собственных колебаний, диссипативных характеристик, скоростей распространения упругих волн.

2.2. Расчёт динамических характеристик 2-й группы – упругих характеристик несущего каркаса здания и подстилающего грунта, производимый в рамках рекомендуемых замещающих аналитических моделей колебаний здания.

2.3. Оценка динамических характеристик 3-й группы:

– реакция (относительное смещение этажных ячеек) здания на ветровую нагрузку и сейсмическое воздействие;

– сценарий разрушения здания с учётом накопления повреждений при сейсмическом воздействии на основании теории траектории состояния здания (интенсивность воздействия – степень повреждения) и траектории состояния здания, которая определяет зависимость «логарифмический декремент – интенсивность воздействия».

Заключение – соответствие технического состояния здания условиям строительной площадки (ветровая нагрузка, вероятное сейсмическое воздействие).

Рекомендации содержат семь приложений. В приложении «Характеристики колебаний» приведено описание математических функций, используемых при обработке записей колебаний, зарегистрированных при обследовании, алгоритмы вычисления и представления [3,4]:

– амплитудных спектров накопления, спектров когерентности колебаний, комплексных спектров передаточной функции, спектров параметра бегучести волны, спектров угла азимута и эллиптичности колебаний в пунктах наблюдения;

– поляризационных характеристик колебаний (параметров траектории движения в пункте наблюдения), импульсных и статистических характеристик колебаний.

В приложении «Динамические характеристики 1-й группы» приведены способы и примеры измерения и идентификации частот и форм собственных колебаний зданий различной этажности на основании результатов анализа спектральных характеристик колебаний зданий, диссипативных характеристик, скоростей распространения упругих волн в несущем каркасе зданий [5].

Измерение динамических характеристик первой группы производится на основании анализа спектров колебаний, комплексного спектра передаточной функции, спектра когерентности колебаний «опорный пункт – пункт наблюдения» и спектра бегучести волны.

Комплексная передаточная функция определяется как функция, наилучшим образом преобразующая входной сигнал в выходной. Расчёт комплексной передаточной функции производится по результатам измерений колебаний по схеме один вход – много выходов (рис. 1).

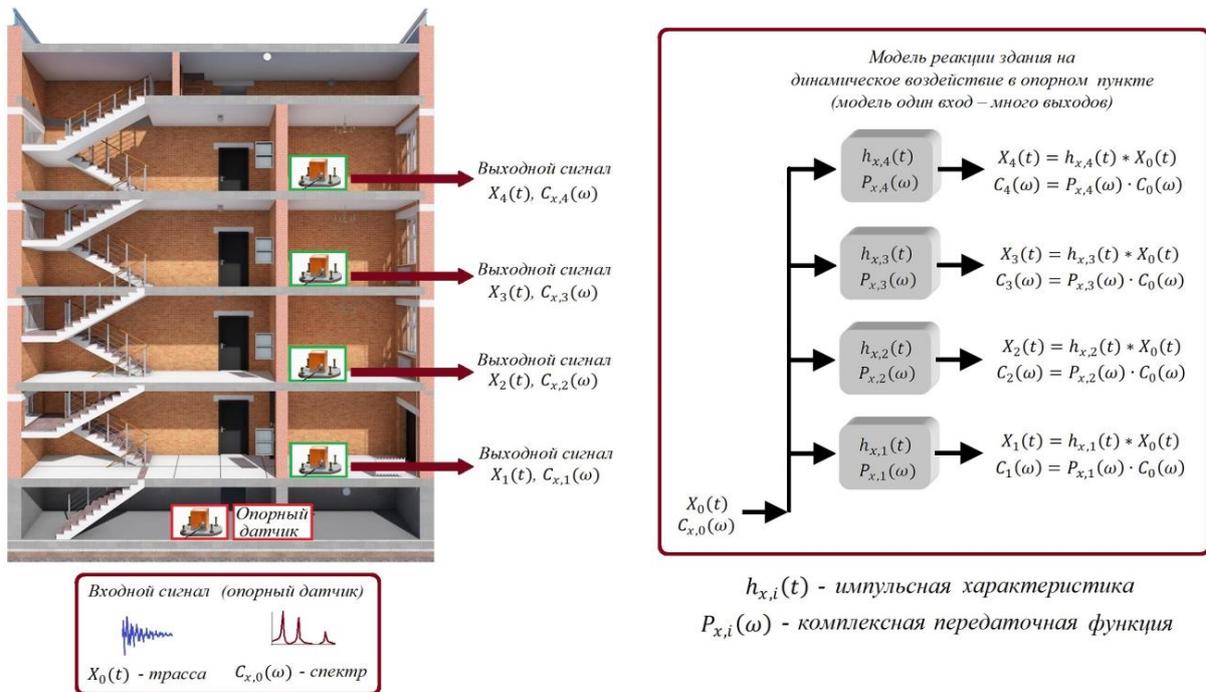


Рис. 1. Схема измерения колебаний для расчёта спектральных характеристик первой группы, где $P_i(\omega)$ – комплексная передаточная функция, $h_i(t)$ – импульсная характеристика

Для определения комплексных передаточных функций регистрация колебаний осуществляется на каждом этаже здания и в опорном пункте – в подвале или на первом этаже. Сигнал в опорном пункте считается входным сигналом, а в остальных пунктах наблюдения выходными сигналами, то есть реакцией здания на входное воздействие. По записям колебаний вычисляется комплексная передаточная функция «опорный пункт – пункты наблюдения» на этажах здания, а также импульсная характеристика, отображающая колебания здания на сигнал, заданный в опорном пункте. По комплексным передаточным функциям строятся амплитудные и фазовые спектры, а по срезам спектров выделяются эпюры частот собственных колебаний.

Форма представления передаточной функции и способ построения эпюр форм собственных поперечных колебаний здания приведены на рис. 2.

Амплитудные спектры представляются в виде зависимости амплитуд от номера пункта наблюдения (высоты) и частоты или в виде цветной карты в осях высота здания – частота. Собственные частоты выделяются либо по спектральным пикам на амплитудном спектре, либо цветом на картах (частоты p_1, p_2). С учетом фазы колебаний, изменяющейся на собственных частотах на угол 180° , строят эпюры первых частот собственных поперечных колебаний здания.

Импульсная характеристика (массив импульсных характеристик $h_i(t)$) позволяет построить эпюры упругого прогиба и оценить относительное смещение этажных ячеек в заданный момент времени при заданной интенсивности воздействия. На рис. 4 приведены эпюры упругого прогиба 16-ти этажного панельного здания при единичном импульсном воздействии в основании, в различные моменты времени. Отражение поперечной волны от верхнего перекрытия наблюдается в момент времени $t = 0,117$ с, в этот же момент достигается максимальное относительное смещение этажных ячеек здания

Форма представления импульсной характеристики, определяющей реакцию (смещение) здания в пунктах наблюдения на заданное в виде единичного импульса воздействие приведена на рис. 3. Полученные импульсные характеристики образуют скоростной годограф, на котором хорошо видно распространение упругих волн по высоте здания (поперечных колебаний) от времени (красным и зеленым цветами окрашена фаза и противофаза волн). По сейсмограммам можно построить временной годограф и оценить скорость распространения поперечных колебаний по высоте здания. Невысокая величина скорости обусловлена распространением поперечной волны по каркасу здания.

В приложении «Динамические характеристики 2-й группы» приведены замещающие модели колебаний зданий, которые используются при решении обратной спектральной задачи по определению упругих характеристик строительной системы «здание – грунтовое основание» (упругие характеристики несущего каркаса здания и условия сопряжения фундаментов с грунтовым основанием).

В качестве замещающих моделей зданий рассматриваются модели изгибных, сдвиговых, изгибно-сдвиговых, продольных и крутильных колебаний консольной балки с равномерно распределённой массой и постоянного сечения, упруго закреплённой в опорном сечении относительно угловых и поперечных перемещений, а также модели изгибных, сдвиговых и продольных колебаний балки, лежащей на упругом полупространстве [6].

Результатом решения обратной спектральной задачи (определение упругих характеристик системы «здание/сооружение – грунт») по спектру частот собственных колебаний являются следующие параметры, характеризующие текущее техническое состояние обследуемого объекта:

- жёсткость поперечных сечений несущего каркаса здания прямому поперечному (простому) изгибу, поперечному сдвигу и сжатию-растяжению;
- жёсткость основания угловым (поворот), поперечным и вертикальным перемещениям.

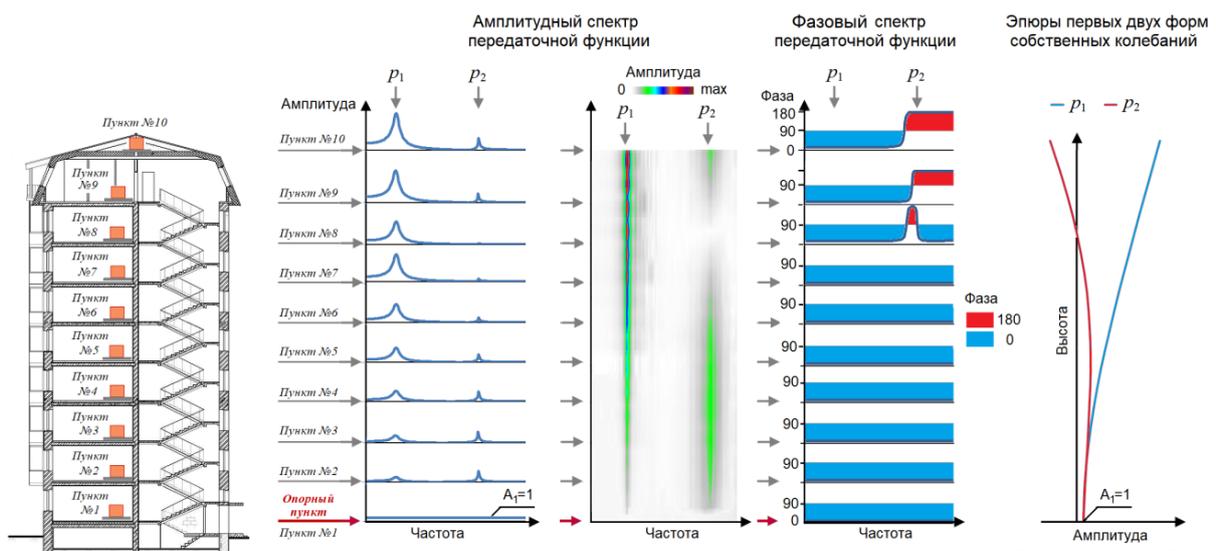


Рис. 2. Форма представления спектра передаточной функции и способ построения эпюр форм собственных колебаний здания

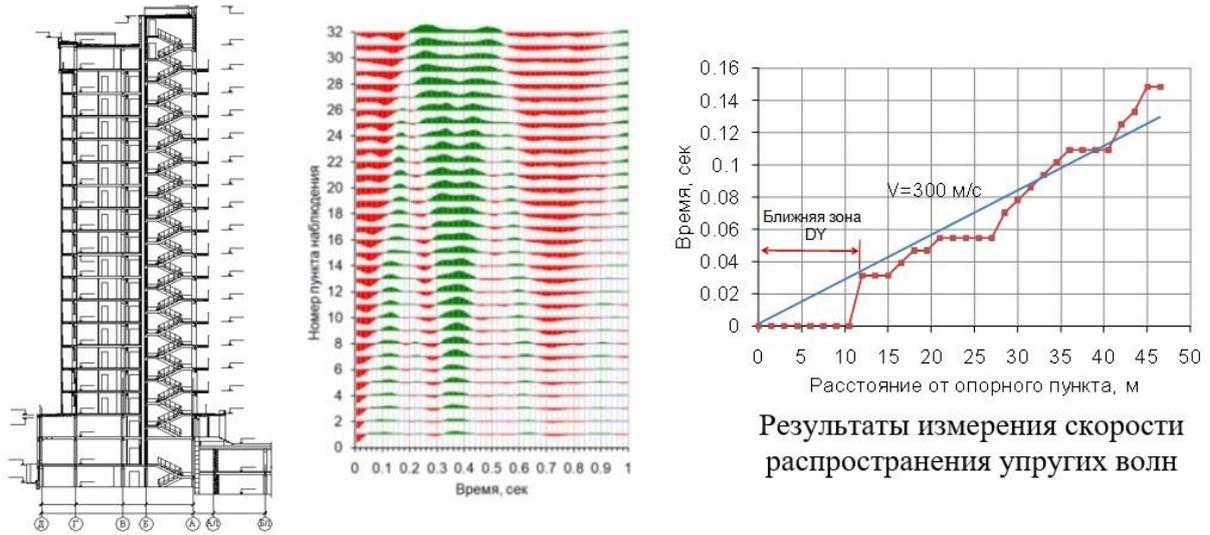


Рис. 3. Форма представления импульсной характеристики (годограф синтетических сейсмограмм)

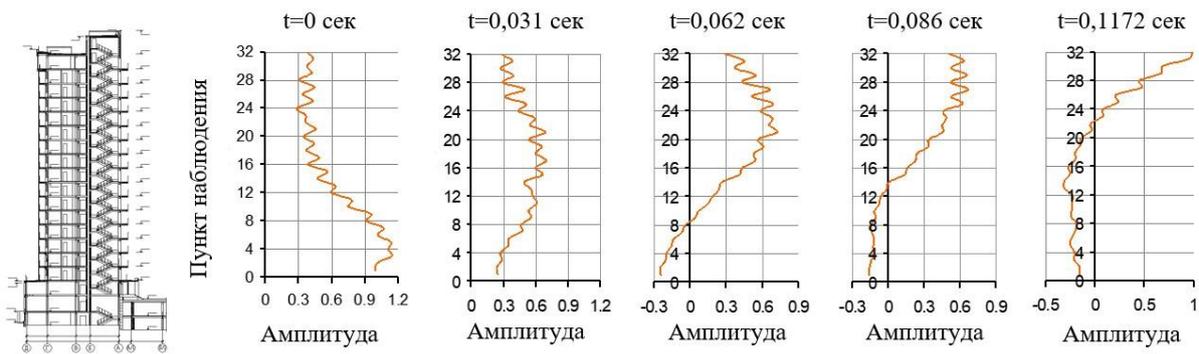


Рис. 4. Форма представления реакции здания на импульсное воздействие

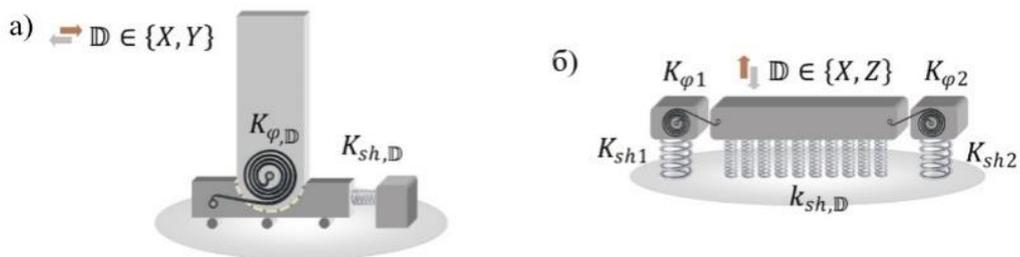


Рис. 5. Замещающие модели: а) модель изгибно-сдвиговых колебаний консольной балки, упруго закреплённой относительно угловых перемещений; б) модель сдвиговых колебаний балки, на упругом основании

Основные замещающие модели для расчёта упругих характеристик несущего каркаса здания и грунтового основания приведены на рис. 5 [6].

Приведены примеры расчёта упругих характеристик здания по спектрам частот и эпюрам форм собственных колебаний, результаты сравнения частот и эпюр форм собственных колебаний здания и замещающей модели, а также сравнение упругих характеристик несущего каркаса здания, полученных в результате решения обратной спектральной задачи, с проектными значениями.

В приложении «Динамические характеристики 3-й группы» приведены способы оценки смещений этажных ячеек здания при воздействии нормативной (расчётной) ветровой нагрузки, сейсмостойкости здания (смещения этажных ячеек здания при вероятном землетрясении, сценарий разрушения здания при сейсмическом воздействии), а также сроков эксплуатации конструкции до капитального ремонта и до аварийного состояния (остаточный ресурс несущей конструкции).

Определение динамических характеристик третьей группы производится по правилам теории сопротивления материалов с учётом предельных состояний. Расчёт динамических характеристик третьей группы производится на основании полученных значений динамических характеристик первой или второй групп.

Приведён пример определения динамических характеристик 3-й группы здания повышенной этажности и построения двух сценариев разрушения «ускорение основания – степень повреждения». В первом случае рассматривается сценарий «хрупкого» разрушения, когда принимается, что упругие характеристики каркаса здания остаются неизменными до момента достижения заданного предельного состояния. Во втором случае рассматривается сценарий, в котором учитывается снижение жёсткости каркаса здания за счёт накопления нарушений при сейсмическом воздействии.

В приложении «Схемы сейсмометрических обследований» приведена методика по определению мест расположения опорных пунктов, пунктов наблюдения и ориентации осей датчиков для обеспечения измерений необходимого количества динамических характеристик 1-й группы с заданной точностью в зависимости от типа обследования (экспресс, детальное, сплошное, мониторинг), конструктивного исполнения и формы плана типового этажа здания. Приведены примеры составления «дорожных карт» (последовательность действий и параметров регистрации при проведении сейсмометрических наблюдений).

В приложении «Обработка записей сейсмических событий» приведена последовательность обработки записей сейсмических событий и формы отчётности.

В приложении «Динамический паспорт здания» приведены формы для внесения технических и динамических характеристик обследуемого здания. Предполагается, что расширенные технические характеристики здания могут быть использованы не только при решении обратной спектральной задачи, но и для статистического анализа динамической работы однотипных зданий при различных условиях эксплуатации.

Заключение

Рекомендации устанавливают состав и порядок работ при проведении сейсмометрических обследований и мониторинга технического состояния эксплуатируемых, строящихся и законсервированных зданий всех видов (каркасных, панельных, крупноблочных, кирпичных и т.д.), преимущественно I и II классов.

Рекомендации предназначены для персонала эксплуатирующих организаций, контролирующего текущее техническое состояние зданий, проектных и научных организаций, разрабатывающих программы сейсмометрического мониторинга, регистрации землетрясений и оценивающих безопасность зданий различного назначения.

Литература

1. ГОСТ 34081-2017 Здания и сооружения. Определение параметров основного тона собственных колебаний.
2. ГОСТ 31937-2011 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.
3. Сабуров В.С., Кузьменко А.П. Обследование зданий повышенной этажности. Инженерно-сейсмометрический метод. LAMBERT Academic Publishing. - 2013. – 175 с.
4. Кузьменко А.П., Сабуров В.С. Обследование плотин гидроэлектростанций. Инженерно-сейсмометрический метод (часть 1). [Электронный ресурс]: Монография / ИВТ СО РАН. Новосибирск. - 2017. – 206 с.
5. Кузьменко А.П., Сабуров В.С. Идентификация форм собственных колебаний при сейсмометрическом обследовании и мониторинге плотин ГЭС//Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. - 2014. – Т.274. – С. 22 – 41.
6. Сабуров В.С., Кузьменко А.П. Частоты и формы собственных колебаний многопролетной балки. [Электронный ресурс]: Учебн. пособие по курсу «Динамика строительных конструкций и сооружений». Новосибирск. - 2019. – 140с.

Сведения об авторах

Кузьменко Александр Павлович – ст. научный сотрудник ФИЦ ИВТ, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 6, тел. +791394475442, e-mail: apkuzm@gmail.com

Сабуров Владимир Сергеевич – научный сотрудник. ФИЦ ИВТ, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 6, тел. +79134885570, e-mail: saburov58@yandex.ru

Короленко Дарья Борисовна – мл. научный сотрудник ФИЦ ИВТ, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 6, тел. +79994501295, e-mail: dbkoroenko@gmail.com

Короленко Леонид Александрович – мл. научный сотрудник ФИЦ ИВТ, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 6, тел. +79994518481, e-mail: lakoroenko@gmail.com

УДК 627.82:550.34

DOI: 10.36535/0869-4179-2021-04-6

ДЕТАЛЬНОЕ СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ НИЗКОНАПОРНЫХ ПЛОТИН ГЭС ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АССК

Р.В. Козлов
ООО НПП «ГЕОС»

Л.А. Короленко, кандидат техн. наук **А.П. Кузьменко**, **В.С. Сабуров**
Федеральный исследовательский центр информационных
и вычислительных технологий