

Опыт использования сейсмической регистрации вибраций от поездов для оценки состояния конструкций зданий и сооружений

Н. К. КАПУСТЯН^{1,2}, Г. Н. АНТОНОВСКАЯ², И. М. БАСАКИНА²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), Москва, 123242, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаврова Российской академии наук (ФГБН ФИЦКИА РАН), Архангельск, 163000, Россия

Аннотация. Любой вид транспорта является источником колебаний, которые через грунтовую среду передаются на расположенные вблизи магистралей сооружения, вызывая их вибрацию, приводя к изменению как технического состояния зданий, так и к ухудшению комфортности пребывания в них людей. Действующие в настоящее время нормативы (ГОСТ Р 52892–2007) для основных типов зданий регламентируют допустимые уровни вибрации в нескольких частотных диапазонах. Для оценки опасности вибрации для конкретного сооружения этого недостаточно, т. к. практически не учитывается состояние сооружения. Это особенно важно для архитектурных памятников, оказавшихся вблизи железных дорог. Необходимо оценить создаваемые вибрацией дополнительные напряжения в теле объекта и соотнести их с расчетным сопротивлением материала конструкции. Для этого можно рассматривать вибрации от поездов как одну из разновидностей сейсмических воздействий, используя разработанные в строительстве методы оценки этого влияния.

Широкое использование математического моделирования, в первую очередь создание конечноэлементных расчетных моделей зданий, дает возможность оценить распределение статических и динамических нагрузок в теле сооружения и тем самым выявить наиболее опасные для целостности зоны.

Ключевые слова: движение поезда; вибрации; акселерограмма; спектр; состояние сооружения; свойства грунтов; расчет воздействий

Введение. Действующие в настоящее время нормативы [1] для основных типов зданий регламентируют допустимые уровни вибрации в нескольких частотных диапазонах. В ряде случаев, прежде всего для исторических сооружений или сильно поврежденных конструкций, требуется более детальный анализ, учитывающий возможность резонанса при совпадении частот воздействия и собственных частот здания [2, 3].

Колебания, создаваемые при движении железнодорожного состава, передаются в грунт. По мере удаления на различное расстояние от полотна они неравномерно затухают с расстоянием, так как являются совокупностью сейсмических волн разных типов — объемных и поверхностных, ослабевающих с расстоянием по разным законам. Уровень колебаний

в точке наблюдения определяется интерференцией волн, кроме того, существенны деформационные свойства системы «дорожное полотно — грунт — фундамент — наземная конструкция». К ним относятся: физико-механические свойства и строение грунтов, наличие подземных вод, состояние фундамента, его сочленения со зданием и пр. Все это может привести к усилению или снижению отклика на вибрационные воздействия [4]. Существующие в настоящее время методы оценки (в основном компьютерное моделирование) преобразования внешних воздействий при переходе волн из грунта в тело сооружения требуют задания ряда коэффициентов, описывающих физико-механические свойства всей системы, в том числе зоны контакта сооружения с грунтами основания и пр. Учитывая, что существует достаточно много моделей задания грунтов, которые трудно выбрать заранее, одним из основных путей получения достоверной информации является выполнение специальных экспериментальных сейсмометрических исследований, как, например [3, 4, 5].

Экспериментальное использование методики

Описание объекта. Проработка методики обследования, которая включает строительные расчеты и сейсмометрические наблюдения, проводилась авторами для Спасо-Прилуцкого Димитриева монастыря в г. Вологде. Объектом исследования являлась монастырская стена XVII в. (прясло) в аварийном состоянии с отклонением от вертикали и рядом трещин, в том числе кулисообразных (рис. 1). Вдоль перпендикулярной к ней стены протекает р. Вологда, а на расстоянии порядка 170 м от обследуемого прясла расположено активно эксплуатирующееся полотно Северной железной дороги (рис. 2).

Помимо фундаментальной задачи развития новой инженерно-сейсмометрической методики обследования сооружения, практической целью проведенных работ было выяснить причины разрушения стены монастыря и оценить вклад вибрации от транспорта в ухудшение ее состояния.

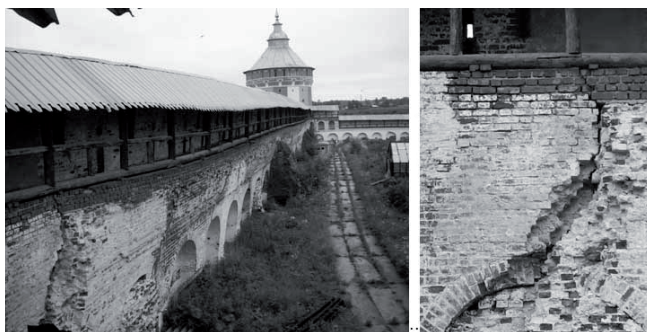


Рис. 1. Внешний вид прясла Спасо-Прилуцкого монастыря, г. Вологда

Fig. 1. A curtain wall of the Spaso-Prilutsk Monastery, Vologda



Рис. 2. Фото района проведения работ (<http://maps.google.ru/>)

Fig. 2. Photo of the work area (<http://maps.google.ru/>)

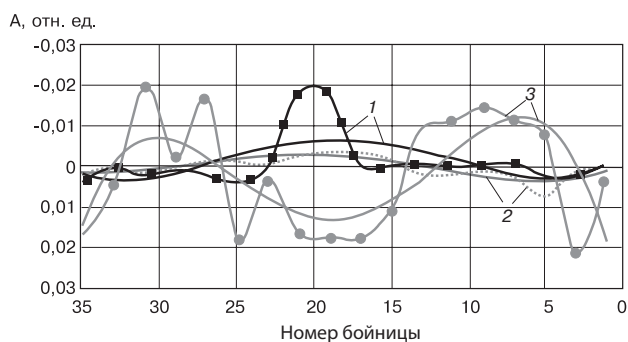


Рис. 3. Экспериментальные профили форм собственных колебаний на частотах: 1 — 0,58 Гц; 2 — 1,75 Гц; 3 — 3,5 Гц. Сплошные линии — полиномиальное сглаживание, прочие — профили форм колебаний по точкам наблюдения. Перемещения показаны в зависимости от номера бойницы (0–35), начиная от реки

Fig. 3. Experimental profiles of forms of own oscillations at frequencies: 1 — 0,58 Гц; 2 — 1,75 Гц; 3 — 3,5 Гц. Solid lines are polynomial smoothing, others are profiles of waveforms at observation points. The positioning is shown depending on the number of loopholes starting from the river

Комплекс обследования сооружения и грунтов основания включает ряд методик: инструментальные сейсмометрические наблюдения динамики объекта; малоглубинная сейсморазведка при обследовании грунтов оснований; задание расчетной схемы, расчет отклика модели на вибровоздействие. Наблюдения динамики сооружения выполнялись для оценки параметров, характеризующих движение точек объекта:

при собственных колебаниях и при различных внешних воздействиях [5–8], в данном случае — от поезда. Их определение является отображением состояния сооружения и необходимо для создания расчетной модели, наиболее приближенной к действительности. Такая модель дает возможность оценить вклад тех или иных воздействий на сооружение, в нашем случае — вибраций от железнодорожного транспорта, а также разработать те или иные реставрационные мероприятия.

При задании расчетной модели закладываются следующие параметры: геометрия сооружения, его конструктивная схема, способы закрепления в грунте и деформационные модули, прочностные характеристики стройматериалов, основные трещины и дефекты, статические нагрузки, действующие на сооружение.

Методика обследования и результаты проведения сейсмометрических исследований. Сейсмометрическая регистрация собственных колебаний и воздействий проводилась на прясле на верхнем уровне (галерее), в нижних бойницах и на грунте — вдоль стены, а также пройден профиль от железной дороги к стене и далее по территории монастыря. Применялось два типа сейсмометров: велосиметры СМ-3КВ (Россия) с портативной сейсмической станцией ADAS-3 (Россия) [9] и акселерометры CMG-5T фирмы Guralp (Великобритания) с регистратором GSR-24 фирмы GeoSIG (Швейцария) [10]. Наблюдения велись по компонентам X , Y , Z , ориентация горизонтальных компонент — вдоль и поперек стены соответственно. Длина прясла составляет 140 м, датчики ставились на галерею практически у каждой бойницы, т. е. с шагом 3,5 м. На полученных записях микросейсм интерпретировались собственные колебания стены и записи проходящих поездов (пассажирских, грузовых).

В соответствии с методикой анализа собственных колебаний [10, 11] в каждой точке наблюдений для каждой из частот были определены амплитуды и фазы колебаний и построены экспериментальные профили форм собственных колебаний (рис. 3). Эти кривые являются исходными для выбора модели из совокупности расчетных моделей, наиболее полно соответствующей эксперименту.

Анализ графиков, приведенных на рис. 3, показывает следующее:

- наблюдаются ненулевые перемещения конструкции в точках у башен (1 и 35 бойницы), причем наибольшие — для частоты 3,5 Гц, т. е. не для первых форм. Это говорит о том, что «раскрепление» прясла от башен не доходит до низа стены, что также соответствует видимым трещинам;

- формы колебаний имеют более изрезанный вид в левой части графика (бойницы 20–35), чем в правой (1–19), что говорит о большей целостности правой части прясла;

— на первой из наблюдаемой форм (частота 0,58 Гц) отчетливо просматриваются ворота, заложенные в настоящее время кирпичом (по признаку ослабления конструкции и возможности ей совершать большие перемещения).

Измерения воздействия вибраций от железнодорожного транспорта производились акселерометрами для получения реальной акселерограммы, которая затем задается в расчетную модель для определения дополнительных нагрузок при динамических воздействиях транспорта. Датчики колебаний устанавливались на прясле и на грунте. Анализ записей включает выявление природы сейсмических волн, возбуждаемых поездом. Во-первых, тип волны можно определить по траектории движения частиц грунта, второй признак — закон ослабления амплитуды сейсмических волн по мере удаления от источника. Для собственных частот колебаний стены 1,75 и 3,5 Гц выявлено следующее:

— вблизи источника (у железнодорожной насыпи) наблюдается смесь объемных и поверхностных волн, при удалении от него — в основном поверхностные волны, что подтверждается малым ослаблением амплитуды с расстоянием;

— на частоте 1,75 Гц возбуждение вибраций, по видимому, осуществляется горизонтальными воздействиями поезда на насыпь, на 3,5 Гц — вертикальными.

Обсуждение результатов. Рассмотрим более подробно, как реагируют участки стены на вибрации от поезда (рис. 4). Из рис. 4, а видно, что при прохождении поезда спектры мощности ускорений колебаний стены существенно различаются в ее верхних и в нижних частях.

В верхней части прясла нарастание амплитуд в соответствующем диапазоне частот указывает на большую «разбитость» (больше трещин и частоты ниже, т. е. трещины длиннее). Отношение спектров колебаний, записанных вверху и внизу стены (рис. 4, б), позволяют оценить частотные свойства конструкции — резонансные явления, ослабление колебаний и пр. Для центральной части стены резонансные частоты ниже, чем для краевой части (наблюдается усиление колебаний в диапазоне 3–4 Гц и ослабление на частотах 5–7 Гц). На рис. 5 показаны пространственные распределения ускорений колебаний в нижней части стены при воздействии микросейсм и вибрации от поезда для одной из собственных частот (1,75 Гц). В этом случае усиление мощности вибрации при прохождении поезда относительно уровня микросейсм получается больше — примерно в 200 раз, тем не менее абсолютные величины воздействий крайне малые — до $10^{-3} g$ (или 10^{-2} м/с^2), т. е. менее 2 баллов по шкале MSK-64. Амплитуды воздействий вдоль стены в горизонтальной плоскости изменяются мало, поэтому в расчете можно принять одинаковые жесткости закрепления в грунте. Ускорения по вертикали (и, следовательно, перемеще-

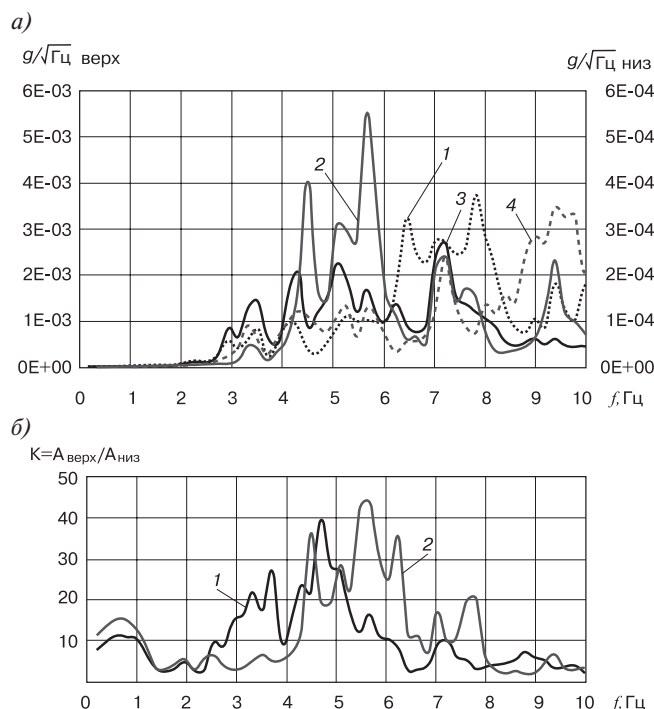


Рис. 4. Спектры мощности ускорений колебаний стены при прохождении поезда (а) и отношение спектров мощности верхней части стены к нижней (б) для поперечных компонент: 1 — центральная часть стены; 2 — край стены; 3 — верхняя часть стены; 4 — нижняя часть стены

Fig. 4. Power spectrum of wall vibrations acceleration when passing a train (а) and the ratio of the power spectrum of the upper part of the wall to the bottom (б) for the transverse components: 1 — the central part of the wall; 2 — edge of the wall; 3 — the upper part of the wall; 4 — lower part of the wall

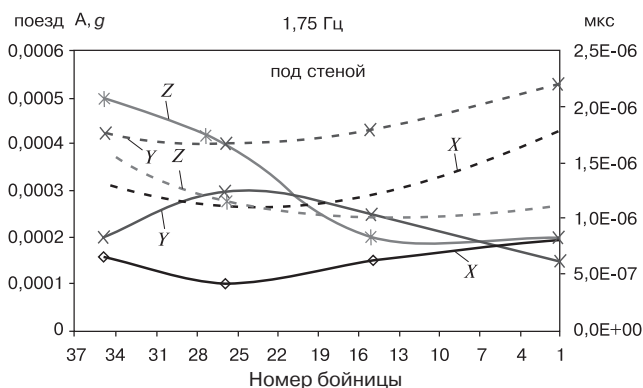


Рис. 5. Ускорения колебаний (в единицах g) в нижней части стены при воздействии микросейсм (пунктир) и при вибрации от поезда (сплошная), компоненты регистрации X, Y, Z, частота 1,75 Гц; вертикальные шкалы: правая — для микросейсм, левая — для колебаний от поезда

Fig. 5. Acceleration of oscillation (in units of g) in the lower part of the wall under the action of microseisms (dotted lines) and vibration from the train (solid), registration components X, Y, Z, frequency 1.75 Hz; vertical scales: right — for microseism, left — for oscillations from a train

ния) у левой башни примерно в два раза больше, чем у правой, что совпадает с предыдущим результатом и указывает на «оторванность» башни от прясла.

Типичная 3-компонентная акселерограмма, которая закладывалась в динамический расчет, и спектры мощности колебаний стены при прохождении поезда представлены на рис. 6.

Результаты инструментальных наблюдений определяют собственные частоты и формы колебаний прясла, отражающие его реальное состояние, что существенно для сопоставления и верификации расчетной модели. Еще одним важным параметром является связь сооружения с основанием, что определяется параметрами грунта.

Строение и свойства грунтового массива по данным малоглубинной сейсморазведки. Обследование грунтового массива проводилось с применением малоглубинной сейсморазведки методом преломленных волн (МПВ) по ряду профилей (рис. 7).

Первая преломляющая граница (средняя скорость от 400 до 500 м/с) отделяет техногенный слой и пески, она имеет ярко выраженный наклон к реке. Было получено пространственное распределение параметров

грунтов основания, существенных для задания в расчетной модели закрепления прясла в грунте: скорости продольных (V_p) и поперечных волн (V_s) для деформируемого слоя. Величины V_s были определены путем выделения на записях поверхностных волн, оценки их кажущейся скорости (V_R) и использования известного соотношения $V_R = 0,9V_s$. Отметим, что низкие скорости V_s характеризуют легкодеформируемый грунт. Последнее отражается в увеличении амплитуд колебаний сооружения при сейсмических (вибрационных) воздействиях, например, от железной дороги. Увеличение мощности низкоскоростных слоев дает возможность развития большей осадки сооружения. На рис. 8 представлены вариации скорости V_p по профилям вдоль стены: внутри монастыря и снаружи. Анализ результатов сейсморазведки показывает следующее. Мощность верхнего низкоскоростного культурного слоя увеличивается в сторону реки, что отражает геологию речной долины. В центральной части сооружения, в том числе под заложенными кирпичом воротами, мощность слоя также большая, чем по бокам, что, возможно, является следом «продавленной» дороги, над которой «нарос» низкоскоростной культурный слой. Средние скорости V_p с внутренней и внешней сторон стены различны, что обосновывает возможность крена стены.

Средние скорости V_p для внутренней стороны прясла указывают на более слабые грунты, причем наиболее явно — в левой части и вблизи погребенной дороги. Таким образом, с внутренней стороны прясла грунты более «слабые» по деформационным свойствам и можно ожидать большей осадки внутренней стороны стены. Вскрытие шурфа дало литологию слоев — это водонасыщенные пески и суглинки, техногенные отложения с песками и супесями, песчано-обломочные грунты. По отношениям V_s/V_p значения 0,3...0,6 соответствуют супесям и суглинкам, а 0,55...0,68 — пескам с галечником.

Наиболее полно методика расчета деформационно-прочностных характеристик грунтов описана в [4], где также для разных грунтов даны эмпирические соотношения между модулем деформации $E_{\text{деф}}$ и скоростями V_p , V_s , использованные в расчетах. Учитывая, что деформируемая толща под стеной может быть достаточно велика (до 10 м), по данным метода преломленных волн были рассчитаны средние скорости и интервал изменений $E_{\text{деф,ср}} = 17$ МПа, при вариациях значений $E_{\text{деф}} = 6–22$ МПа. При учете мощности деформируемого слоя получаем $E_{\text{деф}} = 59–80$ МПа.

Воспользовавшись эмпирическими соотношениями между $E_{\text{деф}}$ и E_d — динамическим модулем упругости [4], получаем возможные вариации $E_d = 20–1000$ МПа. Соотношение статического E_0 и динамического E_d модулей Юнга $E_d = 0,8E_0$ дает $E_0 = 25–1250$ МПа. Приведенная оценка показывает,

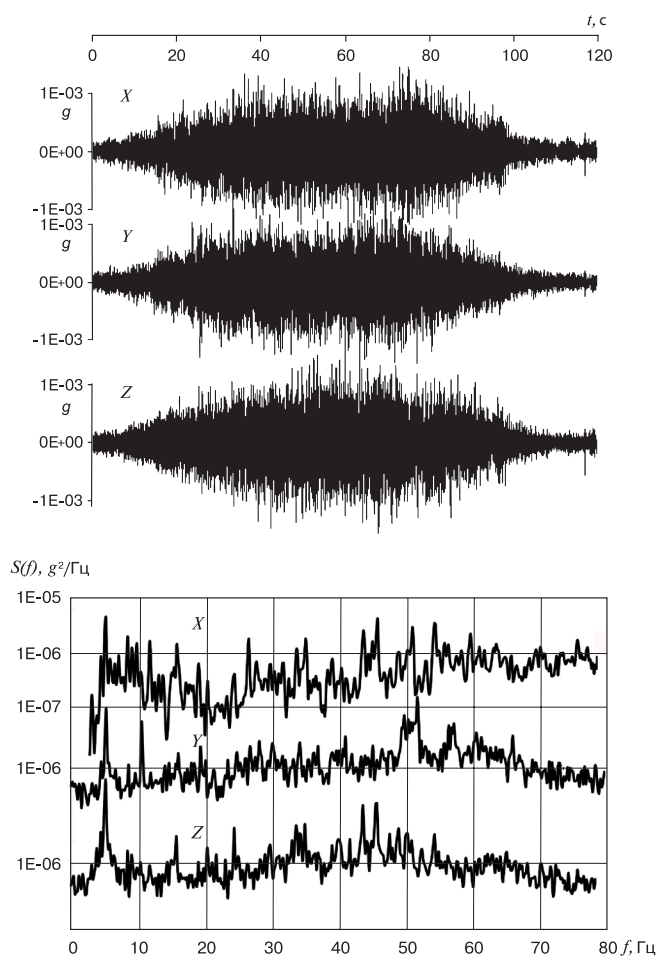


Рис. 6. Акселерограммы на грунте (вверху) и соответствующие им спектры мощности вибрации (внизу) от поезда по компонентам X, Y, Z

Fig. 6. Accelerograms on the ground (above) and the corresponding vibration power spectra (bottom) of the train along the components X, Y, Z

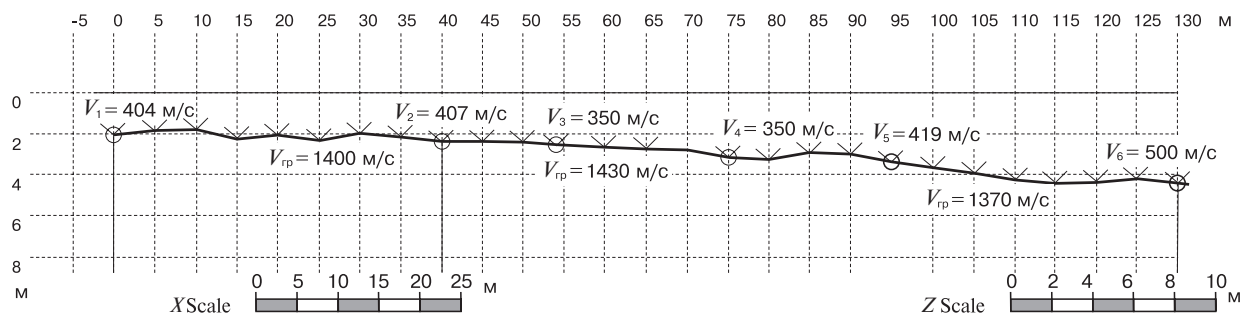


Рис. 7. Сейсмический разрез вдоль стены. По оси абсцисс — расстояние, м; по оси ординат — глубина, м; V_1-V_6 — средние скорости продольных волн в верхнем слое разреза; V_{rp} — граничная скорость преломленной волны на границе раздела двух сред
Fig. 7. Seismic cut along the wall. The abscissa is the distance, m; ordinate — depth, m; V_1-V_6 — average speeds of longitudinal waves in the upper layer of the cut; V_{rp} is the boundary speed of the refracted wave at the interface between the two media

что даже небольшое изменение скоростных свойств грунтов за счет обводнения может изменить их несущую способность до двух порядков.

Подбор расчетной модели осуществлялся в два этапа: сначала по материалам обмеров задавалась упрощенная модель, а затем более детальная. Принятые в расчете характеристики каменной кладки по СНиП II-22-81* [12]: $R_u = 0,9$ МПа — расчетное сопротивление сжатию; $R_t = 0,16$ МПа — расчетное сопротивление растяжению при изгибе по перевязанному сечению; $\alpha = 1000$ — упругая характеристика кладки; $E_0 = R_u \alpha = 900$ МПа — начальный модуль упругости; $E = 0,8E_0 = 720$ МПа — модуль упругости при определении периода собственных колебаний; $E = 0,5E_0 = 450$ МПа — модуль упругости при расчете по прочности; $G = 0,4E_0 = 360$ МПа — модуль сдвига; $\nu_n = 2,2$ — коэффициент ползучести; $\nu = 0,22$ — коэффициент поперечной деформации.

Подбор характеристик основания в модели уместно рассмотреть совместно с решением статической задачи, которая дает возможность оценить поля напряжений в теле объекта. Основной нагрузкой является вес сооружения. Мерой правильности подбора расчетной модели является совпадение значений собственных частот — расчетных и наблюдаемых, а также профилей перемещений точек тела при его собственных колебаниях. Расчет динамической задачи с применением вибрационных воздействий показывает, какие величины напряжений добавляют эти воздействия к уже имеющимся статическим. Суммарное напряжение сравнивается с расчетным сопротивлением материала, тем самым судят об опасности вибраций.

Современное состояние прясла — наклон, изгиб в средней части и пр., показывает, что изначально правильная конструкция претерпевала изменения, причем именно вследствие статических нагрузок. По опыту строительства [13] наиболее вероятной причиной современного состояния прясла является ослабление фундамента или нарушение свойств грунта основания. Мы попробовали смоделировать ситуа-

цию, приведшую прясло в современное состояние. Моделирование велось для упрощенной модели прясла, с внешней стороны стены задавались относительно плотные грунты (податливость основания по вертикали и горизонтали соответственно ($C_1 = 2$ МПа, $C_2 = 10$ МПа), а внутри — очень слабые, например, обводненные ($C_1 = 0,01$ МПа, $C_2 = 0,05$ МПа). Решение статической задачи дает правдоподобную картину: стена наклонилась в «нужном» направлении, причем на достаточно большой градус (2°). По существу, мы задали очень слабые грунты внутри стены для того, чтобы не рассматривать процесс ее деформирования во времени и достижения современного состояния наклона. Появление тангенциальных напряжений объясняет возникновение трещин вблизи башен, наблюдаемых сейчас.

Для более детальной модели с учетом башен при решении статической задачи была принята единая модель грунта для всего основания со следующими характеристиками: осредненный модуль упругости $E = 17$ МПа и коэффициент Пуассона грунта $\nu = 0,32$. В качестве основания в расчетной модели было выбрано упругое основание по Пастернаку, характеризующееся двумя коэффициентами постели

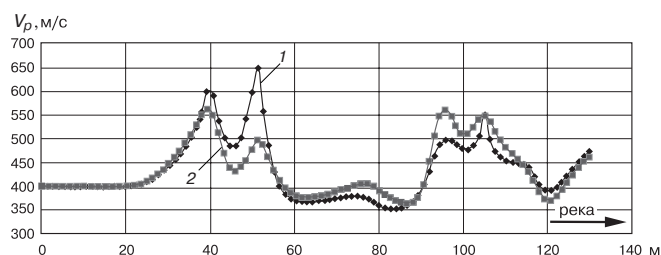


Рис. 8. Вариации скорости продольных волн (V_p) по профилям вдоль стены в сторону реки (внутри монастыря и снаружи): по оси X — расстояние, м; 1 — вариации скорости V_p с внутренней стороны стены монастыря; 2 — вариации скорости V_p с внешней стороны стены монастыря
Fig. 8. Variations in the speed of longitudinal waves (V_p) in profiles along the wall towards the river (inside the monastery and outside): along the X axis — distance, m; 1 — variations of the V_p speed from the inside of the monastery wall; 2 — variations of the V_p speed from the outside of the monastery wall

(податливость основания по вертикали и по горизонтали):

$$C_1 = \frac{0,138E}{1-\nu^2} = 2,61 \text{ МПа}; C_2 = 2C_1 = 5,22 \text{ МПа}.$$

Анализ решения статической задачи показывает, что причину возникновения трещин в стене следует искать в недостаточной несущей способности фундаментов сооружения.

Статический расчет дает также формы собственных колебаний для моделей: упрощенной, детальной и детальной с раскреплениями (трещинами у башен). Анализ показывает, что значительная детализация модели ненамного изменяет значения собственных частот (до 5%), более важным является ослабление закрепления (10% и более).

Рассмотрим деформацию стены от динамического воздействия при задании реальной акселерограммы от поезда на расчетную модель. Наиболее опасное направление динамического воздействия — вдоль оси Y (поперек стены). Расчет показывает, что динамический отклик системы распределяется следующим образом: 48,37% — составляющая по оси Y от первой формы; 24,13% — составляющая по оси Y от третьей формы; 6,04% — составляющая по оси Z от третьей формы. Максимальное перемещение, полученное в расчете в середине стены, равно 10 мкм (10^{-5} м) в центре прясла. Нагрузки, полученные в результате динамического расчета по трехкомпонентной акселерограмме, от воздействия проходящего поезда оказались достаточно малыми. Порядок усилий, полученных в стене, составляет $10^{-2} \dots 10^{-3}$ Па, что значительно меньше нагрузок от собственного веса конструкций и временных нагрузок. Из этого следует, что вибрации от поезда не могут быть основной причиной разрушения прясла. Более того, в данном случае они не оказывают воздействия, способного приводить к разрушению прясла даже на длительном интервале времени воздействия.

Выводы. Применение новой инженерно-сейсмометрической методики на практике позволило провести детальное обследование исторического сооружения и выяснить причины ухудшения состояния его конструкций. Методика является инновационной по следующим признакам. Во-первых, она объединяет в единый комплекс подходы прикладной геофизики и строительных наук при равнозначности каждого из них. Во-вторых, используются современные методики расчетов и наблюдений, в том числе оригинальные. Существенно, что в качестве тестовых воздействий используются слабые сейсмические сигналы от движущихся поездов, что перспективно, учитывая соседство железных дорог и сооружений разного назначения. Важно также, что представленные схемы

наблюдений могут быть использованы и для оценки состояния сооружений, входящих в железнодорожный комплекс (мосты, здания вокзалов и пр.).

Практическим результатом проведенного обследования прясла Спасо-Прилуцкого монастыря является экспертное заключение о безопасности вибраций от поездов и отказ от дорогостоящих работ по установке виброзащиты.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект № 17-20-02119.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 52892–2007. Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибраций и ее воздействий на конструкцию. М.: Стандартинформ, 2008. 16 с.
2. Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Рогожин Е.А. Сейсмический мониторинг промышленных объектов: проблемы и пути решения // Сейсмические приборы. 2015. Т. 51. № 1. С. 5–15.
3. Сейсмометрический мониторинг технического состояния несущих строительных конструкций зданий и сооружений по динамическим характеристикам / Е.П. Золотухин [и др.] // Вычислительные технологии. Специальный выпуск. 2013. Т. 18. С. 29–36.
4. Аникин О.П., Горшенин Ю.В., Козлов А.М. Методические рекомендации по определению состава, состояния и свойств грунтов сейсмоакустическими методами. М.: ЦНИИС Минтрансстроя СССР, 1985. 65 с.
5. Gallipoli M., Mucciarelli M., Vona M. Empirical estimate of fundamental frequencies and damping for Italian buildings // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2009. Vol. 38, no. 8. P. 973–988.
6. Ditommaso R., Vona M., Gallipoli M., Mucciarelli M. Evaluation and considerations about fundamental periods of damaged reinforced concrete buildings // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2013. Vol. 13, no. 7. P. 1903–1912.
7. Mivehchi M.R., Ahmadi M.T., Hajmomeni A. Effective Techniques for Arch Dam Ambient Vibration Test: Application on Two Iranian Dams. JSEE. 2003. no. 5 (2). P. 23–34.
8. Snieder R., Şafak E. Extracting the building response using seismic interferometry: theory and application to the Millikan Library in Pasadena, California // Bulletin of the Seismological Society of America. 2006. Vol. 96, no. 2. P. 586–598.
9. Antonovskaya G.N., Kapustyan N.K., Moshkunov A.I., Danilov A.V. Seismic network solution for HPP turbine operation monitoring. International Journal on Hydropower & Dams. 2016. Issue 6. P. 52–56.
10. Сейсмологические исследования в арктических и приарктических регионах / под ред. чл.-корр. Ф. Н. Юдахина. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 244 с.
11. 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.
12. СНиП II-22-81* Каменные и армокаменные конструкции / Госстрой России. М.: ФГУП ЦПП, 2004. 64 с.
13. Пашкин Е.М. Инженерная геология: учеб. пособие. М.: Архитектура, 2005. 264 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

КАПУСТЯН Наталия Константиновна,
д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник,
ФГБУН ФИЦКИА РАН

АНТОНОВСКАЯ Галина Николаевна,
канд. техн. наук, руководитель научно-образовательного центра «МПТО-Арктика»,
заведующий лабораторией сейсмологии,
ФГБУН ФИЦКИА РАН

БАСАКИНА Ирина Михайловна,
канд. техн. наук, научный сотрудник, ФГБУН ФИЦКИА РАН

Статья поступила в редакцию 26.05.2017 г., принята к публикации 03.08.2017 г.

Experience in the use of seismic recording of vibrations from trains to evaluate the condition of buildings and structures

N. K. KAPUSTYAN^{1,2}, G. N. ANTONOVSKAYA², I. M. BASAKINA²

¹ Federal State Budgetary Institution of Science "Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences" (IPE RAS), Moscow, 123242, Russia

² Federal State Budgetary Institution of Science "N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research" (FGBUN FITsKIA RAS), Arkhangelsk, 163000, Russia

Abstract. Constructions along railway traffic lines are always exposed to vibrations generated by the passing transport. This sometimes leads to shifts in their state even threatening the comfort of the people that stay here. To estimate the magnitude of such effect one needs the frequency-amplitude chart of impacting vibrations. Current codes [1] are applied to the main types of buildings and state the acceptable level of magnitudes in wide frequency ranges. However, the code's regulations are not enough to ensure the building's stability as the real state of this building is not taken into account. This is especially true for the historical buildings near railroads. Majority of these are cult-related and are mostly damaged and need renovation. To correctly estimate an impact of vibrations one needs to measure additional tensions due to vibration in the construction's body and to compare them with ones resistance material calculations. In other words, seismic vibrations emitted by trains act as a seismic signal, for which there are several established methods of evaluation. Finite elements simulations enables estimation of the distribution of static and dynamic loads so that the most vulnerable locations in the construction's body are identified. Consequently the simulation can use experimentally recorded waves (spectra or accelerograms) as the dynamic load. With the simulation stage set different model types are cycled until the satisfactory match is obtained as is shown in the paper. Importantly, we demonstrate how construction evaluation methods can be combined with applied seismic methods, which are being actively developed for the needs of soil and construction integrity evaluations.

Keywords: train motion; vibrations; accelerogram; spectrum; construction state; grounds properties; impact modelling

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-5-281-287>

REFERENCES

1. GOST R 52892–2007. *Vibration and shock. Vibration of buildings. Measurement of vibrations and its effects on the structure*. Moscow, Standartinform Publ., 2008, 16 p. (in Russ.).
2. Antonovskaya G. N., Kapustyan N. K., Rogozhin E. A. *Seismicheskiy monitoring promyshlennykh ob'ektov: problemy i puti resheniya* [Seismic monitoring of industrial facilities: problems and solutions]. *Seismicheskiye pribory* [Seismic devices], 2015, Vol. 51, no. 1, pp. 5–15.
3. Zolotukhin E. P., Kuz'menko A. P., Saburov V. S., Korolenko D. B., Neskorochev V. D. *Seismometricheskiiy monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya nesushchikh stroitel'nykh konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy po dinamicheskim kharakteristikam* [Seismometric monitoring of technical condition of load-bearing constructions of buildings and structures by dynamic characteristics]. *Vychislitel'nye tekhnologii. Spetsial'nyy vyp.* [Computational technologies. Special issue], 2013, Vol. 18, pp. 29–36.
4. Anikin O. P., Gorshenin Yu. V., Kozlov A. M. *Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu sostava, sostoyaniya i svoystv grun-*

tov seysmoakusticheskimi metodami [Methodical recommendations for determining the composition, condition and properties of soils by seismo-acoustic methods]. Moscow, TsNIIS Mintransstroya SSSR Publ., 1985, 65 p.

5. Gallipoli M., Mucciarelli M., Vona M. *Empirical estimate of fundamental frequencies and damping for Italian buildings*. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2009, Vol. 38, no. 8, pp. 973–988.

6. Ditommaso R., Vona M., Gallipoli M., Mucciarelli M. *Evaluation and considerations about fundamental periods of damaged reinforced concrete buildings*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2013, Vol. 13, no. 7, pp. 1903–1912.

7. Mivehchi M. R., Ahmadi M. T., Hajmomeni A. *Effective Techniques for Arch Dam Ambient Vibration Test: Application on Two Iranian Dams*. *JSEE*, 2003, no. 5 (2), pp. 23–34.

8. Snieder R., Şafak E. *Extracting the building response using seismic interferometry: theory and application to the Millikan Library in Pasadena, California*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006, Vol. 96, no. 2, pp. 586–598.

9. Antonovskaya G. N., Kapustyan N. K., Moshkunov A. I., Danilov A. V. *Seismic network solution for HPP turbine operation monitoring*. *International Journal on Hydropower & Dams*, 2016, Issue 6, pp. 52–56.

10. Yudakhin F. N., Antonovskaya G. N., Asming V. E., Baranov S. V. *Seysmologicheskie issledovaniya v arkticheskikh i priarkhticheskikh regionakh* [Seismological research in the Arctic and near-Arctic regions]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2007, 244 p.

11. Yudakhin F. N., Kapustyan N. K., Antonovskaya G. N. *Inzhenerno-seysmicheskie issledovaniya geologicheskoy sredy i stroitel'nykh konstruktsiy s ispol'zovaniem vetrovykh kolebaniy zdaniy* [Engineering seismic studies of the geological environment and building structures using wind turbines of buildings]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2007, 156 p.

12. SNiP II-22-81* *Stone and reinforced structures*. Gosstroy of Russia. FGUP TsPP Publ., 2004, 64 p. (in Russ.).

13. Pashkin E. M. *Inzhenernaya geologiya: ucheb. posobie* [Engineering Geology: A Training Manual]. Moscow, Arkhitektura Publ., 2005, 264 p.

ABOUT THE AUTHORS

Nataliya K. KAPUSTYAN,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, FGBUN FITsKIA RAS

Galina N. ANTONOVSKAYA,
Cand. Sci. (Eng.), Head of the Scientific and Educational Center "MPOT-Arktika", Head of the laboratory of seismology, FGBUN FITsKIA RAS

Irina M. BASAKINA,
Cand. Sci. (Eng.), Researcher, FGBUN FITsKIA RAS

Received 26.05.2017

Accepted 03.08.2017

■ E-mail: nkapustian@gmail.com (N. K. Kapustyan)