ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ НАГРУЗОК НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЕ ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ*

ВОЛКОВ В.А., Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук, старший научный сотрудник, ВЛАДОВ М.Л., Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, докт. физ.-мат. наук, КАЛИНИНА А.В., Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук, канд. физ.-мат. наук, АММОСОВ С.М., Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук, ГРАМИНОВСКИЙ Н.А., ОАО «Мосгипротранс», главный специалист, КАПУСТИН В.В., Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, канд. физ.-мат. наук, МАРЧЕНКОВ А.Ю., Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, канд. физ.-мат. наук

В первой части статьи была поставлена задача описания вибрационных измерений в зоне влияния пути для оценки воздействий на здания и сооружения от подвижного состава, представлены подходы авторов к решению этой задачи, приведены примеры полевых записей и обсуждались приемы их обработки (в частности, был сделан выбор в пользу спектрального оценивания по методу Уолша).

Во второй части статьи приводятся и обсуждаются результаты обработки полевых измерений, делаются выводы о проделанной работе.

На рис. 4 представлен графический пример для обеих схем вычисления спектральной амплитуды. Сплошной линией показана периодограмма Уолша, прерывистой (зеленой) — Фурье, красными кружками — автоматически выделенные частоты наиболее мощных колебаний.

Средневзвешенную частоту определяли как среднее по ряду $R_i = F_{k,1+N_k}$, где k — индекс выделенной частоты F_k ; N_k — число, пропорциональное спектральной амплитуде на этой частоте. Таким образом, в ряде R значений частоты F_k тем больше, чем большая спектральная амплитуда ей соответствует.

Расчет коэффициента затухания вибрационных колебаний при наблюдениях на сейсмических профилях проводили для оценки изменения амплитуды сигнала по мере удаления от источника. При распространении в массиве грунта амплитуда вибросигнала, как правило, уменьшается по экспоненциальному закону. Логарифмический декремент затухания определяется логарифмом отношения амплитуд в данный момент времени и через промежуток времени в период колебания.

Коэффициент β пространственного затухания сигнала (т.е. в зависимости от расстояния до источника) на каждом сейсмическом профиле находили по формуле

 $\beta = (\ln(A_{_{l}}/A_{_{2}}))/l,$ где $A_{_{l}}, A_{_{2}}$ — амплитуда соответственно началь-

*Окончание. Начало в № 7 за 2019 г.

ной и конечной виброскорости; 1 — расстояние между сейсмоприемниками.

На рис. 5 в качестве примера представлены точки определения интенсивности колебаний по одному из профилей (створов), перпендикулярных



Рис. 4. Пример расчета спектров по записи колебаний от проходящего транспорта на точке: а — ближней к пути; б — дальней от пути



Рис. 5. Пример затухания интенсивности колебаний (в условных баллах)

пути. Аппроксимация отрезком прямой дает плохие результаты, что косвенно подтверждает экспоненциальный характер затухания колебаний.

При использовании для обработки полученных записей колебаний от проходящих поездов программного комплекса «Вибро-ВН» для дальнейшего анализа могут быть получены перечисленные ранее характеристики записи и некоторые дополнительные параметры в автоматическом режиме.

Анализируя годографы полного вектора колебаний в вертикальной плоскости ZX, где ось X перпендикулярна пути, и в горизонтальной плоскости XY, можно сделать вывод, подтверждающий априорные предположения от том, что волны вибрации от движущегося состава представляют собой поверхностные волны рэлеевского типа.

Вопрос о том, какие параметры при расчете реакции зданий и сооружений на внешнее вибровоздействие следует учитывать в первую очередь, до настоящего времени не имеет однозначного ответа. При этом амплитуда колебаний является не единственным фактором, определяющим степень возможного повреждения (или разрушения) конкретного объекта. Существующее соотношение между амплитудой ускорений и сейсмической интенсивностью (балльностью) для шкалы MSK-64, используемое, например, в СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах», весьма приблизительно. Главный недостаток заключается в том, что удовлетворительное соответствие между ними относится к значениям интенсивности 6 баллов и выше, а при меньших значениях ошибки могут быть существенными.

При расчетах значений сейсмической интенсивности от такого источника, как движущийся состав, значимым параметром, во многом определяющим конечный результат, является промежуток времени, в течение которого амплитуда ускорений в ближней зоне от источника близка к максимальным (пиковым) значениям. Поэтому для расчетов была выбрана формула, предложенная в работе [5], посвященной новой инструментальной шкале сейсмической интенсивности, которая учитывает длительность воздействия с амплитудой ускорения, близкой к максимальной:

$$I = 2,0 \lg(A^2)d + 1,95,$$

где A — пиковое значение амплитуды виброускорения, см/с²; d — интервал воздействия, с.

Длина составов, от которых регистрировались виброколебания (электрички старого образца, электропоезда типа «Ласточка», «Стриж», «РЭКС» и поезда дальнего следования), составляет 240—280 м. Будем считать, что амплитуды ускорений, близкие к максимальным, наблюдаются во время прохождения состава мимо исследуемого объекта, т.е. время, за которое поезд проходит расстояние, равное своей длине. Тогда при скорости 60—80 км/ч это время составит в среднем 15 с. Полагая, что в течение этого промежутка амплитуды ускорений близки к пиковым, можно использовать указанное значение временного интервала при расчетах сейсмической интенсивности в месте проведения измерений.

Результаты расчетов по каждому сейсмическому профилю (створу) могут быть представлены в виде карты балльности в полосе влияния вдоль пути (рис. 6).

Изменение параметров пространственного затухания сейсмической интенсивности по мере удаления от железнодорожной линии определяется передаточными свойствами грунтового массива, а также демпфирующими свойствами системы «верхнее строение пути—насыпь—грунтовый массив», которые в общем случае могут отличаться для разных типов составов.

Частотные спектры регистрируемых колебаний от новых электропоездов и электричек старого образца мало отличаются друг от друга и находятся в диапазоне 6—11 Гц. Для скоростных поездов дальнего следования преобладают частоты 10—15 Гц. При этом какой-либо явной зависимости преобладающей частоты колебаний от скорости движения поезда в диапазоне от 40 до 80 км/ч не выявлено. Возможно, что сдвиг спектра в сторону высоких частот (до 40—43 Гц), отмеченный при измерении колебаний от скоростного электропоезда «Сапсан» (в районе станции Крюково Октябрьской дороги), начинается с некоторой пороговой скорости, которая существенно больше, чем пределы диапазона скоростей, указанные ранее.

Для любой оценки воздействия на здания и сооружения (будь то оценка воздействия в геотехническом, инженерном, смысле или оценка воздействия на людей в зданиях и сооружениях) необходимы параметры вибраций. Поэтому методика измерений вибраций на зданиях и сооружениях также является предметом обсуждения.

Вибросигналы от нескольких поездов измеряли в Москве на фундаменте (первом этаже) и верхнем этаже зданий либо только на фундаменте (при невозможности проведения измерений на верхнем этаже по техническим причинам).

Кроме того, для определения затухания вибраций непосредственно около зданий на грунте вблизи железнодорожного полотна и на фундаменте устанавливали сейсмоприемники.

Результаты измерений и расчетов для каждого конкретного объекта включали в себя следующие параметры: пиковые значения виброскорости и виброускорения для трех компонент и полного вектора сигнала, преобладающую и средневзвешенную частоты колебаний, расчетную интенсивность в баллах.

Диапазон значений преобладающих частот для всех исследуемых объектов находился в интервале 2—15 Гц, что немного меньше значений, полученных при измерениях на грунте. Это обусловлено бо́льшим затуханием высокочастотной части спектра на жестких основаниях зданий и сооружений.

Средние значения сейсмической интенсивности, полученные на фундаментах большинства зданий, в целом соответствуют значениям, рассчитанным для аналогичных расстояний в грунте. На удалении 15—30 м сейсмическая интенсивность на фундаментах составляла 1,5—2,5 балла. При этом на верхних этажах значения интенсивности могли превышать значения, рассчитанные для первого этажа здания или его фундамента. Например, для административного здания, расположенного на ул. Новая Басманная, д. 9, максимальные значения интенсивности для первого и третьего этажей составляли соответственно 2,05 и 2,77 балла.

Максимальные значения для верхних этажей зданий получены для многоквартирного жилого дома по ул. Новая Басманная, д. 10, стр. 1 при прохождении электропоезда «Ласточка» (3,25 балла на шестом этаже здания), а также для объекта «дом деревянный нежилой» в Нижнем Сусальном переулке, д. 6, стр. 4 (3,82 балла на втором этаже здания, а на фундаменте — 4,2 балла). Кроме того, высокие значения получены для нежилых производственных помещений (гаражи, склады), расположенных в непосредственной близости от путей. Для многоквартирного жилого дома на vл. Казакова. д. 8, стр. 6 максимальное значение сейсмической интенсивности на пятом этаже здания составило 2,34 балла (на фундаменте — 1,62 балла). При этом точка, в которой проводили измерения в этом здании, находилась на расстоянии 42 м от железнодо-



Расстояние от путей



рожного полотна.

В то же время для некоторых объектов значения интенсивности на фундаменте превышали таковые на верхних этажах. По всей видимости, распределение вибрационных нагрузок зависит от конструктивных особенностей каждого конкретного сооружения, типа материалов, конструкции фундамента и т.д.

Выводы

1. Преобладающие частоты вибраций, зарегистрированные в грунтовых условиях на расстояниях 5—50 м от железнодорожного полотна для электропоездов типа «Стриж», «Ласточка», «Спутник», «РЭКС», а также электричек старого образца, находились в диапазоне 6—13 Гц, а для скоростных поездов дальнего следования — 10—15 Гц.

 Максимальные значения интенсивности на исследуемом участке зафиксированы от проходящего поезда дальнего следования в ближней зоне (5 м) от железнодорожного полотна и составляли 6,4 балла по инструментальной шкале сейсмической интенсивности. Среднее значение интенсивности для большинства зарегистрированных поездов в ближней зоне (5—10 м) составляло 3,5—4,5 балла. На расстоянии 50 м значения интенсивности, как правило, не превышали 1—1,5 балла.

3. Значимого изменения преобладающих частот колебаний при изменении скоростного режима железнодорожного состава в интервале от 40 до 80 км/ч не обнаружено.

4. На основании полученных результатов построена карта изменения интенсивности для всего участка трассы Москва—Казань—Екатеринбург, от -4 до 33 км, в 50-метровой зоне от железнодорожного полотна. На всех этапах вычислений применялся консервативный подход, т.е. во всех случаях при построении карты использовались максимальные значения, полученные на каждом профиле.

5. Максимальные интенсивности, зарегистрированные на верхних этажах зданий, находящихся в 50-метровой зоне от путей, составляли 3—4 балла по инструментальной шкале.

6. Можно предположить, что при увеличении скорости движения поездов по участку высокоскоростной магистрали амплитуды виброколебаний будут увеличиваться. Возможно также, что, начиная с некоторой пороговой скорости, спектр сигналов будет сдвигаться в сторону высоких частот. При этом необходимо учитывать, что при увеличении скорости пропорционально уменьшается время максимального воздействия на здание, и расчетная интенсивность может немного снижаться. Учитывая эти факторы, следует предположить, что движение на данном участке трассы высокоскоростных поездов приведет к увеличению значений интенсивности не более чем на 1 балл.

Список источников

1. Аптикаев Ф. Ф. Проект Национального стандарта «Российская сейсмическая школа РСШ-10» // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2003. № 5. С. 31—33.

2. Проект Российской сейсмической шкалы // Инженерные изыскания. 2011. № 10. С. 62–71.

3. Проект Российской сейсмической шкалы (Ч. 2) // Инженерные изыскания. 2011. № 11. С. 86-92.

4. Оценка сейсмических воздействий при строительстве особо ответственных объектов в Санкт-Петербурге / Ф.Ф. Аптикаев, О.К. Воронков, Г.А. Моторин, А.А. Никонов,

О.О. Эртелева // Инженерные изыскания. 2011. № 10. С. 4—18.
Аптикаев Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмиче-

ской интенсивности. М.: Наука и образование, 2012. 175 с.

6. Аптикаев Ф.Ф., Эртелева О.О. «Большая» сейсмология вводит инженеров в заблуждение // Инженерная сейсмология. 2014. № 2. С. 42-46.

7. Аптикаев Ф.Ф., Эртелева О.О. Российская сейсмическая шкала нового поколения // Вопросы инженерной сейсмологии. 2016. Т.43. № 2. С. 42–52.

8. ГОСТ Р 57546-2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. Введ. 01.09.2017. М.: Стандартинформ, 2017. 32 с.

9. СНиП II-7-81 (СП 14.133330.2010). Строительство в сейсмических районах (с изменениями и дополнениями). Введ. 01.01.1982. Изм. 01.01.2000. М., 2000.

10. СП 14.133330.2014. Строительство в сейсмических районах. СНиП II-7-81* (актуализированного СНиП II-7-81*. «Строительство в сейсмических районах» (СП 14.133330.2011)) (С изменением № 1). Введ. 01.06.2015. Изм. 23.11.2015. М.: Минстрой России, ФЦС, 2015.

11. Детальное сейсмическое районирование и сейсмомикрорайонирование для территориального планирования: проект СП. М.: Минстрой России, 2017. 32 с.

12. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах.

13. Zetlab: официальный сайт. URL: www.zetlab.com (дата обращения 15.01.2019).

14. Логис-Геотех: официальный сайт. URL: www. geotech.ru (дата обращения 15.01.2019).

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ НАГРУЗОК ОТ ПРОХОДЯЩИХ ПОЕЗДОВ НА БЛИЖНИЕ К ПУТИ ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Ключевые слова: вибрационные измерения, виброскорость, акселерометр, ускорения, затухание, сейсмоприемник, сейсмическая шкала.

Волков Виктор Александрович — старший научный сотрудник Института физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук. Москва, Россия. E-mail: vav_volkov@mail.ru

Владов Михаил Львович — докт. физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой сейсмометрии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Москва, Россия. E-mail: vladov_ml@mail.ru

Калинина Анна Викторовна — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Института физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук. Москва, Россия. E-mail: kalinina_av@mail.ru

Аммосов Сергей Михайлович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Института физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук. Москва, Россия. E-mail: ammosovser@mail.ru

Граминовский Николай Александрович — главный специалист АО «Мосгипротранс». Москва, Россия. E-mail: vav_volkov@mail.ru Капустин Владимир Викторович — канд. физ.-мат. наук, младший на-

Капустин Владимир Викторович — канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Москва, Россия. E-mail: 1391854@mail.ru

THE IMPACT OF VIBRATION LOADS ON RAILWAY BUILDINGS AND STRUCTURES

Keywords: vibration measurements, vibration velocity, accelerometer, acceleration, attenuation, seismic receiver, seismic scale.

Volkov Viktor — senior researcher of the Institute of Physics of the Earth of the RAS. Moscow, Russia. E-mail: vav_volkov@mail.ru

Vladov Mikhail – Dr.Sci. of physics and mathematics, professor, head of the Department of seismometry and geoacoustics of the geological faculty of Lomonosov Moscow state University. Moscow, Russia. E-mail: vladov_ml@mail.ru

Kalinina Anna — Ph.D. (Physics and Mathematics), leading researcher of the Institute of Physics of the Earth of the RAS. Moscow, Russia. E-mail: kalinina av@mail.ru

Ammosov Sergei – Ph.D. (Physics and Mathematics), senior researcher of the Institute of Physics of the Earth of the RAS. Moscow, Russia. E-mail: ammosovser@mail.ru

Graminovskiy Nikolay – chief specialist AO «MOSGIPROTRANS». Moscow, Russia. E-mail: vav_volkov@mail.ru

Kapustin Vladimir — Ph.D. (Physics and Mathematics), junior researcher, the Department of seismometers and geoacoustics of the geological faculty of MSU named after M. V. Lomonosov. Moscow, Russia. E-mail: 1391854@mail.ru