

Н.Н. РУБАН, научный сотрудник, Национальный горный университет

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ОТ ТРАНСПОРТНЫХ ИСТОЧНИКОВ В УСЛОВИЯХ Г. ДНЕПРОПЕТРОВСКА

Рассматривается проблема негативного влияния динамических воздействий на геологическую среду в условиях плотной городской застройки. Приводятся примеры техногенных источников динамических воздействий и параметры создаваемой ими вибрации. Приведены возможные негативные последствия динамического воздействия на грунты. Уделяется внимание динамическим воздействиям, создаваемым движением транспорта, а также факторы, влияющие на интенсивность этих воздействий. Рассматривается система «источник воздействия – путь распространения – объект воздействия». Выполнен анализ литературных источников и нормативных документов относительно параметров вибрации, создаваемых техногенными источниками, обоснована необходимость получения экспериментальным путем дополнительных данных о динамических воздействиях от движущегося транспорта на окружающий источник массив грунта. Приведена методика измерения вибрации с помощью прибора VM6360 в условиях г. Днепропетровск. Проведены дополнительные экспериментальные исследования в пределах города Днепропетровска с целью выявления доминирующих диапазонов параметров вибрации и последующего анализа свойств грунтов, подверженных этим воздействиям. Сделан вывод о значительном превышении экспериментально установленного уровня вибрации над данными, приведенными в литературе. В заключение, предлагаются причины актуализации рассматриваемой проблемы и пути дальнейших направлений исследований.

**Ключевые слова:** динамические нагрузки, вибрация, виброметр VM6360, виброускорение.

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Территория любого крупного города является своеобразным очагом техногенных динамических нагрузок в силу наложения волн напряжений от транспортных источников, строительного и промышленного оборудования, проведения взрывных работ и т.п. По данным [1] они генерируют в пределах города колебания с частотами от 2-5 до 60-70 Гц, иногда до 200 Гц. Основной вклад в это постоянно существующее и меняющееся в течение суток «вибрационное поле» вносит движущийся транспорт. Меньшее значение в силу локальности распространения вносят строительные и промышленные машины. Малое вибрационное воздействие, влияющее лишь на технологические условия точных производств, оказывается большим количеством вентиляционных установок и кондиционеров. Их скопление создают вибрации пола с частотами 8,6-26 Гц и пиковыми значениями виброскоростей частиц грунта основания 0,05-1,1 мм/с [2].

Динамические воздействия опасны для конструкции по следующим причинам: за счет изменения свойств грунта могут происходить локальные уплотнения, что в последствие приводит к неравномерным деформациям оснований и повреждению самой конструкции; они могут вызывать разжижение грунта и потерю им несущей способности (особенно это относится к слабо связанным водонасыщенным почвам); длительные динамические возбуждения способны раскачать конструкцию здания на ее резонансных частотах.

С практической точки зрения наиболее значимы динамические нагрузки от движущегося транспорта в связи с их высокой интенсивностью и широким распространением, особенно на городских территориях и вблизи крупных магистралей с почти непрерывным транспортным потоком. При этом ведущая роль принадлежит наземному и подземному рельсовому транспорту: железнодорожным составам, трамваю и метрополитену, что обусловлено, в первую очередь, существенно меньшим демпфированием колебаний при передаче их грунту от стального колеса через жесткую систему «рельс-шпала». Определенно также влияет вес источника и присутствие ударных импульсов за счет ударов колеса об рельсы на стыках.

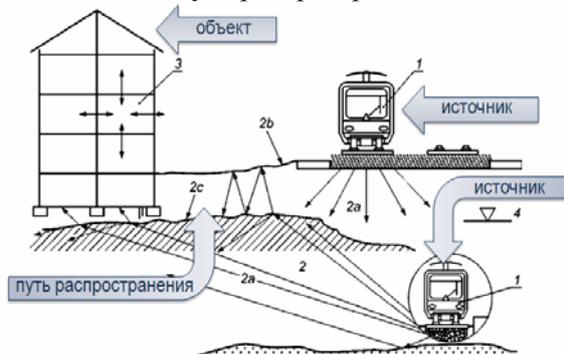
Техногенные динамические нагрузки распространяются главным образом в верхней части грунтовой толщи до глубин 10-15 м [3], поскольку основная часть их энергии переносится к сооружениям поверхностными волнами Рэлея, быстро затухающими с глубиной.

Приблизительно до этих отметок заглубляются фундаменты большинства зданий и городские коммуникации. Кроме того, наиболее низкочастотные составляющие транспортных динамических нагрузок часто близки к собственным частотам большинства сооружений, которые обычно лежат в полосе 2-8 Гц [4].

Вследствие этого, сооружения, расположенные вблизи магистралей с большим транспортным потоком, могут испытывать большие осадки, чем находящиеся вне зоны влияния последних или на ее периферии. Так, в пределах зон воздействия метрополитена иногда наблюдаются дополнительная осадка зданий на 50-200 мм [5].

Вибрация передается, видоизменяясь, через рельсовые пути на их опору и далее в грунт, окружающие здания, являясь как самостоятельным источником воздействия, так и порождая переизлученный шум.

Источник, путь распространения и объект воздействия показаны схематически на рис. 1.



**Рис. 1.** Примеры источника, пути распространения и объекта воздействия: 1 – источник вибрации; 2 – путь распространения (2a – волны внутри тела: сжатия, сдвига; 2b – поверхностные волны: Рэлея, Лява; 2c – волны на границе сред: Стоунли); 3 – объект воздействия (вибрация, переизлученный шум); 4 – поверхность грунтовых вод

При прогнозе передаваемой через грунт вибрации и переизлученного шума следует учитывать, что характеристики источника, пути распространения и объекта воздействия зависят от многих факторов, имеющих раз-

ную степень влияния в каждом отдельном случае. Основными из них являются следующие (ISO 14837-1:2005):

для источника колебаний: геометрия рельсового пути, характеристики подвижного состава, характеристики рельсов пути, состояние рельсового пути и колеса транспортного средства, основание рельсового пути, рабочие параметры (скорость движения рельсового транспорта и частота движения поездов);

для пути распространения вибрации: тип грунта, расстояние до объекта воздействия, геологический профиль местности (слоистость, наклон слоев, границы слоев) и форма земной поверхности, уровень грунтовых вод; динамические свойства грунта (модуль сдвига, коэффициент Пуассона, плотность, скорость волн сдвига и сжатия, коэффициент потерь и вид демпфирования (вязкое или гистерезисное)), неоднородности техногенной и естественной природы, средства ослабления передаваемой вибрации (например, наличие экранирующей стенки); сезонные особенности (промерзающий грунт, изменение свойств грунта и содержание влаги);

для объекта воздействия: тип фундамента, взаимодействие сооружения с грунтом, материал сооружения, состояние сооружения, собственные частоты и коэффициент демпфирования конструкции.

**Анализ исследований и публикаций.** Рост всех видов грузопотоков, увеличение скорости и интенсивности движения транспорта обуславливают необходимость получения качественных и количественных оценок влияния транспортной вибрации на сохранность зданий.

Как в отечественной, так и в зарубежной литературе периодически появляются сообщения об отрицательных последствиях транспортной вибрации [6-13], однако она, как правило, не учитывается ни при новом строительстве, ни при реконструкциях существующих зданий и сооружений

То, что транспортная вибрация не приводит в настоящий момент к чрезвычайным ситуациям, в определенной степени объясняет и практическое отсутствие нормативов, регламентирующих ее интенсивность в численных оценках по критериям прочности и надежности охраняемых объектов [7].

Выполненные еще в 1991 г. Жигалиным А.Д., и Локшиным Г.П. исследования о параметрах вибрации от транспортных источников указаны в табл. 1 [4].

Тип фундамента и состояние грунта определяют динамику системы на границе двух сред (грунт - фундамент здания).

Так, деформации фундамента, вызываемые сейсмическими волнами, прямо пропорциональны пиковому значению скорости в точке фундамента, но обратно пропорциональны скорости распространения этих волн в толще грунта.

Поскольку скорость распространения сейсмических волн возрастает при увеличении жесткости грунта, то одним и тем же деформациям (потенциальным источникам появления трещин) будут соответствовать тем большие пиковые значения скорости, чем выше жесткость грунта.

Характеристики транспортных источников динамических нагрузок

Источник	Доминирующие частоты, Гц	Виброскорость частиц грунта		Виброускорение частиц грунта		Зона влияния, Гц
		$10^{-3}$ м/с	дБ	10 м/с <sup>2</sup>		
Железная дорога	10-70	16-50	110-120	1-22	70-97	150-300
Трамвайная линия	20-45	1.6-160	90-130	0,5-45,2	56-103	150-300
Метрополитен	30-60	0,3-300	75-135	10-1800	90-135	6-120
Автомобильная магистраль	10-20	0,005-0,07	40-65	0.0003-0.011	до 31	40-100

С развитием высокоскоростных железнодорожных линий, появлением новых технологий строительства, а так же, как упоминалось выше, в силу различных факторов влияющих на параметры вибрации, важным является проведение дополнительных экспериментальных исследований в пределах города Днепропетровска с целью выявления доминирующих диапазонов параметров вибрации и последующего анализа свойств грунтов, подверженных этим воздействиям.

Учитывая общее физическое старение существующих зданий, особенно памятников архитектуры, которые не будут сноситься при реконструкции исторически сложившихся центров, интенсивным развитием городов и плотной застройкой, вопросы обеспечения надежности сооружений, связанные с транспортной вибрацией, могут в ближайшее время стать вполне актуальными, особенно в сложных гидрогеологических условиях урбанизированных территорий.

В связи с этим **целью** статьи является получение экспериментальным путем дополнительных данных о создаваемых транспортом динамических воздействиях на окружающий источник массив грунта.

**Изложение материала и результатов.** Параметр, который чаще всего связывают с риском повреждения конструкции, является значения виброскорости. Параметр, который наилучшим образом коррелируется с изменением прочностных и деформационных параметров грунта является значение виброускорения.

Измерения вибрации от движущегося транспорта были выполнены с помощью виброметра VM6360 (рис. 2), который использует в качестве датчика вибрации пьезоэлектрический акселерометр.



**Рис.2.** Виброметр VM6360: 1 – акселерометр; 2 – дисплей; 3 – входной разъем; 4 – кнопка функций удержания максимальных значений; 5 – кнопка питания; 6 – кнопка преобразования системы единиц измерения; 7 – кнопка функции; 8 – кнопка фильтра; 9 – кнопка звука; 10 – разъем для наушников; 11 – разъем RS232C; 12 – крышка батарейного отсека; 13 – магнитный датчик; 14 – шаровой зондовый датчик; 15 – конусный зондовый датчик

Технические характеристики виброметра указаны в табл. 2. С помощью датчиков вибрации может быть измерена любая величина - перемещение, скорость или ускорение - при условии обеспечения требуемого диапазона частот и чувствительности. Так как в дальнейшем полученные данные будут использоваться для определения зависимости изменения прочностных характеристик грунтов при динамических воздействиях, измеряемый параметр был выбран пиковые значения виброускорения.

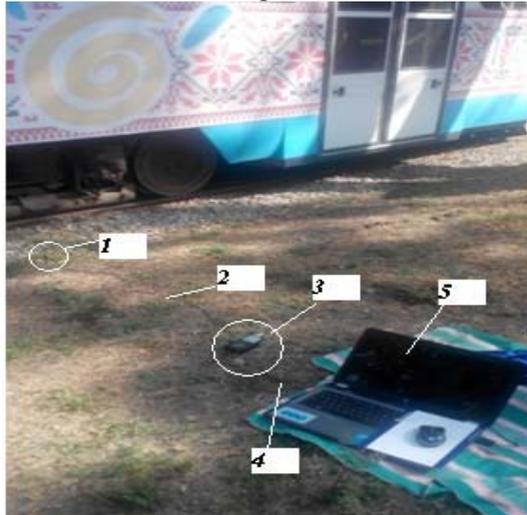
Объекты исследований: линия железнодорожного пути от станции Южный вокзал к Мерефо-Херсонскому железнодорожному мосту и трамвайная линия маршрута №1 по пр. К.Маркса, г. Днепропетровск.

На текущий момент не существует национальных стандартов, которые смогли бы полностью регламентировать проведение полевых (натурных) экспериментов по измерению вибра-

ции от техногенных источников и оценить их влияние на здания и сооружения, поэтому при проведении экспериментальных исследований было принято решение руководствоваться международными стандартами: ISO 14837-1:2005 Mechanical vibration – Ground-borne noise and vibration arising from rail systems – Part 1: General guidance (Вибрация. Шум и вибрация, создаваемые движением рельсового транспорта, Часть 1, общее руководство), ISO 4866:1990 «Mechanical vibration and shock–Vibration of buildings– Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings» (Вибрация и удар).

Вибрация зданий. Руководство по измерению вибрации и оценке ее воздействия на здание).

При проведении эксперимента, был выбран способ зарытия специального конусного зондового датчика в грунт, предварительно очистив место установки датчика, при этом шнур соединяющий акселерометр и приемник сигнала надежно закрепляется металлическими клипсами. Общий вид измерительной цепи показан на рис. 3.



**Рис. 3.** Общий вид измерительной цепи: 1 – акселерометр; 2 – кабель для передачи данных на дисплей виброметра; 3 – виброметр; 4 – опциональный кабель для интерфейса RS232C для обмена данными с компьютером; 5 – компьютер для записи и хранения данных

На исследуемом участке рельсового пути вариативность измерений может быть обусловлена, например, изменениями, как самого источника вибрации, так и состояния грунта.

Поэтому для получения статистически достоверных результатов измерения повторялись, перемещая точки измерений вдоль пути через 25 м от 4 до 6 раз.

Для того чтобы оценить вариативность источников вибрации, измерения проводились, по крайней мере, для пяти проходов транспортного

средства каждой категории (например, грузовой состав, пригородный поезд, поезд междугородного сообщения, трамвай).

Таблица 2

Технические характеристики виброметра VM6360

Измеряемые параметры	Скорость, ускорение, смещение, число оборотов и частота
Диапазон измерений:	
скорость	0,01-40,00 см/с 0,000-16,00 дюйм/с
ускорение	0,1-400,0 м/с <sup>2</sup> 0,3-1312 футов/с
смещение	0,001-4,000 мм 0,04-160,0 мил
число оборотов	60-99990 об./мин
частота	1-20 кГц
Диапазон частот измерений:	
ускорение	10 Гц...1 кГц в режиме 1 10 Гц...10 кГц в режиме 10
скорость	10 Гц...1 кГц
смещение	10 Гц...1 кГц
погрешность	±5%
Условия эксплуатации:	
температура	0...50°C
влажность	ниже 90%

Распространение вибрации при удалении от рельсового пути не проводилось, так как результат будет зависеть от типа грунтов подстилающих слоев, наличием твердых пород в зоне влияния по глубине, уровня грунтов вод и поэтому составляет большие трудности.

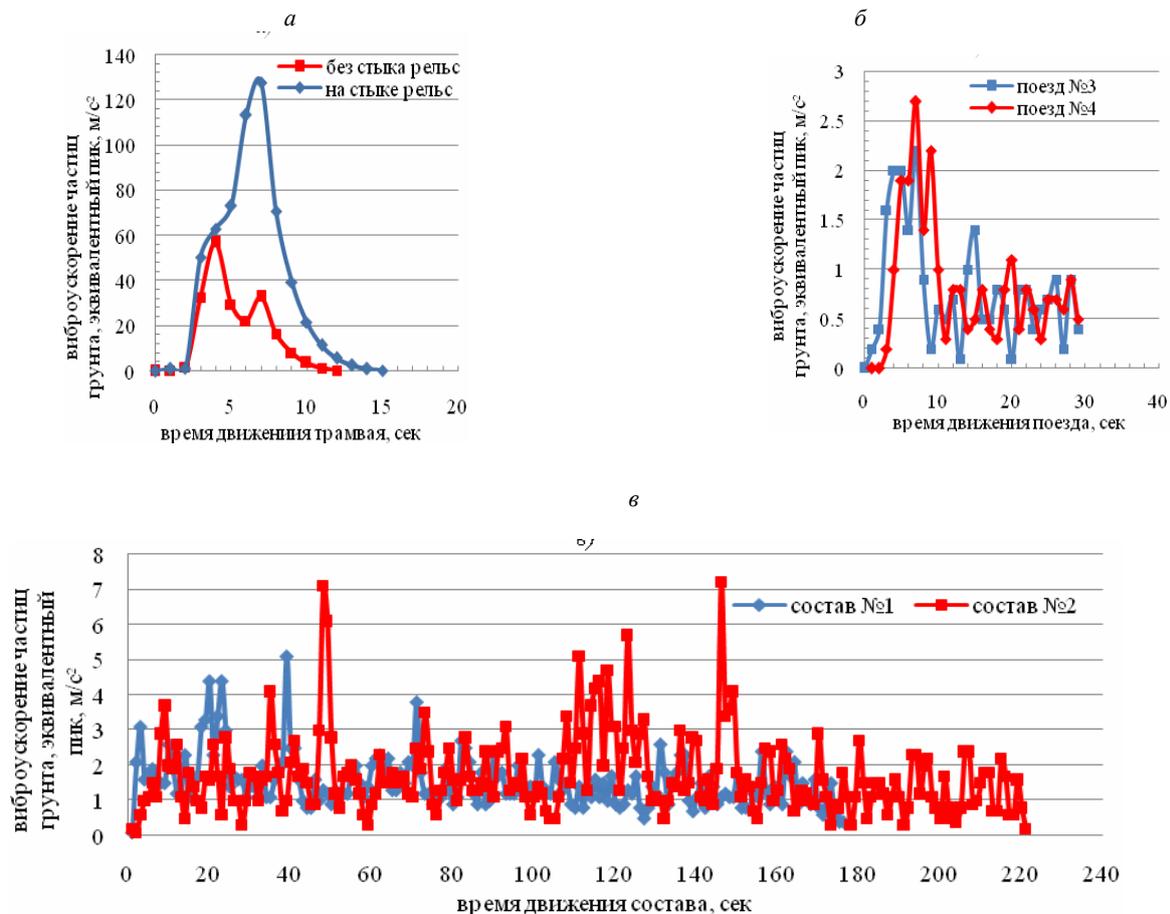
Акцент измерений был направлен на изучение актуальности результатов предыдущих исследований о параметрах вибрации, создаваемых при движении рельсового транспорта.

В работе проводились только измерения вертикальной составляющей, так как согласно [8] этот параметр имеет максимальные значения.

Полученные результаты измерений отображены на рис. 4.

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Выполненные полевые исследования и полученные количественные характеристики параметров вибрации от рельсового транспорта позволяют сделать следующие выводы.

Не смотря на существующую тенденцию постоянного совершенствования транспортных средств, параметры вибрации от движущихся железнодорожных составов и трамваев в Днепропетровске (рис. 4) за последние 25-30 лет не уменьшились, в сравнении с данными, представленными в [5].



**Рис. 4.** Значения виброускорений для различного вида рельсового транспорта, полученные в натурных условиях для г. Днепропетровска: *а* – трамвай, *б* – поезд пригородного назначения, *в* – грузовой состав

Более того, в некоторых случаях значения виброускорений существенно превышают известные величины (см. рис. 4*а*) в местах деформаций и стыков рельс, стрелочных переводов, что часто встречается на трамвайных линиях и, как правило, в местах пересечений и разветвленных маршрутов, на перекрестках с интенсивным движением городского транспорта.

Рассматривая в целом систему взаимодействия «источник вибрационных нагрузок-породный массив-объект воздействия», необходимо указать следующие причины актуализации этой проблемы, которые обозначились в последние 2-3 десятилетия:

для источника колебаний: увеличение грузоподъемности, скорости движения и грузопотоков транспорта, износ рельс и их стыков, деформации колес; несбалансированность машинного оборудования, приводящая к дополнительным ударным нагрузкам;

для среды распространения колебаний (грунтового массива): интенсивная застройка территории города, особенно балок и их склонов, повышение уровня грунтовых вод;

для объекта воздействия: общее старение зданий, реконструкция зданий с нарушением целостности капитальных стен, дополнительное техническое оснащение зданий (системы вентиляции, кондиционирования, водоснабжения и др.), не учтенные ранее.

Несмотря на большое количество работ, посвященных теме влияния динамических воздействий на грунт, все еще остается неразрешенным ряд вопросов, и дальнейшими направлениями деятельности можно определить следующие:

изучение изменения свойств грунтов при длительных динамических воздействиях, учитывающих такие факторы, как вид нагрузки (гармонические колебания, короткие импульсные, ударные, произвольные сейсмические) длительность воздействия, степень влажности грунтов;

определение критических параметров вибрации, связанных не только с санитарными нормами воздействия на человека, но также с риском повреждения конструкций, в особенности при длительных воздействиях;

разработка соответствующих методик по эффективному прогнозированию развития дополнительных деформаций оснований сооружений и потере устойчивости оснований при длительных динамических воздействиях.

#### *Список литературы*

1. **Гуревич В.И.** Опыт изучения поля вибрации на территории города с целью оценки состояния геологической среды / **В.И. Гуревич, А.Д. Жигалин Г.П. Локшин, Е.П. Труфманова**// Инженерная геология.– 1991. – С. 74-81.
2. **Максимов Л. С.** Измерение вибрации сооружений / **Л.С. Максимов, И.С. Шейнин**; под ред. **И.С. Шейнина**. – Л. : Стройиздат, 1974. –255 с.:ил.
3. **Локшин Г.П.** Техногенное поле вибрации и его воздействие на геологическую среду городских территорий: автореферат на соискание ученой степени канд. техн. наук/ **Г.П. Локшин**. – Москва, 1987. – 24с.
4. **Локшин Г.П.** Формирование вибрационного поля в геологической среде/ **Г.П. Локшин, А.Д. Жигалин**// Инженерная геология. –1991. – №6. – С. 110-119.
5. **Горшков С.П.** Экзодинамические процессы освоенных территорий/**С.П. Горшков**. – М.: Недра, 1982. – 286с.
6. **Локшин Г.П.** Оценка вибрационного воздействия на территории города (на примере Москвы и Братиславы) / **Г.П. Локшин, Э.А. Лихачева, Я. Лацка, Ю. Крайнович** // Инженерная геология. – 1991. – № 4. – С. 82–91.
7. **Борисов Е.К.** Экспериментальная динамика сооружений. Мониторинг транспортной вибрации: Монография /**Е.К. Борисов, С.Г. Алимов, А.Г. Усов и др.** – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2007. – 128 с.
8. **Абдукаримов А.М.** Несущая способность земляного полотна, отсыпанного лессовыми грунтами, воспринимающими вибродинамическую нагрузку: автореферат на соискание ученой степени канд. техн. наук / **А.М. Абдукаримов**. – Санкт-Петербург, 2011. – 23с.
9. **Madshus С.** High-speed railway lines on soft ground: dynamic behaviour at critical train speed /**А.М. Kaynia, С. Madshus** //Journal of Sound and vibration. – 2000. – P. 689-701.
10. **Xia H.** Experimental study of train-induced vibrations of environments and buildings/**H. Xia, N. Zhang, Y.M. Cao** // Journal of Sound and Vibration. – 2005. – P.1017–1029.
11. **Xian-Zhang Ling.** Field monitoring on the train-induced vibration response of track structure in the Beiluhe permafrost region along Qinghai–Tibet railway in China /**Xian-Zhang Ling , Shi-Jun Chen, Zhan-Yuan Zhu, Feng Zhang, Li-Na Wang, Zu-Yin Zou**// Cold Regions Science and Technology. – 2010. – P.75–83.
12. **Колокольников Ю.В.** Осадки зданий и сооружений при динамическом воздействии рельсового и автомобильного транспорта/ **Ю.В. Колокольников**// Наука и практика транспорта. Материалы IV научной конференции.– Варшава, 1985. – Т.5, скц. 6. – С. 226-239.
13. **Ершов В.А.** Влияние уличного транспорта на осадку зданий/**В.А. Ершов, А.А. Романов** //Вопросы инженерной геологии Ленинградского экономического района. Ленинград ЦБТИ. – 1960.– С.66-73.

Рукопись поступила в редакцию 01.04.15