

УДК624.131.55

Рубан Н.Н., н.с. каф. СГГМ

*Государственное ВУЗ "Национальный горный университет", г. Днепропетровск,  
Украина*

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

**Введение.** 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 на производствах полупроводниковых приборов и микросхем [2].

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 играет вес источника и присутствие ударных импульсов в спектре воздействия – за счет ударов колеса об рельсы на стыках.

Любой вид транспорта является источником колебаний, передающихся через грунтовую среду на расположенные вблизи транспортных магистралей сооружения и вызывающих их вибрацию, которая сказывается как на техническом состоянии зданий, так и на санитарно-гигиенических условиях пребывания в них людей. 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.

При прогнозе передаваемой через грунт вибрации и переизлученного шума следует учитывать, что характеристики источника, пути распространения и объекта воздействия зависят от многих факторов, имеющих разную степень влияния. 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 содержания влаги);

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

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 [3,4,8-13], однако она, как правило, не учитывается ни при новом строительстве, ни при реконструкциях существующих зданий и сооружений

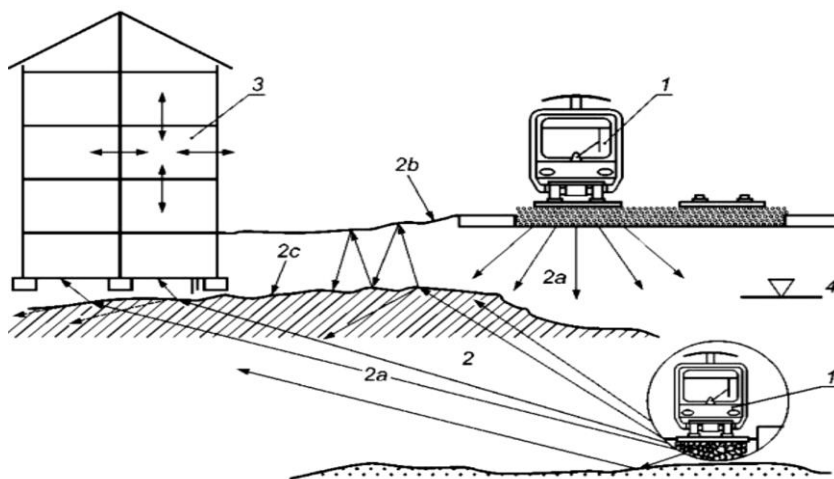


Рис. 1. Примеры источника, пути распространения и объекта воздействия: 1 – источник вибрации; 2 – путь распространения (2а – волны внутри тела: сжатия, сдвига; 2b – поверхностные волны: Рэлея, Лява; 2с – волны на границе сред: Стоунли); 3 – объект воздействия (вибрация, переизлученный шум); 4 – поверхность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

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 [4].

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 настоящей статьи является анализ известных результатов исследований и получение экспериментальным путем новых данных о создаваемых транспортом динамических воздействиях на окружающий источник массив грунта.

**Анализ известных результатов исследований и методика проведения экспериментов.** Обобщенные данные о параметрах вибрации от транспортных источников указаны на рис. 2[5].

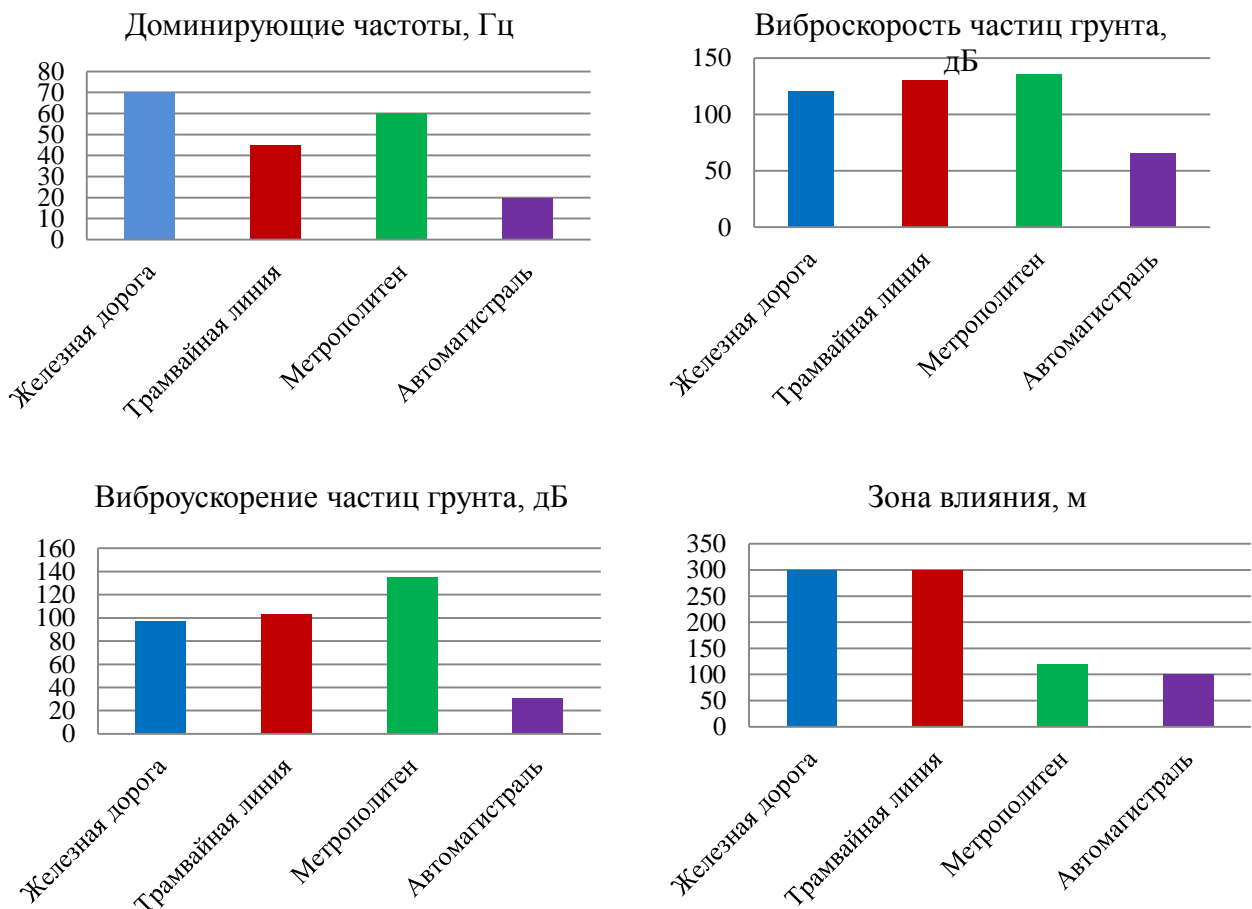


Рис. 2. Характеристики транспортных источников динамических нагрузок

Техногенные динамические нагрузки распространяются главным образом в верхней части грунтовой толщи до глубин 10-15 м [6], так как 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 [5]. 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 [7].

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.

Геологический состав грунта влияет на изменение частотного состава вибрации, передаваемой от источника. Кроме того, от динамического взаимодействия грунтакфундаментом зависят значения собственных частот колебаний конструкции здания. В общем случае, чем выше жесткость фундамента и чем больше плотность грунта, тем выше значения собственных частот системы «грунт - фундамент здания».

Другим важным моментом, который следует учитывать при рассмотрении зависимости величины колебаний от расстояния между источником и объектом воздействия, является преобразование сейсмических волн из одного вида в другой. Чем больше расстояние от источника вибрации до здания, тем большая часть вибрационной энергии передается зданию поверхностными (рэлеевскими) волнами и тем меньше влияют на него волны сжатия и сдвига. Кроме того, при увеличении расстояния происходит перераспределение энергии в область низких частот. Частота доминирующей составляющей уменьшается. Поэтому, как правило, при одинаковых результатах измерений вибрации на фундаменте здания, чем больше расстояние от источника, тем выше риск повреждения конструкции.

В табл. 1 согласно международному стандарту ISO4866:1990 указаны характеристики вибрации, измеряемой на конструкции здания, для разных источников возбуждения техногенной природы.

Отклик конструкции здания на передаваемую через грунт вибрацию зависит от типа фундамента, типа и состояния грунта в основании здания, особенностей и состояния конструкции здания и расстояния, на котором находится источник вибрации. Следовательно, данные для прогнозирования должны быть определены из опыта, литературных источников, экспертных оценок или по результатам измерений на месте.

Таблица. 1

Типичный диапазон параметров вибрации зданий для некоторых источников возбуждения

Источник возбуждения	Диапазон частот, Гц	Диапазон перемещений, мкм	Диапазон скоростей, мм/с	Диапазон ускорений, м/с <sup>2</sup>	Длительность
Движение дорожного (рельсового) транспорта	1-80	1-200	0,2-50	0,02-1	К*/Д**
Взрывы	1-300	100-2500	0,02-500	0,02-50	К
Забивка свай	1-100	10-50	0,2-50	0,02-2	К
Работа машин вне здания	1-300	10-1000	0,2-50	0,02-1	Д/К

\*К – кратковременный процесс, \*\*Д – долговременный процесс

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.

*Приборы и оборудование для проведения полевых (натурных) экспериментов.* Основным параметром, используемым для оценки вибрации зданий, является пиковое значение скорости, измеряемое в направлении трех взаимно перпендикулярных осей  $x$ ,  $y$  и  $z$  –  $v_{peak,x}$ ,  $v_{peak,y}$  и  $v_{peak,z}$  соответственно. Эти параметры впоследствии учитываются при расчете пиковых напряжений в грунте на фронте волны от рассматриваемого источника. Измеренные значения скоростей смещения  $V$  (м/с) частиц следует пересчитать в напряжения  $\sigma$  (Па) в соответствии с выражением:

$$\sigma = \rho c V \quad (1)$$

где  $\sigma$  – напряжения в волне заданного типа (волны сдвига, сжатия, волны Рэлея, и т.д.), Па,  $\rho$  - плотность грунта в слое распространения волны, кг/м<sup>3</sup>,  $c$  – скорость распространения волны, м/с,  $V$  – скорость смещения частиц в волне данного типа, м/с.

Для оценки вибрации сооружений определяют  $v_{peak,max}$  – наибольшее из пиковых значений, полученных для каждого направления измерений:

$$v_{peak,max} = \max v_{peak,x}, v_{peak,y}, v_{peak,z} \quad (2)$$

В зависимости от типа используемого датчика вибрации измеряемой величиной, помимо скорости, может быть ускорение с последующим выполнением операции интегрирования.

Измерения вибрации от движущегося транспорта были выполнены с помощью виброметра VM6360 (рис.3), который использует в качестве датчика вибрации пьезоэлектрический акселерометр. Технические характеристики виброметра указаны в табл. 2.

Выбор объекта исследований и методика проведения эксперимента. С помощью датчиков вибрации может быть измерена любая величина – перемещение, скорость или ускорение, при условии обеспечения требуемого диапазона частот и чувствительности. Датчики и измерительная система в целом должны допускать возможность их применения на открытом воздухе в реальных условиях измерений.

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 вибрации 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 *Mechanics Ivibration – Groundbornnoiseandvibrationarisingfromrailssystems – 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).



Рис.3. 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

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. 4.

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

Обычно рекомендуется измерять вибрацию в вертикальном направлении и в горизонтальных направлениях: параллельно и перпендикулярно рельсовому пути. Другой вариант – ориентировать оси чувствительности датчиков согласно конструкции здания или помещения, где проводят измерения, и указывать в протоколе измерений положение этих осей относительно рельсового пути. В работе проводились только измерения вертикальной составляющей, так как

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 – влажность	0...50°C Ниже 90%

согласно [8] этот параметр имеет максимальные значения. Для того чтобы оценить вариативность источников вибрации, измерения проводились, по крайней мере, для пяти прохождений транспортного средства каждой категории (например, грузовой состав, пригородный поезд, поезд междугороднего сообщения, трамвай).

**Анализ результатов экспериментов.** 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. 5) за последние 25...30 лет не уменьшились, в сравнении с данными, представленными в [5].

Более того, в некоторых случаях значения виброускорений существенно превышают известные величины (см. рис. 5, а) в местах деформаций и стыков рельс, стрелочных переводов, что часто встречается на трамвайных линиях и, как правило, в местах пересечений и разветвлений 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 в условиях города Днепропетровска, которые обозначились в последние 2-3 десятилетия.

Интенсивная застройка территории города, особенно многочисленных балок и их склонов, привели к снижению эффективности естественных стоков воды, что вызвало повышение уровня грунтовых вод. Последнее обстоятельство, с одной стороны, повышает чувствительность массива к передаче динамических нагрузок, с другой стороны – снижает прочность оснований фундаментов существующих зданий.

Другим фактором, который снижает степень воздействия зданий к динамическим нагрузкам, является их реконструкция. На сегодня практически все первые этажи и подвалы зданий, находящихся в центральной части города, за прошедшие 20...30 лет были реконструированы с нарушением целостности капитальных стен за счет создания новых оконных или дверных проемов.

Следует к этому же добавить и возросшую нагрузку на сами здания вследствие дополнительного технического оснащения (системы вентиляции, кондиционирования, водоснабжения, банкоматы, офисное оборудование и др.), не учтенные ранее на стадии проектирования зданий, особенно с большим сроком эксплуатации.

Заметный износ наблюдается и самих рельс и дорожных покрытий, что помимо других факторов также существенно влияет на создаваемую дополнительную нагрузку вследствие удара колес транспорта при попадании на деформационные участки.



*Рис. 4. 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*



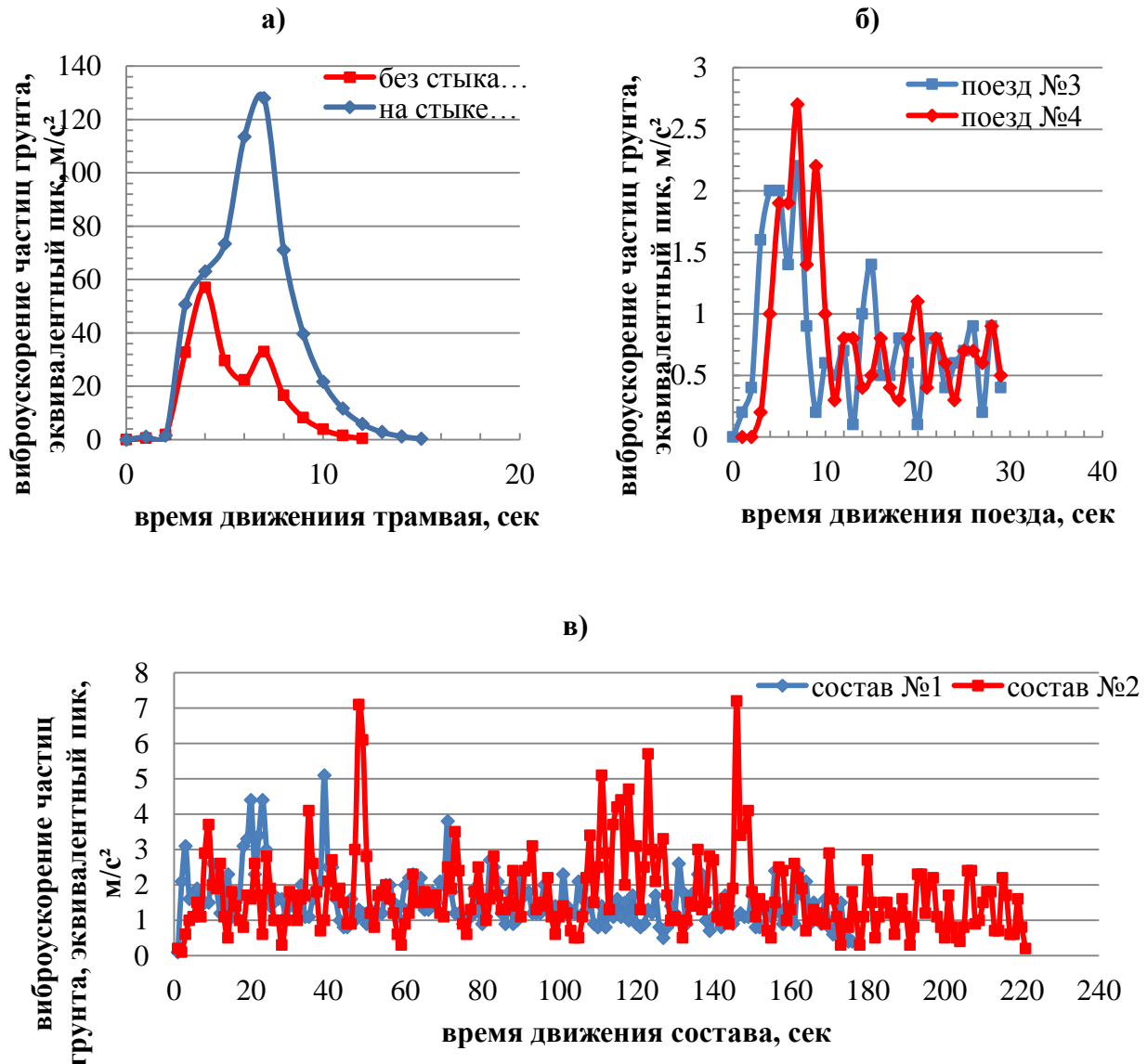


Рис. 5. Значения виброускорений для различного вида рельсового транспорта, полученные в натуральных условиях для г. Днепропетровска: а – трамвай, б – поезд пригородного назначения, в – грузовой состав

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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. Оценка вибрационного воздействия на территории города (на примере Москвы и Братиславы) / Г.П. Локшин, Э.А. Лихачева, Я. Лацика, Ю. Крайчович // Инженерная геология. – 1991. – № 4. – С. 82–91.

4. 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.

5. Формирование вибрационного поля в геологической среде/ Г.П. Локшин, А.Д. Жигалин // Инженерная геология. – 1991. – №6. – С. 110-119.

6. 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.

7. Горшков С.П. Экзодинамические процессы освоенных территорий/С.П. Горшков. – М.: Недра, 1982. – 286с.

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. Madhus C. High-speed railway lines on soft ground: dynamic behaviour at critical train speed/A.M. Kaynia, C. Madhus // 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.