

УДК 551.332.53:624.131.54

Е. Ю. ТРАЦЕВСКАЯ, кандидат геолого-минералогических наук, Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Республика Беларусь

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АВТОТРАНСПОРТНОГО ВИБРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МАССИВЫ ГРУНТОВ

Проведены полевые исследования вибродинамического воздействия, генерированного автотранспортным потоком, на грунтовый массив. Установлены параметры вертикальной составляющей поверхностных волн: частота, амплитуды виброперемещений и виброскоростей. Показано, что виброускорения, возникающие в грунте, меньше  $0,0014 g$ . Следовательно, автотранспортное вибрационное воздействие не превышает порога опасности надежной работы сооружений, расположенных вблизи транспортных магистралей. Тем не менее напряженное состояние массивов грунтов, вызванное движением автотранспорта, может обусловить их «усталостное» разрушение. Отмечено, что при расчете амплитуд вертикальных колебаний необходимо учитывать особенности состава и свойств грунтов.

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

Впервые негативные последствия вибрации от городского транспорта на состояние зданий были отмечены в конце 60-х – начале 70-х гг. прошлого века в период резкого увеличения числа транспортных средств и роста магистральных нагрузок. По некоторым данным, осредненные радиусы негативного действия транспортной вибрации на основания зданий составляют от движения автотранспорта примерно 12–15 м, трамваев – 50 м, поездов – 100–150 м [4]. Дополнительные осадки оснований в зависимости от видов грунтов, их состояния и интенсивности вибрации достигают 50–200 мм, носят, как правило, неравномерный характер, и их развитие соизмеримо с периодом эксплуатации объекта. Отмечены случаи, когда здания наклонялись в сторону проезжей части, а незатухающие во времени и возрастающие по величине осадки оснований вынуждали полностью закрывать улицы для движения транспорта [4].

Вибрационное поле, создаваемое автомобильным транспортом, формируется как самим подвижным составом, так и качеством и состоянием определенных элементов дороги. Интенсивность динамических воздействий зависит от вертикальных колебаний ходовой части автомобиля при значительных скоростях движения, от типа и изношенности шин и т. д. Удары возникают вследствие неровностей дорожного покрытия (сдвиги слоев асфальтобетонного покрытия, смещение плит цементобетонного покрытия, волны, выбоины, просадки нежесткой дорожной одежды, наличие колеи и др.), при переезде через крышки колодцев, люки подземных сетей [4]. Удары увеличивают действие статической нагрузки от веса подвижного состава (автомобильного транспорта). Частицы толчки, создаваемые движущимся транспортом, приводят к сотрясениям дорожного полотна, которые передаются грунтовому основанию. Динамическое воздействие увеличивается в случае попадания колебаний в резонансную зону системы «движущийся автомобиль – дорога – грунтовое основание».

К основным параметрам динамического воздействия относятся длительность и критическое ускорение; кроме того, учитывается характер взаимодействия сооруже-

ния с грунтовым основанием. По продолжительности, изменению во времени, интенсивности и частотному составу – динамические воздействия от транспортного движения существенно отличаются как друг от друга, так и от других типов техногенных воздействий, что дает основание рассматривать их как самостоятельный класс внешних усилий.

Транспортный каркас г. Гомеля представляет собой разветвленную систему обычных автомобильных дорог общего назначения категории IV–V, расчетная интенсивность движения по которым уменьшается от  $>10000$  до 200 ед./сут. Автомобильный трафик, включающий в себя автобусное и троллейбусное движение, является неопределенным (по сравнению, например, с железнодорожным). Характерным для него является только постепенное нарастание в начале дня и убывание в конце. Транспортная вибрация в развитой своей части является типичным случайным стационарным процессом [2].

Так как уровень вибрации, создаваемой автомобильным транспортом на городских магистралях, дБ, находится в прямой зависимости от интенсивности транспортного потока, то его можно рассчитать [6]:

$$A_v = 21,51N^{-0,13}, \quad (1)$$

где  $N$  – интенсивность транспортного потока, трансп. ед./ч.

Как известно [2, 9], частотный состав вибрации является практически независимым от расстояния. Наибольшие амплитуды реализуются в момент прохождения автотранспорта в направлении перпендикулярном дороге. Перемещения по вертикальной составляющей  $A_z$  имеют монотонно убывающий характер и, с одной стороны, могут быть представлены эмпирическими зависимостями, полученными при изучении динамики различных инженерных объектов в определенных инженерно-геологических условиях. Например [2]:

$$A_z = 9,23 \exp(-0,06r), \quad (2)$$

$$A_z = 9,23 \exp(-0,061r), \quad (3)$$

где  $r$  – расстояния от оси движения до точки измерения при начальных расстояниях 8,3 и 7,8 м соответственно.

С другой стороны, в действующем нормативном документе Беларуси [9] амплитуды вертикальных колебаний грунта ( $A_{гр}$ ) при вертикальных вибрациях машин, т. е. источника вибрационных волн в грунте ( $A_s$ ), рекомендуется рассчитывать по формуле:

$$A_{\text{тп}} = A_s \left\{ \frac{1}{\delta \cdot [(\delta-1)^2]} + \frac{\delta^2 - 1}{\delta \cdot (\delta^2 + 1) \cdot \sqrt{3 \cdot \delta}} \right\}, \quad (4)$$

где  $\delta$  – относительное расстояние от оси фундамента до рассматриваемой точки на поверхности грунта,

$$\delta = \frac{\hat{r}}{r_0}, \quad (5)$$

$\hat{r}$  – расстояние от оси фундамента для рассматриваемой точки на поверхности грунта, м;  $r_0$  – приведенный радиус подошвы фундамента.

Следует обратить внимание на то, что несколько ранее [8] значение амплитуд смещения колебаний грунта ( $A_{\text{тп}}$ ) рассчитывалось по аналогичной формуле для железнодорожного транспорта. Соответственно за  $A_s$  принималась амплитуда смещений непосредственно около земляного полотна ( $A_0$ ), за  $\hat{r}$  – расстояние от оси железнодорожного пути, за  $r_0$  –  $1/2$  его ширины. Перемена понятий «источник вибрационных волн в грунте ( $A_s$ )» и «амплитуда смещений непосредственно около земляного полотна ( $A_0$ )» в формуле (4) имеет принципиальное значение, т. к. при передаче динамической нагрузки на реальный грунт в нем возникают ускорения, отличающиеся от ускорений, передающихся источником воздействий и существенно меняются в начале приложения нагрузки [10]. В случае транспортных вибраций дело усугубляется тем, что вибрационное поле формируется как подвижным составом, так и состоянием дорог.

Рост всех видов грузопотоков, увеличение скорости и интенсивности движения транспорта, реконструкция (расширение) автодорог обуславливают необходимость получения качественных и количественных оценок трансформации транспортной вибрации в геологической среде. С одной стороны, несущая способность грунтов оснований фундамента инженерных сооружений может меняться, например, из-за не учтенных динамических воздействий, развития подтопления и других факторов техногенного воздействия [14–17], а с другой – массив грунта является средой, в которой распространяются генерируемые транспортом колебания, и от свойств этой среды зависит интенсивность воздействия транспортной вибрации на инженерные сооружения. Поведение грунтов при вибродинамических нагрузках определяется плотностью их сложения, влаж-

ностью, начальным статическим напряженным состоянием.

Нами были проведены полевые исследования вибрации в грунтовом массиве, генерированные автотранспортным потоком. Площадка исследований находилась на окружной дороге Киев – С.-Петербург около деревни Цыкуны в Гомельском районе. Изучение параметров и характера распространения вертикальной составляющей поверхностных волн осуществлялось при регистрации колебательного процесса с помощью ВИП-2 с записью на шлейфовый осциллограф. На площадке измерения проводились в 12 шурфах глубиной 1,5 м от дневной поверхности каждый. Шурфы были сгруппированы в четыре ряда, перпендикулярных дороге, по три в каждом. Расстояние между рядами – 26,0; 11,6 и 14,7 м. В рядах: первая линия – непосредственно у дороги, вторая – на расстоянии 11,0 м, третья – 24,0 м от дороги. Поверхностные отложения представлены песком аллювиальным светло-желтым мелкозернистым однородным средней плотности маловлажным с плотностью частиц  $\rho_s = 2,62...2,70$  г/см<sup>3</sup>, плотностью  $\rho = 1,50...1,66$  г/см<sup>3</sup>; природной влажностью  $W = 0,02...0,07$ ; коэффициентом пористости  $e = 0,66...0,86$  и степенью влажности  $S_r = 0,07...0,22$ .

По данным, полученным автором, а также источников других исследователей [2, 3, 5] экспериментально установленные параметры вертикальной составляющей поверхностных волн при вибродинамических воздействиях приведены в таблице 1. Таким образом, максимальное значение амплитуды вертикальной составляющей виброперемещений ( $A_z$ ) составляет 4,2 мкм при диапазоне частот  $f = 15...25$  Гц.

При подстановке значений  $A_z = 2,5$  мкм и  $f = 20...40$  Гц (см. таблицу 1) в формулу (1) значения амплитуд  $A_z$  на расстоянии 25 м от дороги составит 0,0117 мкм, скоростей  $A_v = 0,0002-0,0005$  мм/с. По нашим данным, средние амплитуды колебаний вертикальной составляющей скоростей волнового поля, замеренные на расстоянии 25 м от трассы, больше по сравнению с приведенными в таблице 1 и равны 0,0034–0,0280 мм/с, соответственно максимальные значения амплитуд перемещений – 0,17–1,40 мкм.

Таблица – Параметры вертикальной составляющей поверхностных волн при вибродинамических автотранспортных воздействиях

Показатель	Значения				
	Е. К. Борисов [2]	А. Д. Жигалин [3]	Г. П. Локшин [5]	Для г. Гомеля	Авторские
Частота $f$ , Гц	16,2	3–5; 60–70; 20 (пиковые)	15–38	–	20–40
Амплитуды:					
виброперемещений $A_z$ мкм	4,2	–	3,8	–	2,5
виброскоростей $A_v$ , мм/с	2,68	–	0,31–0,36	2,23–2,61	0,014–0,050
виброускорений, $A_a$ , м/с <sup>2</sup>	0,044	–	0,009–0,014	–	$(0,28 \div 2,00) \cdot 10^{-3}$
Условия проведения экспериментов	При движении автобусов, троллейбусов, грузового автотранспорта (грузежный КамАЗ) в обоих направлениях и в различном сочетании по удаленной и по ближней полосам в городской черте, максимальные значения	При движении транспорта по улицам города	–	Расчитанные по формуле (1)	Непосредственно у трассы

Примечание – Цветом выделены рассчитанные значения.

Существенные отличия в значениях, полученных расчетным и экспериментальным способами, возможно, объясняются тем, что при использовании формулы (1) не учитываются особенности состава и свойств грунтов. Между тем демпфирующие свойства грунтов при вибродинамических нагрузках являются величинами переменными, зависящими от характера структурных связей и их переходов, а также параметров вынужденных колебаний.

При виброуплотнении неводонасыщенного песчано-глинистого грунта В. А. Флориным выделены три стадии [18]:

I – момент приложения динамической нагрузки;

II – изменение напряженного состояния, грунт находится в нестабильном состоянии, разрушается и вновь восстанавливается его структура, происходят упруго-пластические деформации грунта, его уплотнение;

III – напряженное состояние практически не меняется во времени, грунт находится в метастабильном состоянии (конечно-напряженное состояние).

Дальнейшее уплотнение грунта возможно при увеличении интенсивности вибродинамического воздействия и (или) при изменении показателей состояния и физических свойств грунтового массива [11].

Как известно, еще в 1948 году Д. Д. Барканом было установлено, что разрушение структуры и уплотнение грунта определяется не по отдельности величинами амплитуды или частоты колебаний, а зависит от ускорения колебаний, которое характеризует интенсивность силового воздействия при вибрации [1]. В результате экспериментальных работ [7] было установлено, что каждой величине начального коэффициента пористости соответствует своя величина критического ускорения, при достижении которой начинается разрушение структур и уплотнение грунта; с уменьшением начального коэффициента пористости критическое ускорение увеличивается.

Диапазон значений критических ускорений (при переходе от первой ко второй стадии) в различных источниках существенно отличается от  $a > 0,1g \div 0,15g$  [3] до  $0,7g < a < 1,5g$  [19]. При ускорениях  $a \approx 1,5g$  или  $a = 0,6g \div 5,0g$  происходит разрушение, а в водонасыщенных грунтах – разжижение.

В ТКП 45-5.01-264–2012 [9] максимальная величина на критического ускорения  $a_{кр} = 0,07g$  принята для глины (показатель текучести  $I_L = 0$ ) при работе технологического оборудования. Для автомобильного транспорта  $a_{кр}$  изменяется от  $0,06g$  до  $0,006g$  при изменении  $I_L$  от 0,0 до 0,9 для пылевато-глинистых грунтов.

По нашим данным, полученным в лабораторных условиях по методике, описанной в [10, 11] для трехфазных пылевато-глинистых грунтов,  $a_{кр} \leq 0,76g$ . По данным полевых исследований как опубликованных [2], так и авторских, виброускорения, возникающие в грунте при движении автотранспорта, меньше  $0,0014g$ .

Таким образом, автотранспортное вибрационное воздействие не превышает порога опасности надежной работы инженерных сооружений. Но напряженное состояние массивов грунтов, вызываемое автотранспортными вибродинамическими нагрузками, может

обусловить их «усталостное» разрушение. Поэтому даже относительно слабые вибрации могут приводить к серьезным негативным последствиям и их необходимо учитывать при проектировании различных объектов, расположенных вблизи транспортных магистралей.

### Выводы

1 При расчете амплитуд вертикальных колебаний грунта в точках, расположенных на различном удалении от источника, необходимо учитывать особенности состава и свойств грунтов. Разница между расчетными и экспериментальными данными, по нашим оценкам, может быть более 100 %.

2 Большой разброс значений критических ускорений по данным различных авторов можно объяснить тем, что значения указываются без учета особенностей грунтовых условий (тип грунта, нарушенное или естественное сложение, условия определения показателя, например, полевые – лабораторные, наличие статической пригрузки) и т. д.

### Список литературы

- 1 Баркан, Д. Д. Динамика оснований и фундаментов / Д. Д. Баркан. – М. : Стройвоенмориздат, 1948. – 411 с.
- 2 Экспериментальная динамика сооружений. Мониторинг транспортной вибрации / Е. К. Борисов [и др.]. – Петропавловск-Камчатский, 2007. – 128 с.
- 3 Жигалин, А. Д. Техногенное вибрационное воздействие на геологическую среду / А. Д. Жигалин, Г. П. Локшин // Инж. геология. – 1987. – № 3. – С. 86–92.
- 4 Содержание и ремонт автомобильных дорог / С. Е. Кравченко [и др.]. – Минск : БНТУ, 2013. – 240 с.
- 5 Оценка вибрационного воздействия на территории города (на примере Москвы и Братиславы) / Г. П. Локшин [и др.] // Инж. геология. – 1991. – № 4. – С. 82–91.
- 6 Москва. Город и геология / под ред. В. И. Осипова, О. П. Медведева. – М., 1997. – 399 с.
- 7 Савинов, О. А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет / О. А. Савинов. – Л. : Стройиздат, 1979. – 200 с.
- 8 СНиП 2.02.01–87. Фундаменты машин с динамическими нагрузками. – М. : Стройиздат, 1986. – 82 с.
- 9 Технический кодекс установившейся практики (ТКП) 45-5.01-264–2012 (02250) Основания и фундаменты зданий и сооружений. Фундаменты при вибродинамических воздействиях. Правила проектирования. – Минск : М-во архит. и строительства Респ. Беларусь, 2013. – 114 с.
- 10 Трацевская, Е. Ю. Динамическая неустойчивость квазитекстуропных моренных грунтов / Е. Ю. Трацевская // Литосфера. – 2017. – № 1 (46). – С. 107–111.
- 11 Трацевская, Е. Ю. Экспериментальное исследование динамических характеристик неустойчивости трехфазных грунтов / Е. Ю. Трацевская // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. – 2017. – № 2. – С. 57–64.
- 12 Трацевская, Е. Ю. К вопросу о деформационных свойствах трехфазных слабосвязных грунтов в условиях динамического нагружения / Е. Ю. Трацевская // Актуальные вопросы инженерной геологии, гидрогеологии и рационального недропользования. IX Университетские геологические чтения. – Минск : Изд. центр БГУ. – 2015. – С. 146–149.
- 13 Трацевская, Е. Ю. Закономерности развития суффозионно-просадочных явлений на территории Белоруссии /

Е. Ю. Трацевская, А. Н. Галкин // Инженерная геология массивов лессовых пород : труды Междунар. науч. конф. / под ред. В. Т. Трофимова, В. А. Королева. – М., 2004. – С. 108–109.

14 **Трацевская, Е. Ю.** Геологическая опасность развития подтопления грунтов и оценка экономических рисков при ее реализации / Е. Ю. Трацевская // Природные ресурсы. – 2009. – № 1. – С. 102–109.

15 **Трацевская, Е. Ю.** Особенности формирования техногенного подтопления дисперсных грунтов / Е. Ю. Трацевская // Природные ресурсы. – 2008. – № 2. – С. 106–112.

16 **Трацевская, Е. Ю.** Влияние развития техногенного подтопления в дисперсных грунтах на надежность системы

«основание – фундамент – здание» // Е. Ю. Трацевская // Экология урбанизированных территорий. – 2011. – № 2. – С. 71–76.

17 **Трацевская, Е. Ю.** Особенности тектоники территории г. Гомеля в связи с оценкой устойчивости геологической среды / Е. Ю. Трацевская, А. Н. Галкин, И.А. Красовская // Літасфера. – 2003. – № 1 (18). – С. 78–85.

18 **Флорин, В. А.** Теория уплотнения земляных масс / В. А. Флорин. – М. : Стройиздат, 1948. – 284 с.

19 **Ridger, A. A.** A study of vibratory driving in granular soils // A. A. Ridger, G. S. Littlejohn // Géotechnique. – 1980. – Vol. XXX, № 3. – P. 269–293.

Получено 01.04.2020

**E. Yu. Tratshevskaya.** Experimental study of parameters of motor transport vibrodynamic impact on soil masses.

Field researches of vibrodynamic influence generated by a motor transport stream on a ground massif are carried out. The parameters of the vertical component of surface waves: frequency, amplitude of vibration displacements and vibration velocities are established. It is shown that the vibration accelerations occurring in the soil are less 0.0014 g. Therefore, road vibration impact does not exceed the danger threshold of reliable operation of structures located near highways. Nevertheless, the stressed state of soil masses caused by the movement of vehicles can cause their "fatigue" destruction. It is noted that when calculating the amplitudes of vertical oscillations, it is necessary to take into account the peculiarities of the composition and properties of soils.