Шутова О.А., Пономарев А.Б. Численное моделирование вибрационного воздействия автотранспорта на фундаменты зданий // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2018. – № 1. – С. 93–102. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.09

Shutova O.A., Ponomaryov A.B. Numerical modelling of vibration impact of motor transport on the bases of buildings. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2018. No. 1. Pp. 93-102. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.09

ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
№ 1, 2018
PNRPU BULLETIN.
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE
http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/

DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.09
УДК 624.1

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ АВТОТРАНСПОРТА НА ФУНДАМЕНТЫ ЗДАНИЙ

О.А. Шутова, А.Б. Пономарев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 01 ноября 2017
Принята: 10 января 2018
Опубликована: 30 марта 2018

Ключевые слова:

модуль Quake/W, программный комплекс GeoStudio, вибрация, транспорт, экспериментальные исследования, виброускорение

АННОТАЦИЯ

Рассмотрено применение модуля Quake/W программного комплекса GeoStudio для численного моделирования вибрационного воздействия, которое оказывает движущийся по улице автотранспорт на фундаменты зданий и сооружений в условиях плотной городской застройки. Описан модуль программного комплекса, рассмотрены его возможности и параметры, необходимые для численного моделировании, основное внимание уделено принципам выбора параметров и их значений для выполнения моделирования и расчета. Проанализированы принципы определения области факторного пространства с учетом рассматриваемых параметров и их граничных условий. Приведены характеристики грунтов исследуемых площадок и исходные данные для моделирования, полученные при натурном эксперименте. Рассмотрена методика моделирования вибрационного воздействия одиночного автомобиля на конструкцию фундамента, которая показывает, что при моделировании такого рода нагрузки нельзя проводить аналогии с сейсмическим воздействием. Нагрузка в данном случае будет иметь треугольный импульсный характер, при расчете и моделировании необходимо учитывать нагрузку на ось, а не массу транспортного средства. Описаны результаты, полученные при численном моделировании. На основании анализа полученных данных сделаны выводы о нелинейной зависимости виброускорения фундамента от расстояния до источника вибрации. Также численное моделирование показало, что ускорение зависит не от массы транспортного средства, как предполагалось изначально, а от максимальной нагрузки на ось. При сравнении результатов, полученных для различных типов грунтов, установлено, что наибольшее влияние автотранспорт оказывает при основаниях, сложенных из глинистых грунтов, меньшее – при основаниях из песчаных грунтов. Полученные при численном моделировании данные в дальнейшем планируется использовать для установления математических зависимостей виброускорения конструкций фундаментов зданий от исследуемых параметров.

© ПНИПУ

© Шутова Ольга Александровна – старший преподаватель, e-mail: gshperm@mail.ru.
Пономарев Андрей Будимирович – доктор технических наук, профессор, e-mail: spstf@pstu.ru.

Olga A. Shutova – Senior Lecturer, e-mail: gshperm@mail.ru.
Andrei B. Ponomaryov – Doctor of Technical Sciences, Professor, email: spstf@pstu.ru.

Shutova O.A., Ponomaryov A.B. / PNRPU Bulletin.
Construction and Architecture, no. 1 (2018), 93-102

NUMERICAL MODELLING OF VIBRATION IMPACT OF MOTOR TRANSPORT ON BASES OF BUILDINGS

O.A. Shutova, A.B. Ponomaryov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 01 November 2017
Accepted: 10 January 2018
Published: 30 March 2018

Keywords:
Quake/W module, program complex GeoStudio, vibration, transport, experimental studies, vibration acceleration

ABSTRACT

The article considers the use of Quake/W module of GeoStudio softaware complex for numerical modeling of vibration influence caused by motor transport moving down the street on bases of buildings and constructions in restrained urban conditions. A module of the software complex is described, its options and parameters necessary for numerical modeling are considered and main attention is paid to selecting the parameters and their values to perform modeling and calculations. The principles aimed at determining the regions of factor space taking into account the considered parameters and their boundary conditions are considered. Soils characteristics of the studied platforms and basic data for modeling have been obtained at natural experimental conditions. The technique enaibling the modeling of a signgle car vibration impact on the base structure is suggested. It proves that when modeling such loadings, it is impossible to draw analogies to seismic influences. In this case loading will have a triangular pulse character, so during the calculation and modeling it is necessary to consider load per axis but not the mass of a vehicle. The results received during the numerical modeling have been presented. Based on the analysis of the obtained data, it has been concluded that there is a nonlinear dependence of the base's vibration acceleration on the distance to a vibration source. Also the numerical modeling proved that the speedup depends not on the mass of a vehicle, as it has been supposed initially, but on the maximum load on an axis. When comparing the results obtained for various types of soils, it has been established that motor transport exerts the greatest impact on bases consisting of clay soils; the impact is smaller, when bases consist of sandy soils. The data obtained from the numerical modeling are planned to be used further to obtain mathematical dependences of vibration acceleration of buildings' bases on the studied parameters.

© PNRPU

Введение

На территории города основным источником постоянного вибрационного воздействия на городскую застройку является автотранспорт. Причем уровень автомобилизации растет с каждым годом. Сегодня в центральных частях городов все активнее ведется новое строительство, а улицы, проложенные много десятков лет назад и рассчитанные на гужевой транспорт, имеют небольшую ширину в «красных линиях». При этом здания нередко располагаются на расстоянии около 10 м от края проезжей части. Поток транспорта, движущийся по улицам на протяжении 10–18 ч, оказывает вибрационное воздействие на грунт и конструкции зданий, в частности – на основания и фундаменты. Поэтому оценка вибрации оснований и конструкций фундаментов, вызываемой движением автотранспорта, актуальна и требует исследования. Сегодня для оценки, прогнозирования и анализа различных процессов все чаще используют численное моделирование.

1. Основная часть

В настоящее время для численного моделирования вибрационного воздействия различных источников на основания и фундаменты зданий применяют такие программные комплексы, как ЛИРА-САПР Система ДИНАМИКА-плюс (Россия), PLAXIS 3D Dynamics (Нидерланды). Однако в иностранной научной литературе все чаще можно встретить опи-

сание расчетов на различную вибрационную нагрузку с применением модуля Quake/W программного комплекса GeoStudio (Канада).

Как и в других программных комплексах, основой создания численной модели является метод конечных элементов, когда рассматриваемый элемент грунта или конструкции разбивается на структурированные ячейки правильной формы.

В качестве модели грунта принята линейно-упругая модель (Linear-Elastic model). Для каждого рассматриваемого элемента грунта необходимо задать такие характеристики, как удельный вес, коэффициент Пуассона, коэффициент демпфирования, упругий модуль сдвига.

На рис. 1 показана расчетная схема моделирования вибрационного воздействия от прохода колеса транспортного средства для фундамента мелкого заложения. Источником воздействия может выступать, например, вибрационная нагрузка – сосредоточенная или линейно распределенная. Основной параметр вибрационной нагрузки – акселерограмма, т.е. зависимость ускорения колебаний от времени. Также к исходным данным можно отнести задание расчетной точки, для которой будет проводиться моделирование и расчет.

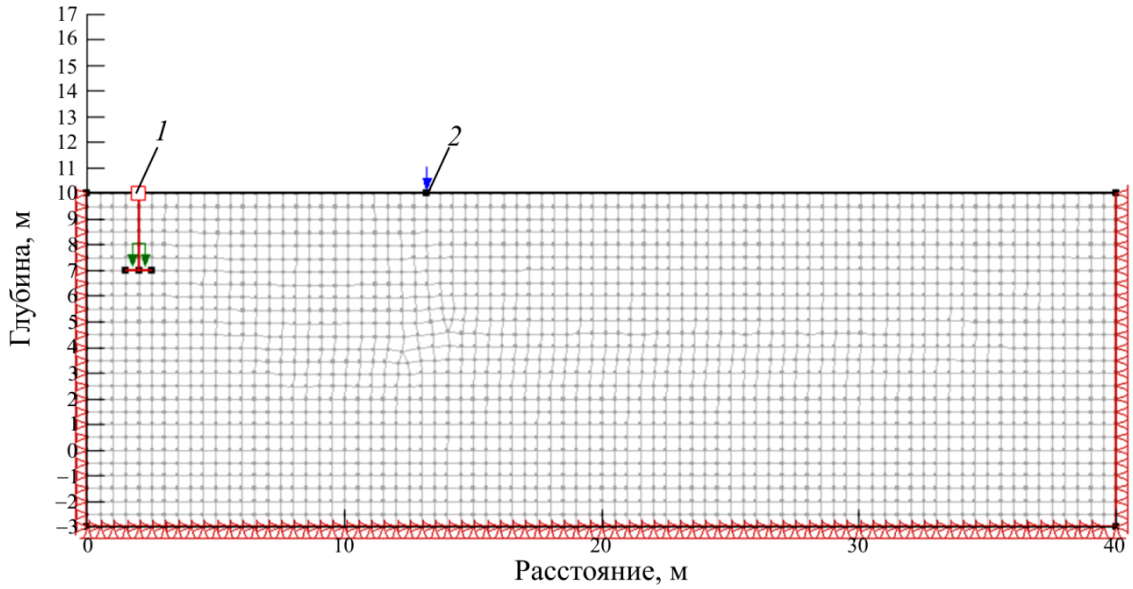

Рис. 1. Расчетная схема моделирования фундамента мелкого заложения:
1 – точка измерения виброускорения; *2* – точка приложения нагрузки
Fig. 1. Calculation scheme of modeling the shallow foundation: *1* is the point of measuring vibration acceleration; *2* is the point of loading application

В результате выполнения расчета в программном комплексе GeoStudio Quake/W выдается массив данных для каждой указанной расчетной точки. В качестве измеряемого параметра выступает, как правило, ускорение по осям *X* и *Y*. Результаты расчета выводятся в виде графической зависимости выбранного параметра от времени и сохраняются в текстовом виде.

К факторам, влияющим на величину вибрационного воздействия автотранспорта на основания и фундаменты, можно отнести расстояние до источника, массу транспортного средства, грунтовые условия, тип фундамента, состав и характер движения, состояние покрытия, климатические условия и т.д. В качестве основных параметров для исследования были выбраны масса транспортного средства, расстояние до источника и тип грунта.

При проведении натурного эксперимента [1] исследовались здания на свайных фундаментах и фундаментах мелкого заложения. Рассматриваемые площадки имеют четыре

типа геологических условий – суглинки, глины, пески, аргиллиты. Расстояние от источника до здания составило от 9,5 до 36,5 м. Измерения производились для транспортных средств массой 2; 4; 18 и 24 т. Таким образом, были выбраны исходные данные и граничные условия для выполнения численного моделирования.

Характеристики грунтов были определены из отчетов по инженерно-геологическим изысканиям на площадках, скорость волны в грунте устанавливалась с помощью многоканального анализа поверхностных волн, который проводился согласно методикам, описанным в [2–5]. Результаты определения скорости волны в верхней толще грунта приведены в статье [6].

Расчет коэффициента демпфирования и других параметров грунтов, необходимых для численного моделирования, выполнен согласно методике, приведенной в [7].

В табл. 1 представлены характеристики грунтов, полученные на основании анализа инженерно-геологических условий площадок натурного эксперимента, а также в результате проведенных расчетов.

Таблица 1

Характеристики грунтов на площадках

Table 1

Characteristics of soils on platforms

Тип грунта основания	Число пластичности	Плотность, г/см^3	Удельный вес, кН/м^3	Коэффициент Пуассона	Коэффициент демпфирования ξ	Скорость, м/с	Упругий модуль сдвига, МПа
Суглинок	12,7	1,95	19,12	0,36	0,415	130	32,32
Песок	0	2,66	26,12	0,32	0,502	120	37,62
Аргиллит	19,5	2,01	19,69	0,27	0,495	140	38,46
Глина	19,94	1,80	17,66	0,38	0,333	150	39,74

Таким образом, в качестве моделируемых параметров выступают масса транспортного средства, расстояние от источника до точки измерения и тип грунта. В табл. 2 приведена область факторного пространства для моделирования. Планирование эксперимента основано на общепринятых методах планирования экспериментов и обработки данных [8].

Таблица 2

Область факторного пространства

Table 2

Area of factorial space

Фактор	Характеристика фактора	Код фактора	Шаг варьирования	Уровни			
				1	2	3	4
Транспортное средство	Масса транспортного средства, т	x1	7,7 т	2	9,7	17,4	25,1
Расстояние	Расстояние от источника, м	x2	9 м	9,5 (мин.)	18,5	27,5	36,5 (макс.)
Грунтовые условия	Тип грунта			песок	суглинок	аргиллит	глина
	V_S, м/с	x3	10 м/с	120	130	140	150

Основная проблема, возникшая при моделировании, связана со способом задачи вибрационной нагрузки, которая в модуле Quake/W программного комплекса GeoStudio моделируется с помощью акселерограмм. Поскольку программа рассчитана в первую очередь на исследование сейсмического воздействия, заложенная в модуле акселерограмма вос-

производит воздействие землетрясения. Предварительный расчет и моделирование с корректировкой пиковых значений акселерограммы с учетом виброускорений, выявленных на максимально близком от движущегося колеса расстоянии, показали, что полученные результаты не отражают реальную картину.

В связи с этим были рассмотрены подходы к моделированию движения транспорта, применяемые при исследовании транспортных сооружений. Анализ проведенных ранее исследований [9–12] показал, что транспорт рассматривается как полосовая нагрузка или как сосредоточенная перемещающаяся нагрузка, приложенная к оси транспортного средства.

Поскольку в реальных условиях при движении транспортного потока мимо точки измерения нет непрерывности воздействия, применение полосовой нагрузки нецелесообразно. Приложение сосредоточенной перемещающейся нагрузки было рассмотрено как приложение нагрузки к колесу (одиночному или спаренному). Поэтому в работе моделируется динамическое воздействие от одиночного движущегося автомобиля в момент проезда его мимо рассматриваемой точки.

Согласно ГОСТ Р 52748–2007 «Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения и габариты приближения» при расчетах дорожного и земляного полотна равномерно распределенная нагрузка не учитывается, прикладываются только точечные нагрузки от колес без учета размеров пятна контакта колес с дорожным полотном. Для учета динамического характера нагрузки вводится коэффициент динамичности [13]. Значение коэффициента динамичности приведено в ОДН 218.046–01 «Проектирование нежестких дорожных одежд» и составляет 1,3. Принятая расчетная схема показана на рис. 2.

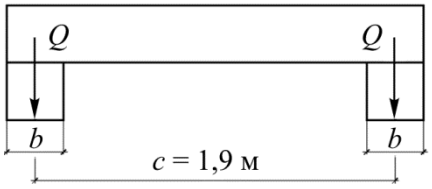

Рис. 2. Принятая расчетная схема нагрузки:
b – ширина пятна контакта колеса, м;
c – ширина колеи нагрузки, м

Fig. 2. The accepted calculation scheme of loading, sizes in meters: *b* is the width of a wheel's contact area; *c* is the loading track width

В принятой схеме рассматривается задняя ось автомобиля с учетом динамической нагрузки. При такой схеме в отсутствие других источников будут возникать детерминированные колебания грунтовой среды. Нагрузка будет иметь треугольный импульсный характер. Для установления времени действия нагрузки необходимо определить длину пятна контакта колеса с дорожным полотном. Реальное пятно контакта колеса имеет форму эллипса, но для определения его размеров допускается принимать равновеликий по площади гибкий круговой штамп диаметром D, передающий равномерно распределенную нагрузку величиной p, значения которой приведены в ОДН 218.046–01 «Проектирование нежестких дорожных одежд». Величину p принимают равной давлению воздуха в шинах, обычно 0,6 МПа. Диаметр расчетного отпечатка шины D, см, определяют из зависимости

$$D = \sqrt{\frac{40Q_{\text{расч}}}{\pi \cdot p}}, \qquad (1)$$

где $Q_{\text{расч}}$ – расчетная величина нагрузки, передаваемой колесом на поверхность покрытия, кН; p – давление воздуха в шине, МПа.

Ширина пятна *b* приведена в табл. 2 в зависимости от типа автомобиля. Тогда, не учитывая рисунок протектора шины, считаем, что площадь круглого отпечатка равна площади эллиптического пятна контакта:

$$S_{\text{круга}} = S_{\text{эллипса}},$$

$$\pi \cdot \frac{D^2}{4} = \pi \cdot \frac{a}{2} \cdot \frac{b}{2},$$

$$a = \frac{40 Q_{\text{расч}}}{\pi \cdot p \cdot b}. \quad (2)$$

Время действия нагрузки, с, определяют по формуле для равномерного прямолинейного движения:

$$t = \frac{a}{v_{\text{ср}}}, \quad (3)$$

Принятые расчетные схемы автомобилей приведены в табл. 3.

По формулам (1)–(3) с учетом средней скорости движения автомобиля $V_{\text{ср}}$ = 28,8 км/ч (8 м/с) определяются длина пятна контакта и время действия нагрузки, результаты приведены в табл. 4.

Таблица 3

Расчетные схемы автомобилей

Table 3

Calculation schemes of cars

Масса, т	Нагрузка на ось, т			Нагрузка на колесо, т/кН	Динамическая нагрузка на колесо, кН
	1	2	3		
2,0	1,0	1,0	–	0,5/5,0	6,5
9,7	3,0	6,7	–	3,46/34,6	45,0
17,4	5,0	12,4	–	6,2/62,0	80,6
25,0	5,0	10	10	5,0/50,0	65,0

* Задняя ось автомобилей массой 9,7; 17,4; 25 т имеет спаренные колеса.

Таблица 4

Расчетные параметры движения автомобиля

Table 4

Calculated parameters of the car's movement

Масса, т	Ширина пятна контакта колеса, см	Длина пятна контакта, см	Время действия нагрузки, с
2,0	20	6,9	0,00863
9,7	40	23,9	0,02986
17,4	60	28,5	0,03565
25,0	60	23,0	0,02875

Как было отмечено выше, нагрузка от движущегося колеса имеет треугольный импульсный характер, поэтому акселерограмма также имеет вид треугольника. Она строится с учетом значений, приведенных в табл. 2 и 3, согласно методике руководства к модулю QUAKE/W 2007 [14]. На рис. 3 приведен пример акселерограммы от движения автомобиля массой 25 т.

Для оценки возможности применения модуля Quake/W программного комплекса GeoStudio при исследовании вибрационного воздействия автотранспорта на основания и фундаменты зданий авторами была решена тестовая задача [15]. Полученные результаты показали, что значения натурного эксперимента превышают значения численного моделирования не более чем на 40 %, что говорит о возможности применения данного комплекса для решения задач, связанных с моделированием вибрационного воздействия автотранспорта.

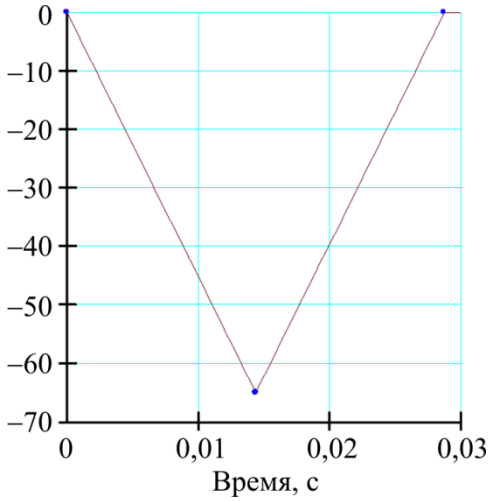

Рис. 3. Акселерограмма, имитирующая проход колеса автомобиля массой 25 т
Fig. 3. Accelerogram imitating a wheel's passing of the car weighing 25 t

С учетом указанных исходных данных и граничных условий было выполнено численное моделирование для свайного фундамента и фундамента мелкого заложения для четырех типов грунтов. В результате моделирования получены величины горизонтальной и вертикальной составляющей виброускорения (табл. 5).

Таблица 5

Результаты численного моделирования для фундамента мелкого заложения

Table 5

Results of numerical modeling for the shallow foundation

Вид нагрузки, масса, т	Тип грунтовых условий	Виброускорение (горизонтальная составляющая), м/с^2, при расстоянии до источника, м				Виброускорение (вертикальная составляющая), м/с^2, при расстоянии до источника, м			
		9,5	18,5	27,5	36,5	9,5	18,5	27,5	36,5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Фундамент мелкого заложения									
2,0	суглинок	0,006314	0,00652	0,006672	0,005744	0,004974	0,004902	0,003938	0,004339
9,7		0,007955	0,008259	0,008421	0,007301	0,006294	0,006205	0,005017	0,005522
17,4		0,0137	0,014347	0,014543	0,012752	0,010914	0,010764	0,008848	0,009661
25,0		0,011785	0,012318	0,012503	0,010935	0,009374	0,009245	0,007566	0,008281
2,0	песок	0,003833	0,004036	0,004486	0,00415	0,002927	0,002769	0,002727	0,002744
9,7		0,004847	0,005158	0,005687	0,005278	0,003715	0,00351	0,003473	0,003492
17,4		0,008394	0,009086	0,009892	0,009225	0,006471	0,006135	0,006086	0,006112
25,0		0,007212	0,007777	0,00849	0,007909	0,005552	0,005259	0,005215	0,005238
2,0	глина	0,008621	0,008714	0,009357	0,008992	0,005179	0,005364	0,005313	0,005113
9,7		0,010992	0,011109	0,011884	0,011445	0,006594	0,006821	0,006725	0,006507
17,4		0,019306	0,019493	0,020728	0,02003	0,011549	0,011919	0,011665	0,011388
25,0		0,016535	0,016698	0,01778	0,017169	0,009897	0,01022	0,010018	0,009761
2,0	аргиллит	0,005456	0,005188	0,005175	0,005146	0,003965	0,00428	0,003922	0,003904
9,7		0,006928	0,006601	0,006584	0,006549	0,005055	0,005424	0,004992	0,004969
17,4		0,012078	0,011548	0,011516	0,011461	0,008872	0,00943	0,008735	0,008696
25,0		0,010362	0,009899	0,009872	0,009824	0,0076	0,008094	0,007487	0,007454

Окончание табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Свайный фундамент									
2,0	суглинок	0,006314	0,00652	0,006672	0,005744	0,012915	0,012781	0,012754	0,012846
9,7		0,00672	0,006054	0,006191	0,006373	0,016432	0,016267	0,016233	0,016349
17,4		0,00855	0,007697	0,007899	0,008115	0,028741	0,02847	0,028409	0,028611
25,0		0,012821	0,011532	0,011884	0,012179	0,024638	0,024402	0,02435	0,024524
2,0	песок	0,014957	0,01345	0,013877	0,014211	0,008018	0,008037	0,008035	0,008031
9,7		0,005375	0,005104	0,005104	0,00514	0,010205	0,01023	0,010226	0,010221
17,4		0,006816	0,006502	0,0065	0,006541	0,017863	0,017905	0,017897	0,017888
25,0		0,01186	0,011394	0,011387	0,011447	0,015311	0,015347	0,01534	0,015332
2,0	глина	0,010179	0,009763	0,009758	0,009812	0,016797	0,016857	0,01692	0,016853
9,7		0,010333	0,00836	0,008511	0,008664	0,021383	0,021449	0,021532	0,021449
17,4		0,013123	0,010726	0,01083	0,011036	0,037433	0,037521	0,037676	0,037536
25,0		0,022886	0,019006	0,018946	0,019335	0,032083	0,032164	0,032295	0,032173
2,0	аргиллит	0,019632	0,016246	0,01624	0,016569	0,011662	0,011616	0,01163	0,011692
9,7		0,006364	0,006088	0,006015	0,006152	0,014842	0,014786	0,014803	0,014881
17,4		0,00807	0,007746	0,00766	0,00783	0,02597	0,025879	0,025907	0,026042
25,0		0,014042	0,013548	0,013415	0,013702	0,022261	0,022181	0,022205	0,022322

На основании анализа зависимостей виброускорения от массы транспортного средства было выявлено, что максимальные значения вертикальной и горизонтальной составляющей для фундаментов обоих типов соответствуют массе транспортного средства 17,4 т.

Анализ зависимости виброускорения от расстояния показывает, что в случае фундаментов мелкого заложения вертикальная и горизонтальная составляющие имеют максимальное значение при расстоянии 18,5 м от источника. В случае свайного фундамента при расстоянии 18,5 м вертикальная составляющая также имеет максимальное значение, а горизонтальная – минимальное.

Анализ зависимости виброускорения от типа грунта показал, что максимальные значения горизонтальной и вертикальной составляющих для фундаментов обоих типов наблюдаются при залегании в основании глины, минимальные – в основании песка.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. При увеличении расстояния от точки измерения до источника в случае фундамента мелкого заложения значения горизонтальной и вертикальной составляющей виброускорения, вертикальной составляющей в случае свайного фундамента нарастают на участке до 18,5 м, а затем уменьшаются. Значения горизонтальной составляющей виброускорения свайного фундамента снижаются на участке 18,5 м, а затем увеличиваются.

2. Наибольшее влияние автотранспорт оказывает на основания, сложенные из глинистых грунтов, меньшее – на песчаные основания.

3. Предположение, что масса транспортного средства прямо пропорциональна виброускорению исследуемой точки, не подтвердилось, так как максимальные значения ускорения не соответствуют максимальной массе. Влияние на величину виброускорения оказывает не масса транспортного средства, а нагрузка на ось и колесо. В данном случае наблюдается прямая связь между величинами.

4. Для более детальной оценки результатов необходимо сравнение с данными натурного эксперимента и получение математических зависимостей.

Библиографический список

1. Шутова О.А. Анализ результатов исследования вибрации конструкций фундаментов, вызываемой автотранспортом, на примере центральной части г. Перми // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2014. – № 4. – С. 41–45.

2. Антипов В.В., Офрихтер В.Г. Современные неразрушающие методы изучения инженерно-геологического разреза // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 37–49.

3. Park C.B., Miller R.D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves // Geophysics. – 1999. – Vol. 64, no. 3. – P. 800–808.

4. Combined use of active and passive surface waves / C.B. Park, R.D. Miller, N. Ryden, J. Xia, J. Ivanov // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 2005. – Vol. 10, iss. 3. – P. 323–334.

5. Park C.B., Miller, R.D. Roadside passive multichannel analysis of surface waves (MASW) // Journal of Environmental & Engineering Geophysics. – 2008. – Vol. 13, iss. 1. – P. 1–11.

6. Антипов В.В., Офрихтер В.Г., Шутова О.А. Исследование верхней части разреза грунтовой толщи экспресс-методами волнового анализа // Вестник МГСУ. – 2016. – № 12. – С. 44–60.

7. Kramer S.L. Geotechnical earthquake engineering. – Prentice-Hall, Inc, 1996. – 655 p.

8. Малышев В.П. Вероятностно-детерминированное планирование эксперимента. – Алма-Ата: Наука, 1981. – 116 с.

9. Углова Е.В. Теоретические и методологические основы оценки остаточного усталостного ресурса асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог: автореф. дис. … д-ра техн. наук. – Волгоград, 2009. – 38 с.

10. Доронин Ф.А., Индейкин А.В. Исследование динамики пролетных строений моста с учетом его совместной работы с опорами // Бюллетень результатов научных исследований. – 2012. – № 3. – С. 131–136.

11. Кадисов Г.М., Чернышов В.В. Конечно-элементное моделирование динамики мостов при воздействии подвижной нагрузки // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – № 9. – С. 56–63.

12. Агейкин Я.С., Вольская Н.С. Проблемы представления характеристик грунтов в математических моделях движения колесных машин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2005. – № 1. – С. 44–53.

13. Баженова А.Ю., Смирнов А.В. Состояние проблемы учета динамических процессов в расчетах дорожных одежд автомобильных дорог на прочность // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2016. – № 4. – С. 96–102.

14. Dynamic Modeling with QUAKE/W 2007. An Engineering Methodology / GEO-SLOPE International, Ltd. – Calgary, Alberta, Canada, 2009. – 237 p.

15. Шутова О.А., Пономарев А.Б. Анализ возможности применения программного комплекса GeoStudio QUAKE/W для моделирования техногенной вибрации // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2016. – № 3. – С. 59–64.

References

1. Shutova O.A. Analiz rezul'tatov issledovaniia vibratsii konstruktsii fundamentov, vyzyvaemoi avtotransportom, na primere tsentral'noi chasti g. Permi [The analysis of results of a research of the vibration of structures of the bases caused by motor transport on the example of the central part of Perm]. *Prirodnye i tekhnogennye riski. Bezopasnost' sooruzhenii*, 2014, no. 4, pp. 41-45.

2. Antipov V.V., Ofrikhter V.G. Sovremennye nerazrushaiushchie metody izucheniia inzhenerno-geologicheskogo razreza [Modern nondestructive methods of studying of an engineering-geological section]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatelskogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2016. vol. 7, no. 2, pp. 37-49.

3. Park C.B., Miller R.D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 1999, vol. 64, no. 3, pp. 800-808.

4. Park C.B., Miller R.D., Ryden N., Xia J., Ivanov J. Combined use of active and passive surface waves. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics,* 2005, vol. 10, no. 3, pp. 323–334.

5. Park C.B., Miller, R.D. Roadside passive multichannel analysis of surface waves (MASW). *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 2008, vol. 13, no. 1, pp. 1-11.

6. Antipov V.V., Ofrikhter V.G., Shutova O.A. Issledovanie verkhnei chasti razreza gruntovoi tolshchi ekspress-metodami volnovogo analiza [Research of the top part of a section of soil thickness by express methods of the wave analysis]. *Vestnik MGSU*, 2016, mo. 12, pp. 44-60.

7. Kramer S.L. Geotechnical earthquake engineering. Prentice-Hall, Inc, 1996, 655 p.

8. Malyshev V.P. Verojatnostno-determinirovannoe planirovanie jeksperimenta [Probabilistic-deterministic planning of the experiment]. Alma-Ata, Nauka, 1981, 116 p.

9. Uglova E.V. Teoreticheskie i metodologicheskie osnovy ocenki ostatochnogo ustalostnogo resursa asfal'tobetonnyh pokrytij avtomobil'nyh dorog [Theoretical and methodological framework for the assessment of residual fatigue life of asphalt concrete pavements of roads]. Abstract of Doctor;s degree dissertation. Volgograd, 2009, 38 p.

10. Doronin F.A., Indejkin A.V. Issledovanie dinamiki proljotnyh stroenij mosta s uchjotom ego sovmestnoj raboty s oporami [Study of the dynamics spans of the bridge, given its joint work with the supports]. *Bulletin Of Scientific Research Results*, 2012, no. 3, pp. 131-136.

11. Kadisov G.M., Chernyshov V.V. Konechno-jelementnoe modelirovanie dinamiki mostov pri vozdejstvii podvizhnoj nagruzki [Finite element modeling of dynamics of bridges when subjected to a moving load]. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal,* 2013, no. 9, pp. 56-63.

12. Agejkin Ja.S., Vol'skaja N.S. Problemy predstavlenija harakteristik gruntov v matematicheskih modeljah dvizhenija koljosnyh mashin [Problems of representation of the soil characteristics in mathematical models of the motion of wheeled vehicles]. *Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Mashinostroenie,* 2005, no. 1, pp. 44-53.

13. Bazhenova A.Ju., Smirnov A.V. Sostojanie problemy ucheta dinamicheskih processov v raschetah dorozhnyh odezhd avtomobil'nyh dorog na prochnost' [State of the problem accounting for dynamic processes in the calculation of road pavements of automobile roads for durability]. *Vestnik Sibirskoj gosudarstvennoj avtomobil'no-dorozhnoj akademii*, 2016, no. 4, pp. 96-102.

14. Dynamic Modeling with QUAKE/W 2007. An Engineering Methodology. – GEO-SLOPE International, Ltd., Calgary, Alberta, Canada, 2009, 237 p.

15. Shutova O.A., Ponomarev A.B. Analiz vozmozhnosti primeneniia programmnogo kompleksa GeoStudio QUAKE/W dlia modelirovaniia tekhnogennoi vibratsii [Analysis of a possibility of application of the program GeoStudio QUAKE/W complex for modeling of technogenic vibration]. *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*, 2016, no. 3, pp. 59-64.