



УДК 624.131

**Антипов В.В.** – студент

E-mail: [seekerva@mail.ru](mailto:seekerva@mail.ru)

**Офрихтер В.Г.** – доктор технических наук, доцент

E-mail: [ofrikhter@mail.ru](mailto:ofrikhter@mail.ru)

**Пономарев А.Б.** – доктор технических наук, профессор

E-mail: [spstf@pstu.ru](mailto:spstf@pstu.ru)

**Шутова О.А.** – старший преподаватель

E-mail: [gshperm@mail.ru](mailto:gshperm@mail.ru)

**Пермский национальный исследовательский политехнический университет**

Адрес организации: 614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29

### **Численное моделирование динамического воздействия от одиночного транспортного средства на существующее здание**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Цель исследования – выявить возможность построения адекватной численной модели динамического воздействия одиночного ТС на существующее здание на основе данных, полученных оперативными методами многоканального анализа поверхностных волн. Исследование воздействия автотранспорта на основания и фундаменты зданий и сооружений является актуальным, потому что в России на данный момент отсутствует нормирование вибрационного воздействия автотранспорта.

*Результаты.* Основные результаты исследования состоят в получении значений виброускорений в расчетной точке на фундаменте здания при численном моделировании, которые оказались достаточно близки к значениям натурального эксперимента: для грузового ТС и автобуса расхождения не более 11 % для максимальной вертикальной компоненты виброускорения и не более 30 % для максимальной горизонтальной.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной области состоит в возможности использования в качестве исходных данных результатов многоканального анализа поверхностных волн и получения корректных результатов при численном моделировании динамического воздействия автотранспорта на существующее здание.

**Ключевые слова:** многоканальный анализ поверхностных волн, МАПВ, пятно контакта колеса, демпфирование грунта, динамическое воздействие на здание, численное моделирование.

#### **Введение**

Основными источниками техногенных вибраций, возникающих на существующих зданиях и сооружениях в городских условиях, являются различные строительные-монтажные работы, динамическое производственное оборудование и автомобильный транспорт. Для первых двух источников имеются конкретные нормы и правилами учета их воздействия на основания и фундаменты зданий и сооружений (забивка свай – ВСН 490-87 Проектирование и устройство свайных фундаментов и шпунтовых ограждений в условиях реконструкции промышленных предприятий и городской застройки; динамическое оборудование – СП 26.13330.2012 Фундаменты машин с динамическими воздействиями. Актуализированная редакция СНиП 2.02.05-87). Но для автомобильного транспорта в России на данный момент отсутствует нормирование вибрационного воздействия, в то время как влияние рельсового транспорта рассмотрено в нормативных документах (СП 23-105-2004 Оценка вибрации при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов метрополитена, ГОСТ Р 52892-2007 Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию). Наличие данной проблемы свидетельствует об актуальности исследования воздействия автомобильного транспорта на основания и фундаменты зданий.

При проведении исследований было целью построить адекватную численную модель на основе имеющихся данных натуральных экспериментов для дальнейшего использования при оценке вибраций от автомобильных транспортных средств (ТС) на существующие здания.

### Объект исследования

В качестве существующего здания для проведения численного моделирования выбран учебный корпус строительного факультета ПНИПУ по адресу г. Пермь, ул. Куйбышева, д. 109 (пересечение ул. Куйбышева и ул. Чкалова). Корпус представляет собой 4-этажное общественное здание с подвалом, имеющее размеры в плане  $30 \times 52,1$  м и высоту от уровня земли до уровня кровли 21,5 м. Здание расположено перпендикулярно проезжей части ул. Чкалова на расстоянии 18,4 м от края проезжей части (25,9 м от центра проезжей части) (рис. 1).

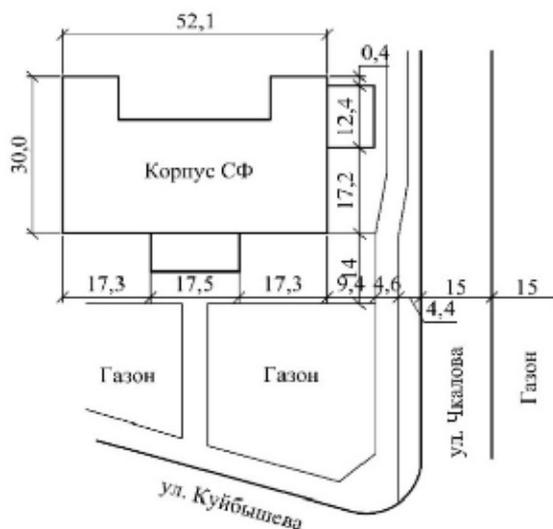


Рис. 1. Схема исследуемой площадки (размеры в метрах)

Оценка адекватности построенной модели проводилась с помощью результатов натурального эксперимента по определению вертикальных и горизонтальных компонент виброускорения от приближения, проезда и удаления одиночного ТС различной массы [1]. Фиксация прохода ТС производилась для ближайшей к зданию полосы (20,9 м от края здания до центра полосы). Движение транспорта по другим полосам в момент выполнения замеров отсутствовало.

### Расчетная схема проезжающего автомобиля

В качестве расчётной схемы нагрузки на основание от ТС принята схема приложения нагрузки от колес одной оси двусосной грузовой тележки по типу нагрузки АК, которая в соответствии с п. 5.2 ГОСТ Р 52748-2007 Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения и габариты приближения используется при расчетах земляного полотна и др. элементов. При этом равномерно распределенная нагрузка вдоль колеи колес не учитывается, а прикладываются только точечные нагрузки от колес (п. 5.2 ГОСТ Р 52748-2007) без учета размеров пятна контакта колес с дорожным полотном. Принятая расчетная схема для грузового ТС приведена на рис. 2.

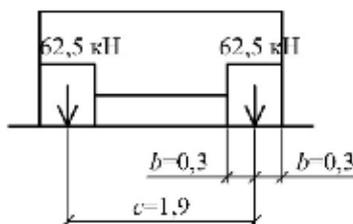


Рис. 2. Принятая расчетная схема приложения нагрузки от колес одной оси грузового ТС, размеры в метрах:  $b$  – ширина пятна контакта колеса;  $c$  – ширина колеи нагрузки

В данной схеме (рис. 2) рассматривается одна из двух осей грузового транспортного средства массой 25 т, состоящей из четырех колес. Нагрузка на ось принята 125 кН и 62,5 кН на пару колес. При такой схеме отсутствуют иные источники вибрационных колебаний, кроме ТС, следовательно, вызванные колебания среды будут иметь детерминированный характер. Вертикальная колесная нагрузка задавалась в виде треугольного импульса, время действия которого определялось с учетом размеров пятна контакта колеса с дорожным полотном. Согласно определению термина «пятно контакта колеса» по ГОСТ 17697-72 Автомобили. Качение колеса. Термины и определения, реальная площадь пятна имеет эллиптическую форму и учитывает рисунок протектора. Форма эллипса пятна при качении колеса достаточно близка к прямоугольной, и в расчетных моделях часто принимается гипотеза о прямоугольной форме пятна [2]. Кроме того, при определении его размеров допускается использовать равновеликий по площади пятну контакта гибкий круговой штамп диаметром  $D$  (без учета рисунка протектора), передающий равномерно распределенную нагрузку  $p$  (п. 3.18, ОДН 218.046-01 Проектирование нежестких дорожных одежд). Величина  $p$  принимается равной давлению воздуха в шинах (чаще всего 0,6 МПа). Диаметр расчетного отпечатка шины  $D$  согласно (3.4) ОДН 218.046-01:

$$D = \sqrt{\frac{40Q_{расч}}{p}} \text{ см,} \quad (1)$$

где  $Q_{расч}$  – расчетная величина нагрузки от колеса на дорожное покрытие, кН;  
 $p$  – давление воздуха в шине, МПа.

Ширина пятна контакта по расчетной схеме на рис. 2 принята равной ширине шины для ТС большой массы  $b=30$  см и для ТС малой массы  $b=20$  см. Тогда принимаем площадь круглого отпечатка равной площади эллипса без учета рисунка протектора шины и после математических преобразований имеем формулу расчета длины зоны контакта:

$$a = \frac{40Q_{расч}}{p b} \text{ см,} \quad (2)$$

Для каждого типа ТС принята средняя скорость равномерного прямолинейного движения  $v_{ср}=39,6$  км/ч = 11 м/с. Расчет длительности действия нагрузки приведен в табл. 1.

Таблица 1

Расчет параметров нагрузки от оси ТС

Тип ТС	Грузовое ТС	Автобус	Легковое ТС
Масса ТС, т	25	14	2
Нагрузка на полуось, $Q$ , кН	62,5	35	5
Расчетная нагрузка на колесо, $Q_{расч}$ , кН	31,25	17,5	5
Давление воздуха в шине, $p$ , МПа	0,6	0,6	0,6
Ширина пятна контакта, $b$ , см	30	30	20
Длина пятна контакта, $a$ , см	22,1	16,0	5,3
Время действия нагрузки в точке, $t$ , с	0,020	0,011	0,005

### Расчетная схема фундамента корпуса СФ ПНИПУ

По подошве крайнего фундамента нагрузка принята  $160$  кН/м<sup>2</sup> без учета веса фундамента по результатам сбора нагрузок от вышележащих конструкций. Основные элементы сборного ленточного фундамента: фундаментные блоки ФБС 6-5-6 и фундаментная подушка ФЛ 16-24-1. Глубина заложения фундамента принята 3 м. Для учета продольной жесткости здания (в направлении, перпендикулярном дороге) и получения корректных значений горизонтальных компонент виброускорений, в уровнях пола подвала и первого этажей введены плитные элементы толщиной 0,5 м и высотой 3 м. Принятая расчетная схема фундамента здания СФ ПНИПУ представлена на рис. 3.

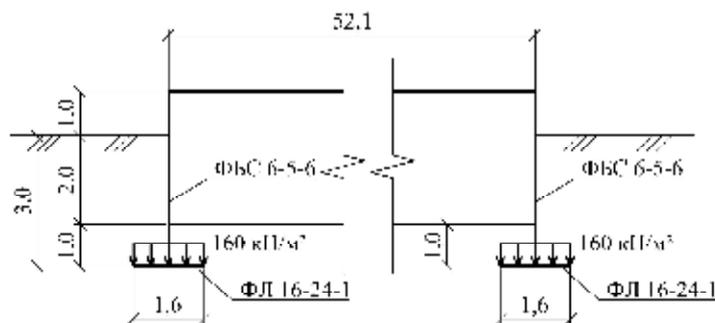


Рис. 3. Расчетная схема фундамента корпуса СФ (размеры в метрах)

### Грунтовые условия площадки и учет демпфирующих свойств среды

По данным отчета об инженерно-геологических изысканиях условия исследуемой площадки представлены двумя инженерно-геологическими элементами:

- ИГЭ-1: суглинок коричневый, легкий, песчанистый, от твердого до текучепластичного (с примесями строительного мусора), мощность слоя около 5 м;
- ИГЭ-2: глина серовато-коричневая, легкая, пылеватая, от полутвердой в кровле до мягкопластичной, мощность слоя около 8 м.

Для проведения численного динамического расчета кроме физико-механических характеристик из отчета инженерно-геологических изысканий необходимы дополнительные расчетные характеристики грунтовых слоев при малых деформациях, которые обычно не определяются при проведении инженерно-геологических изысканий: скорости продольных и поперечных волн и коэффициент Пуассона для зоны малых скоростей верхней части разреза грунтовой толщи [1]. В СП 23-105-2004 приведены нормативные скорости поперечных и продольных волн для различных грунтов. Но они имеют слишком большие интервалы разброса, что приведет при их использовании в расчетах к искажению результатов. Поэтому были выполнены дополнительные экспериментальные исследования выбранных площадок оперативными методами многоканального анализа поверхностных волн (МАПВ) [3-6]. Полученные результаты представлены в [7] и использованы при численном моделировании.

Учет поглощающих свойств грунтовой среды осуществлен с использованием коэффициентов рэлеевского демпфирования  $a$  и  $b$  в уравнении вида [8]:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K], \quad (3)$$

где  $[C]$ ,  $[M]$ ,  $[K]$  – соответственно матрицы демпфирования, массы и жесткости;

$\alpha$  – рэлеевский коэффициент демпфирования по массе;

$\beta$  – рэлеевский коэффициент демпфирования по жесткости.

Для аналитического расчета искомых коэффициентов использована зависимость [9]:

$$\alpha + \beta \omega_i^2 = 2\omega_i \zeta_i, \quad (4)$$

где  $\omega_i$  – собственная частота колебаний слоя грунта  $i$ -ой моды на графике коэффициент демпфирования – частота, по формуле (5) [10], рад/с;

$\zeta_i$  – коэффициент демпфирования  $i$ -ой моды, рассчитываемый по формулам, указанным в [11].

$$\omega_i = \frac{\rho \bar{V}_s}{2H} (1 + 2i), i = 0, 1, 2, \dots, \neq, \quad (5)$$

где  $\bar{V}_s$  – средняя скорость волн сдвига грунтового слоя на глубине  $H$ , м/с;

$H$  – глубина нижней отметки расчетного слоя грунта, м.

Искомые коэффициенты рэлеевского демпфирования находились из системы двух уравнений (для фундаментальной и первой моды) для каждого расчетного слоя грунта. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

#### Определение коэффициентов рэлеевского демпфирования

Слой	$V_s$ , м/с	$H$ , м	$\chi$	$\omega_0$ , рад/с	$\omega_1$ , рад/с	$a$	$b$
1	144,5	5	0,282	45,373	136,119	19,193	0,0031
2	289,9	13	0,248	35,011	105,033	13,024	0,0035

### Численное моделирование

Численное моделирование от проезда одиночного автомобиля осуществлялось в Plaxis 2D 2009 в виде плоской задачи. Характеристики, задаваемые для плитных элементов, указаны в табл. 3. Характеристики материалов грунтовой среды приведены в табл. 4. Для расчета принята линейно-упругая модель грунтовых слоев для решения задачи Лэмба при малых деформациях и малом времени приложения нагрузки в соответствии с [12], в обоих случаях дренированный тип поведения. Нижняя расчетная отметка второго слоя принята на глубине 13 м на основе сравнительного анализа результатов МАПВ [7]. Моделирование реального трения между элементами фундамента и грунтом осуществлялось посредством интерфейсных элементов.

Таблица 3

#### Расчетные характеристики элементов корпуса СФ

Наименование		Ед. изм.	Фунд. блоки ФБС 6-5-6	Фунд. подушка ФЛ 16-24-1	Стена
Тип элемента			Плитный	Плитный	Плитный
Осевая жесткость	$EA$	кН/м	$1,14 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^7$	$9,0 \cdot 10^7$
Изгибная жесткость	$EI$	кНм <sup>2</sup> /м	$2,371 \cdot 10^5$	$3,125 \cdot 10^5$	$6,75 \cdot 10^7$
Коэфф. Пуассона	$\nu$		0,15	0,15	0,15
Толщина	$d$		0,5	0,5	3,0
Вес	$w$	кН/м/м	4	15,4	0

Таблица 4

#### Параметры материалов грунтовой среды

Наименование		Ед. изм.	Слой 1	Слой 2
Тип грунта			Суглинок	Глина
Модель			Линейно-упругая	Линейно-упругая
Тип поведения			Дренир.	Дренир.
Удельный вес грунта	$\rho$	кН/м <sup>3</sup>	18,000	20,000
Модуль Юнга	$E$	кН/м <sup>2</sup>	104300	480200
Коэфф. отн. попер. деформ.	$\mu$		0,36	0,4
Скорость поперечной волны	$V_s$	м/с	144,5	289,9
Скорость продольной волны	$V_p$	м/с	309,0	710,1
Модуль сдвига	$G$	кН/м <sup>2</sup>	38350	171500
Коэффициент пористости	$e_{init}$		0,7	0,5
Демпфирование по Рэлею	$\alpha$		19,193	13,024
То же	$\beta$		0,0031	0,0035

Задание граничных условий осуществлялось с использованием стандартных условий закрепления, а также поглощающих границ для предотвращения появления отраженных волн. Геометрическая модель в программном комплексе Plaxis приведена на рис. 4. Сетка конечных элементов принята мелкая (fine) с двукратным уменьшением около плитных элементов и вблизи поверхности, по которой распространяется волна Рэлея.



Рис. 4. Геометрическая модель в программном комплексе Plaxis 2D

Уровень грунтовых вод неизвестен, поэтому давление воды при численном моделировании не учитывалось. Начальные напряжения от бокового давления грунта рассчитывались с использованием коэффициента бокового давления  $K_0$ , определяемого по формуле (9.2) СП 22.13330.2011 для каждого слоя:  $K_{01}=0,563$ ,  $K_{02}=0,667$ .

Расчетная точка А (0;0) (рис. 4) установлена на обресе ближайшего к дороге фундамента. Время динамической фазы расчета составило 0,5 с.

Полученные результаты моделирования сравнивались с данными натурального эксперимента по замеру виброускорений на корпусе строительного факультета от проезда ТС [1]. Сравнение максимальных значений вертикальных и горизонтальных компонент ускорений представлено в табл. 5. Графики зависимости компонент ускорений от времени приведены на рис. 5.

Таблица 5

#### Результаты моделирования воздействия от одной оси одиночного ТС

Тип автомобиля, масса, т	Натурный эксперимент		Численное моделирование	
	$a_y, \text{ м/с}^2$	$a_x, \text{ м/с}^2$	$a_y, \text{ м/с}^2$	$a_x, \text{ м/с}^2$
Грузовое ТС, 25 т	0,04403	0,02166	0,038	0,020
Автобус, 14 т	0,01328	0,01011	0,012	0,006
Легковое ТС, 2 т	0,00360	0,00486	0,002	0,001

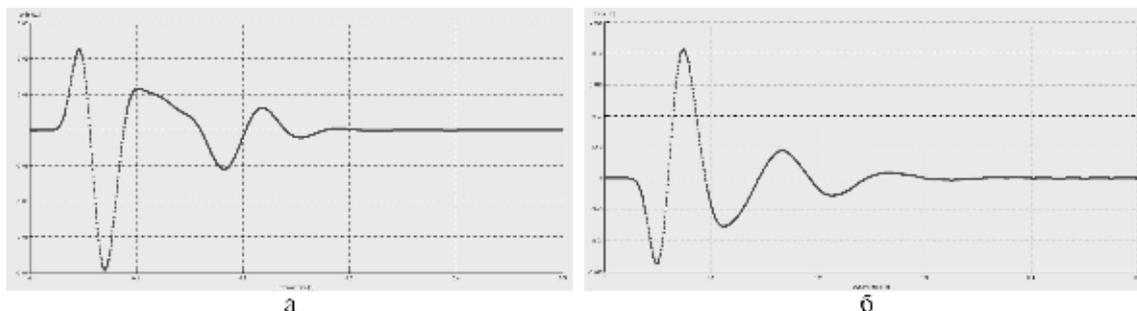


Рис. 5. Графики зависимости вертикального (а) и горизонтального (б) виброускорения от времени, на обресе ближайшего к проезжей части фундамента, для грузового ТС

#### Выводы

1. Отклонение полученных результатов численного моделирования для грузового ТС и автобуса от данных натурального эксперимента для вертикального ускорения не более 11 %, а для горизонтального не более 30 %.

2. Необходимы дополнительные исследования вопроса точного расчета размеров пятна контакта колеса с дорожным полотном для повышения точности выходных данных. Также требуются исследования влияния ТС на этапах приближения и удаления к расчётной точке.

3. Составленная численная модель адекватна при проезде одиночного автомобильного ТС большой массы (18 т и более). Требуется дополнительное уточнение разработанной модели для ТС малой массы (менее 2 т).

4. Результаты исследования площадок экспресс методом многоканального анализа поверхностных волн можно эффективно применять в качестве исходных данных для получения корректных результатов при численном моделировании динамического воздействия автотранспорта на существующее здание

#### Список библиографических ссылок

1. Шутова О. А., Пономарев А. Б., Антипов В. В., Офрихтер В. Г. Применение неразрушающих методов определения механических характеристик грунта при численном моделировании динамических воздействий на существующее здание // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2017. № 1 (32). С. 74–78.

2. Абузов В. И., Балабина Т. А., Чепурной С. И. Общие вопросы взаимодействия эластичного колеса с жесткой опорной поверхностью // Известия МГТУ. 2012. № 2 (14). С. 392–397.
3. Антипов В. В., Офрихтер В. Г. Современные неразрушающие методы изучения инженерно-геологического разреза // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2016. Т. 7, № 2. С. 37–49.
4. Антипов В. В., Офрихтер В. Г. Совершенствование методов волнового анализа грунтовой толщи // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2016. Т. 1. С. 109–119.
5. Park C. B., Carnevale M. Optimum MASW survey – revisit after a decade of use // GeoFlorida. 2010. P. 1303–1312.
6. Ofrikhter V. G., Ofrikhter I. V. Investigation of municipal solid waste massif by method of multichannel analysis of surface waves : proceedings of the 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Innovations in environmental geotechnics (TC215 Session) / Japanese Geotechnical Society Special Publication. Japan, 2015. № 57. P. 1956–1959.
7. 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.
8. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, Seventh Edition. U. K. : Butterworth-Heinemann, 2013. 714 p.
9. Алешин А. С., Малышев Р. В. Использование метода конечных элементов в задачах инженерной сейсмологии : Численные методы расчетов в практической геотехнике: сб. ст. международной научно-технической конференции / СПбГАСУ. СПб., 2012. С. 266–273.
10. Truong H. V. P. Dynamic spring constants and effect of frequency on footing vibration : proceedings of the 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering / Hong-Kong, 2011. P. 335–340.
11. 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.
12. Kausel E. Lamb's problem at its simplest // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2013. № 469 (2149). 15 p.

**Antipov V.V.** – student

E-mail: [seekerva@mail.ru](mailto:seekerva@mail.ru)

**Ofrikhter V.G.** – doctor of technical sciences, associate professor

E-mail: [ofrikhter@mail.ru](mailto:ofrikhter@mail.ru)

**Ponomarev A.B.** – doctor of technical sciences, professor

E-mail: [spstf@pstu.ru](mailto:spstf@pstu.ru)

**Shutova O.A.** – senior lecturer

E-mail: [gshperm@mail.ru](mailto:gshperm@mail.ru)

**Perm National Research Polytechnic University**

The organization address: 614990, Russia, Perm, Komsomolsky pr-t, 29

## **Numerical modelling of dynamic impact from a single vehicle on the existing building**

### **Abstract**

*Problem statement.* The aim of the research is to identify the possibility of making an adequate numerical model of the dynamic impact of a single vehicle on an existing building using as a basis of data from express methods of multichannel analysis of surface waves. The research of the impact of vehicles on the foundations of buildings and structures is relevant because now in Russia there is no standardization of the vibrational impact of vehicles.

*Results.* The main results of the studies consist in obtaining values of vibration acceleration at the calculated point of the foundation in numerical modelling. The obtained

accelerations are close enough to full-scale values: the arrangement is not more than 11 % for the maximum vertical component of the acceleration and not more than 30 % for the maximum horizontal component for a cargo vehicle and a bus.

*Conclusions.* The significance of the results for the construction industry lies in the fact of possibility of using as the initial data the results of multichannel analysis of surface waves and obtaining correct results in the numerical simulation of the dynamic impact of vehicles on the existing building.

**Keywords:** multichannel analysis of surface waves, MASW, wheel contact patch, damping of soil, dynamic impact on building, numerical modelling.

### References

1. Shutova O. A., Ponomarev A. B., Antipov V. V., Ofrikhter V. G. Application of nondestructive methods of determination of mechanical characteristics of the soils for numerical modelling of dynamic impact on existing building // *Akademicheskii vestnik UralNIIProekt RAASN*. 2017. № 1 (32). P. 74–78.
2. Abuzov V. I., Balabina T. A., Chepurnoi S. I. General questions of interaction of an elastic wheel with rigid supporting surface // *Izvestiia MGTU*. 2012. № 2 (14). P. 392–397.
3. Antipov V. V., Ofrikhter V. G. Modern nondestructive method of researching of geological-engineering section // *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2016. Vol. 7, № 2. P. 37–49.
4. Antipov V. V., Ofrikhter V. G. Advances of the methods of wave analysis of soil stratification // *Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriia i praktika*. 2016. Vol. 1. P. 109–119.
5. Park C. B., Carnevale M. Optimum MASW survey – revisit after a decade of use // *GeoFlorida*. 2010. P. 1303–1312.
6. Ofrikhter V. G., Ofrikhter I. V. Investigation of municipal solid waste massif by method of multichannel analysis of surface waves : proceedings of the 15<sup>th</sup> Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Innovations in environmental geotechnics (TC215 Session) / Japanese Geotechnical Society Special Publication. Japan, 2015. № 57. P. 1956–1959.
7. Antipov V. V., Ofrikhter V. G., Shutova O. A. Investigation of upper section of soil stratification by rapid methods of wave analysis // *Vestnik MGSU*. 2016. № 12. P. 44–60.
8. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, Seventh Edition. U. K. : Butterworth-Heinemann, 2013. 714 p.
9. Aleshin A. S., Malyshev R. V. Using of the finite element method in engineering seismology : Numerical methods of calculations in practical geotechnics: dig. of art. of International scientific-technical conference / *SPbGASU. SPb.*, 2012. P. 266–273.
10. Truong H. V. P. Dynamic spring constants and effect of frequency on footing vibration : proceedings of the 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering / Hong-Kong, 2011. P. 335–340.
11. Shutova O. A., Ponomarev A. B. The analysis of application possibility of program geostudio quake / W Complex for Modelling of Technogenic Vibration // *Seismostoiroe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*. 2016. № 3. P. 59–64.
12. Kausel E. Lamb's problem at its simplest // *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2013. № 469 (2149). 15 p.