

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

УДК 625.12:624.131.55

ВОСТРИКОВ КОНСТАНТИН ВЛАДИМИРОВИЧ, канд. техн. наук,

kostas_v@mail.ru

СМОЛИН ЮРИЙ ПЕТРОВИЧ, докт. техн. наук, доцент,

yurij.smolin@bk.ru

*Сибирский государственный университет путей сообщения,
630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191*

К ВОПРОСУ О ГРАНИЦЕ САНИТАРНО-ЗАЩИТНОЙ ЗОНЫ ОТ ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТРАНСПОРТА

Рассмотрены вопросы прогноза уровня вибраций при движении поезда, возникающих на прилегающей к железнодорожной магистрали селитебной территории. Представлены результаты определения границ санитарно-защитной зоны по вибрации при разных среднегеометрических частотах октавных полос. Расчеты по определению динамического воздействия выполнены методом конечных элементов в программном комплексе Plaxis. При решении задачи использовано допущение о возбуждении подвижным составом в грунтовой среде колебаний гармонического характера.

Ключевые слова: земляное полотно; динамическое воздействие; среднегеометрические частоты октавных полос; гармонические колебания; транспортная вибрация; санитарно-защитная зона; подвижной состав.

KONSTANTIN V. VOSTRIKOV, PhD,

kostas_v@mail.ru

JURY P. SMOLIN, DSc, A/Professor,

yurij.smolin@bk.ru

Siberian Transport University,

191, Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia

SANITARY PROTECTION AREA AND TRAFFIC VIBRATIONS

The paper presents the problem of forecasting the level of vibrations induced by trains and occurred in the resident area of the long distance railroad. The results of detecting the boundaries of the sanitary protection area are presented herein according to vibrations at different geometric mean frequencies of octave bands. The dynamic effect is calculated on the Plaxis software-

based finite element method. The calculations are accompanied by the assumption on harmonic vibrations occurred in soil due to the train composition.

Keywords: subgrade; dynamic effect; geometric mean frequency; octave band; harmonic vibrations; transportation vibrations; sanitary protection area; train composition.

Современный уровень развития железнодорожной отрасли требует постоянного повышения объема и качества грузоперевозок. Это вызывает необходимость переустройства путей под более высокие нагрузки и повышенные скорости движения поездов. Кроме этого, возникает необходимость расширения существующей сети железных дорог, что требует устройства дополнительных путей с выделением границ землеотвода.

В местах, где железнодорожная линия проходит по незаселенной территории, строительство новых путей ограничено лишь техническими и экономическими показателями. В случае же, если магистраль расположена в пределах селитебной территории населенных пунктов, к технико-экономическим добавляются еще и санитарные требования, такие как ограничение шума и вибрации.

Транспортное воздействие на окружающую среду приводит к возникновению волн динамического характера, которые, проходя по земной поверхности, могут влиять на самочувствие людей в помещениях и на осадку близко расположенных зданий и сооружений.

В пособии к МГСН 2.04–97 «Проектирование защиты от транспортного шума и вибраций жилых и общественных зданий» указано, что наиболее критический диапазон частот при распространении вибраций от автомобильного транспорта лежит в пределах октавных полос 2–8 Гц. Применительно к железнодорожному транспорту, согласно п. 5.3 указанного выше пособия, расчетный диапазон частот может приниматься в пределах 16–63 Гц.

В настоящее время указания нормативных документов (СН 2.2.4/2.1.8.566–96 «Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Санитарные нормы» и МГСН 2.04–97 «Допустимые уровни шума, вибрации и требования к звукоизоляции в жилых и общественных зданиях») о расчете уровней вибрации, возникающих от железнодорожных составов на поверхности окружающего грунтового массива, и тем более в конструкциях рядом расположенных сооружений, носят лишь информационный характер. Параметры распространения транспортной вибрации трудно усреднить для возможности использования их на стадии предпроектных расчетов. Это связано с необходимостью учета в расчетной схеме большого количества параметров (геологическое строение территории, наличие грунтовых вод, техническое состояние конструкций, параметры источника вибраций, наличие подземных конструкций и преград на пути распространения сейсмических волн и т. п.). Таким образом, актуальной становится прикладная задача – прогноз, по санитарным условиям, вибрационного воздействия железнодорожного транспорта при строительстве новых и модернизации существующих магистралей, проходящих на заселенных территориях.

В нашей стране большое количество работ посвящено изучению колебательного процесса, который возникает в грунтах земляного полотна при прохождении по нему поездов. Однако данные исследования, в основном, касаются вопроса динамической устойчивости и прочности насыпей [1–4]

и лишь частично применимы к прогнозу вибрации с точки зрения санитарных норм для зданий и сооружений [5]. Согласно литературным источникам, большее количество исследований данной проблемы посвящено прогнозу вибраций от воздействия метро [6, 7]. В меньшем объеме имеются теоретические исследования, касающиеся вопроса прогноза вибраций от железнодорожного транспорта [8]. Большинство из них базируется на решениях о распространении волн в упругих средах при действии сосредоточенной силы, приложенной к поверхности полупространства.

Представленные в настоящей статье результаты исследования распространения вибраций на прилегающие к железнодорожному пути территории при прохождении подвижных составов получены с использованием метода конечных элементов, реализованного в динамическом модуле программного комплекса Plaxis. Выполнение расчетов производилось в предположении плоской деформации, а поведение грунта считалось упругим (такой подход возможно применять в связи с малыми величинами деформаций, возникающих в грунтовой массе при распространении колебаний от источника).

Расчеты были выполнены с целью определения границ санитарно-защитной зоны от возможной вибрации, вызванной движением поездов по проектируемой вблизи жилого района железной дороге. Верхнее строение пути характеризовалось следующими показателями:

- рельсы типа Р65 на железобетонных шпалах;
- балластная призма отсыпана щебнем, балластная подушка выполнена из песка с песчано-гравийной смесью.

Для выполнения теоретических расчетов были выбраны характерные сечения, для которых производилось построение конечно-элементной модели. В качестве исходных данных были использованы свойства грунтовой среды, такие как плотность, коэффициент Пуассона и скорость распространения волн в упругой среде, величины которых, в связи с отсутствием результатов геофизических исследований, вычислялись по следующим зависимостям:

- скорость распространения волны сжатия (давления) в упругой среде V_p в ограниченном одномерном теле

$$V_p = \sqrt{\frac{E \cdot g}{\gamma} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2 \cdot \nu)}}, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга, определенный по результатам одометрических испытаний при многократной нагрузке-разгрузке образца грунта, кПа; ν – коэффициент Пуассона грунта в упругой стадии деформирования ($\nu_{ur} \approx 0,2$); γ – удельный вес грунта, кН/м³; g – ускорение силы тяжести, м/с²;

- скорость распространения волны сдвига

$$V_s = \sqrt{\frac{G \cdot g}{\gamma}}, \quad (2)$$

где G – модуль сдвига, кПа;

- скорость распространения волн Рэлея V_R

$$V_R = 0,54 \sqrt{\frac{(1 - \nu)E \cdot g}{(1 + \nu)(1 - 2 \cdot \nu)\gamma}} = 0,54 \cdot V_p. \quad (3)$$

Граничные условия задавались стандартным образом – путем фиксации боковых границ геометрической модели от горизонтальных, а нижней – от горизонтальных и вертикальных перемещений.

Степень демпфирования (коэффициенты демпфирования) границ расчетной схемы (absorbent boundaries) назначалась по следующим формулам:

– коэффициент демпфирования для продольной волны, кН·с/м³:

$$C_p = \rho \cdot A \sqrt{\frac{\lambda + 2 \cdot G_0}{\rho}} = c_p \cdot A, \quad (4)$$

где $\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu)(1 - 2 \cdot \nu)};$ (5)

– коэффициент демпфирования для поперечной волны, кН·с/м³:

$$C_s = \rho \cdot A \sqrt{\frac{G}{\rho}} = c_s \cdot A, \quad (6)$$

где A – площадь соответствующего слоя грунта в плоскости границы расчетной схемы, м²; ρ – плотность грунта, кН/м³; λ – объёмный модуль упругости (первый параметр Ламе), кПа.

Для того чтобы избежать эффекта отражения волн от границ расчетной схемы, они назначались со значительной сдвижкой в стороны от источника колебаний.

Ввиду отсутствия исходных данных, коэффициенты поглощения (демпфирования) вибрации в грунте в запас принимались минимальными для рассматриваемых типов грунтов ($\xi \approx 0,05$). Для описания процесса поглощения вибрации грунтами в Plaxis применяется рэлеевское демпфирование вида $C = \alpha \cdot M + \beta \cdot K$, и в явном виде параметр ξ не задается. Коэффициенты демпфирования α (затухание по низким частотам) и β (затухание по высоким частотам) вычислялись исходя из рассмотрения зависимости

$$\alpha + \beta \cdot \omega_i^2 = 2 \cdot \omega_i \cdot \zeta_i, \quad (7)$$

где ω_i – рассматриваемая частота вибрации, Гц (рад/с).

Значения частот ω_i в указанной формуле принимались граничными при рассмотрении каждой из использованных в расчете среднегеометрических частот октавных полос.

Задание параметров колебательного процесса в источнике осуществлялось с применением метода упрощения гармонического характера колебаний. Для определения амплитуд перемещений, соответствующих среднегеометрическим частотам 16, 31,5 и 63 Гц, были использованы результаты полевых экспериментальных исследований [1], а именно максимальные амплитуды вертикальных виброперемещений грунта, возникающих в уровне основной площадки пути (по оси) при прохождении по нему локомотива ВЛ80 (рис. 1). При проведении расчетов скорость движения локомотива, согласно требованиям технического задания, принималась равной 80 км/ч.

Используемые в качестве исходных данных частоты и соответствующие им амплитуды максимальных виброперемещений грунта в уровне основной площадки пути, вызываемые прохождением локомотива ВЛ80 со скоростью 80 км/ч, представлены в табл. 1.

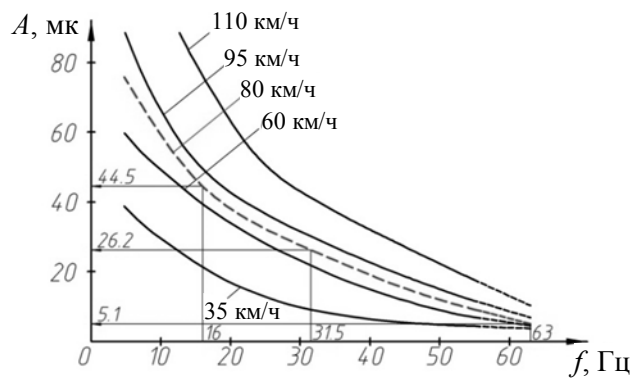


Рис. 1. Изменение максимальных вертикально направленных амплитуд виброперемещений грунта в уровне основной площадки пути при движении локомотива ВЛ80 [1]

Таблица 1

Частоты и максимальные амплитуды виброперемещений грунта в уровне основной площадки при прохождении локомотива ВЛ80 со скоростью 80 км/ч

Характер колебательного процесса источника	Частота, Гц	Амплитуда, мк	Интенсивность статической нагрузки, кПа
Гармонические колебания	16	44,5	70
	31,5	26,2	
	63	5,1	

Всего было создано пять расчетных схем, наиболее характерные из которых представлены ниже. На рис. 2 изображен фрагмент конечно-элементной модели поперечного профиля в месте, где путь проходит в выемке глубиной около 6,3 м. Грунтовый массив, в основном, состоят тяжелые пылеватые суглинки и легкие глины.

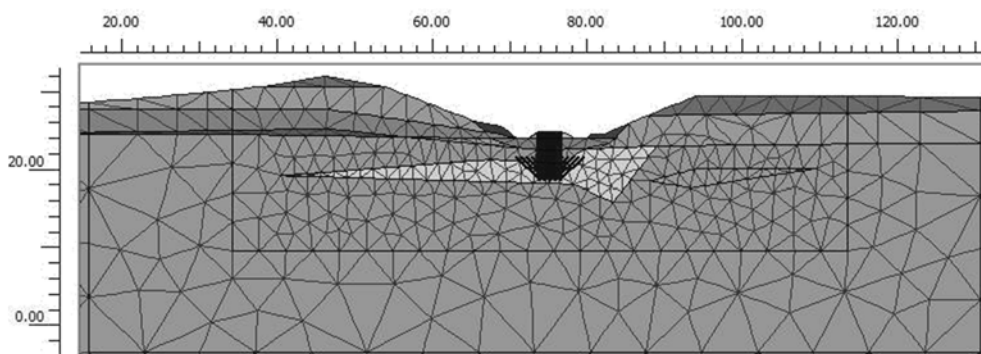


Рис. 2. Фрагмент конечно-элементной модели поперечного профиля в месте, где путь проходит в выемке

На рис. 3 изображен фрагмент конечно-элементной модели поперечного профиля в месте, где путь располагается на насыпи высотой около 20 м. Гео-

логическое строение насыпи довольно однородное и представлено тяжелыми суглинками твердой консистенции. В основании насыпи выделено значительное переслоение грунтов (от супесей и песка до легких глин).

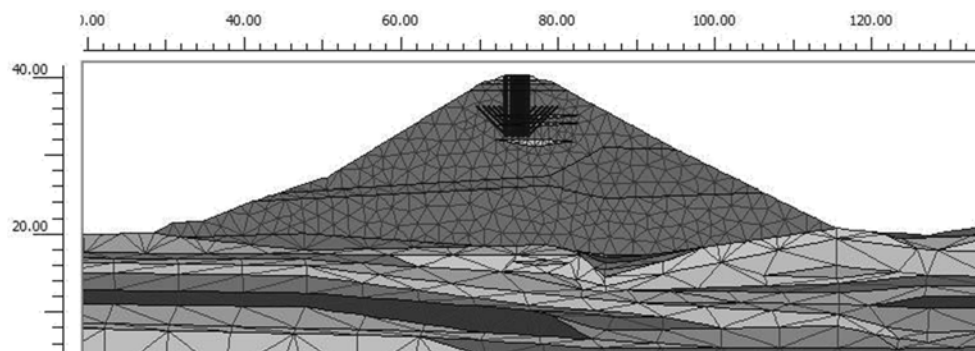


Рис. 3. Конечно-элементная модель поперечного профиля насыпи

Для контроля амплитуд ускорений колебаний расчеты производились для характерных точек, расположенных с примерно одинаковым шагом в сторону от источника колебаний. При выполнении расчетов время вибрационного воздействия в источнике принималось равным 60 с. Такая продолжительность, в целом, соответствует времени прохождения поезда по участку пути и позволяет сформировать устойчивый колебательный процесс по всему периметру рассматриваемой расчетной схемы.

По результатам выполненных расчетов были получены величины амплитуд вертикально и горизонтально направленных ускорений колебаний. Картина распределения максимальных результирующих амплитуд ускорений колебаний в произвольный момент времени, на примере среднегеометрической полосы частот 16 Гц, представлена на рис. 4 для выемки и на рис. 5 для насыпи.

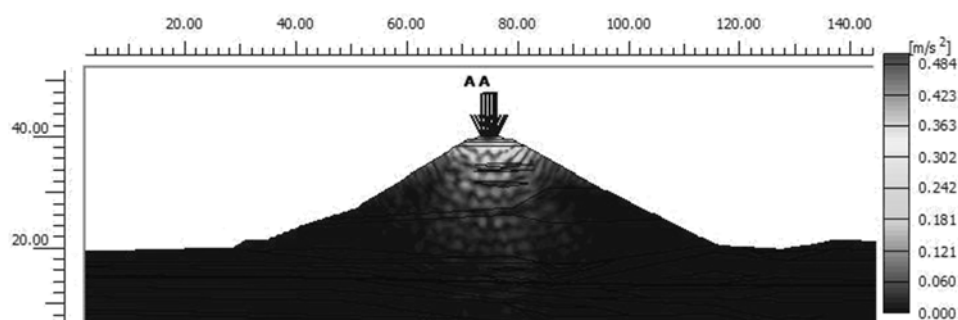


Рис. 4. Распределение максимальных результирующих амплитуд ускорений колебаний ($\text{м/с}^2 \cdot 10^{-3}$) для среднегеометрической полосы частот 16 Гц на участке, где железнодорожный путь расположен в выемке

При анализе полученных данных авторы исходили из предположения, что уровни вибрации в зданиях и сооружениях с достаточной степенью точности можно прогнозировать по уровням вибрации на поверхности грунта.

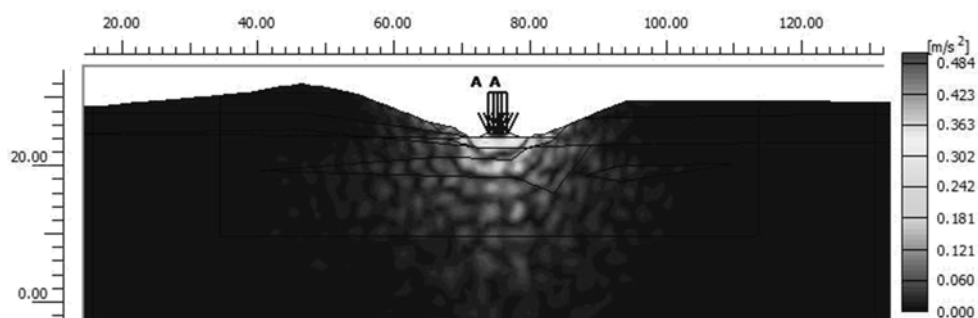


Рис. 5. Распределение максимальных результирующих амплитуд ускорений колебаний ($\text{м/с}^2 \cdot 10^{-3}$) для среднегеометрической полосы частот 16 Гц на участке, где железнодорожный путь расположен на насыпи

Для оценки степени эффективности снижения уровней вибрационного воздействия от источника колебаний при сооружении пути в выемке и на насыпи также дополнительно были выполнены сопоставительные расчеты из условия проложения пути в нулевых отметках.

Для каждой из рассмотренных в расчете среднегеометрических частот октавных полос принимались собственные допустимые уровни виброускорений на удалении от источника колебаний (рис. 6 и 7). Значения допустимых амплитуд виброускорений, с учетом поправки на непостоянный характер вибрационного воздействия, представлены в табл. 2.

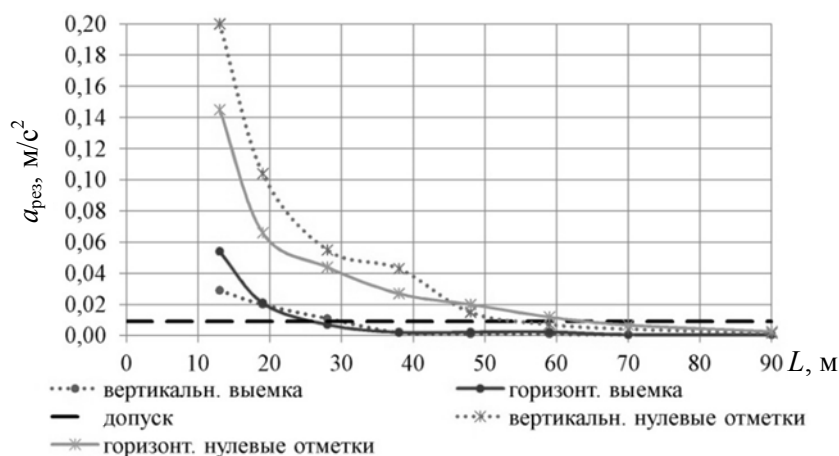


Рис. 6. Изменение амплитуд горизонтально и вертикально направленных виброускорений колебаний в расчетных точках поверхности грунта для среднегеометрической полосы частот 16 Гц на участке, где железнодорожный путь расположен в выемке и в нулевых отметках

Графики изменения амплитуд горизонтально и вертикально направленных виброускорений колебаний в расчетных точках поверхности грунта на примере октавной полосы со среднегеометрической частотой 16 Гц представлены на рис. 6 для участков, где железнодорожный путь расположен в выемке

и в нулевых отметках, а также на рис. 7 для участков, где железнодорожный путь расположен на насыпи и в нулевых отметках.

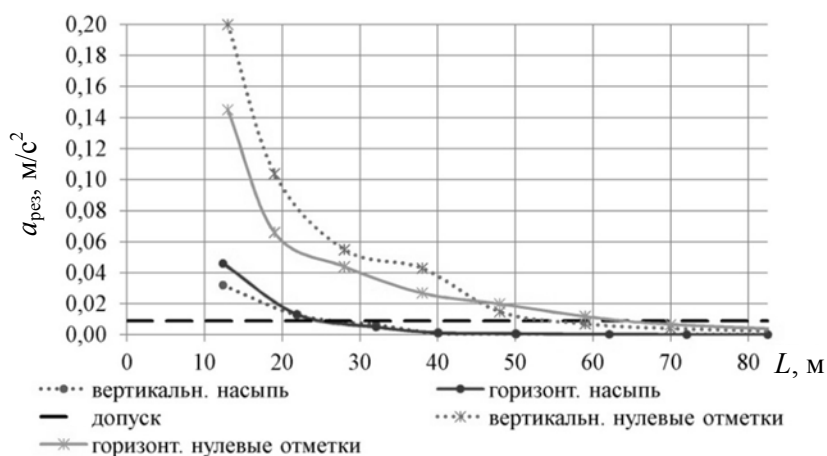


Рис. 7. Изменение амплитуд горизонтально и вертикально направленных виброускорений колебаний в расчетных точках поверхности грунта для среднегеометрической полосы частот 16 Гц на участке, где железнодорожный путь расположен на насыпи и в нулевых отметках

Таблица 2

Допустимые значения амплитуд виброускорений согласно требованиям СН 2.2.4/2.1.8.566–96 «Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Санитарные нормы»

Среднегеометрические частоты полос, Гц	Допустимые виброускорения для непостоянной вибрации, м/с ²
16	0,009
31,5	0,018
63	0,035

Результаты расчетов показали, что наибольшая ширина санитарно-защитной зоны по вибрации назначается при рассмотрении колебаний в октавной полосе со среднегеометрической частотой 16 Гц. В рассмотренных грунтовых условиях при указанной частоте ширина санитарно-защитной зоны в среднем в 1,6–2,3 раза больше ширины, вычисленной при рассмотрении колебаний, лежащих в диапазоне частотных полос 31,5 и 63 Гц.

Для рассмотренного объекта среднее значение ширины санитарно-защитной зоны по вибрации составило около 68 м в каждую сторону от железнодорожного пути для случая расположения его в нулевых отметках. Для случая расположения пути в выемке и на насыпи значение ширины защитной зоны составило соответственно около 30 и около 25 м.

Таким образом, установлено, что без применения каких-либо конструктивных виброизоляционных мероприятий эффективным способом снижения амплитуд виброускорений колебаний на прилегающей к железнодорожному пути территории является устройство его в выемке либо на насыпи.

По результатам выполненной работы можно сделать вывод, что при отсутствии полевых измерений ширину санитарно-защитной зоны по вибрации от железнодорожных поездов возможно устанавливать с применением метода конечных элементов, реализуемого в различных программных комплексах. Однако вопрос распространения ускорений колебаний в сторону от железнодорожного пути требует дальнейшего исследования. Калибровки требует и компьютерная модель, т. к. рекомендуемые в литературе значения коэффициентов поглощения вибрации в грунте ξ , а также значения физико-механических характеристик грунтов варьируются в широких диапазонах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Смолин, Ю.П.* Прочность железнодорожных насыпей, сложенных мелкозернистыми и пылеватými песками, воспринимающими динамическое воздействие от подвижного состава : дис. ... докт. техн. наук: 05.22.06. – СПб. : ПГУПС, 2005. – 272 с.
2. *Стоянович, Г.М.* Натурное изучение величины вибродинамического воздействия поездной нагрузки на грунты / Г.М. Стоянович. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2005. – 147 с.
3. *Зайцев, А.А.* Комплексная методика автоматизированной оценки динамической устойчивости железнодорожных насыпей : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.06. – М. : МГУПС, 2000. – 255 с.
4. *Смолин, Ю.П.* Учет динамической нагрузки при проектировании усиления деформирующегося железнодорожного земляного полотна методом напорной инъекции / Ю.П. Смолин, К.В. Востриков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск : ИрГУПС, 2013. – № 1 (37). – С. 89–94.
5. *Андреева, П.И.* Изучение влияния прохождения железнодорожного транспорта на вибрации расположенного вблизи здания КБ «Вертолеты России» / П.И. Андреева, Г.Э. Шаблинский // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 1. – С. 53–58.
6. *Курбатский, Е.Н.* Использование теоремы взаимности для оценки уровней вибрации поверхности упругого полупространства от точечного источника, расположенного внутри полупространства / Е.Н. Курбатский // Вестник МИИТа. – 2004. – Вып. 2. – С. 93–104.
7. *Титов, Е.Ю.* Разработка методов оценки и способов снижения уровней вибраций сооружений вблизи метрополитенов и железнодорожных трасс : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.06. – М. : МГУПС, 2006. – 134 с.
8. *Ильичев, В.А.* Исследование распространения вибрации при прохождении поездов в зависимости от расположения железнодорожного земляного полотна / В.А. Ильичев, Ш.С. Юлдашев, С.М. Саидов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1999. – Вып. 2. – С. 12–13.

REFERENCES

1. *Smolin J.P.* Prochnost' zheleznodorozhnykh nasypei, slozhennykh melkozernistymi i pylevatymi peskami, vosprininayushchimi dinamicheskoe vozdeistvie ot podvizhnogo sostava : dis. ... dokt. tekhn. nauk [Strength of railway embankments composed of fine-grained and sandy silts under dynamic load. DSc Thesis]. St.-Petersburg : PSTU Publ., 2005. 272 p. (rus)
2. *Stoyanovich G.M.* Naturnoe izuchenie velichiny vibrodinamicheskogo vozdeistviya poezdnoi nagruzki na grunty [Field experiment on vibrodynamic train load on soils]. Khabarovsk : FESTU Publ., 2005. 147 p. (rus)
3. *Zaitsev A.A.* Kompleksnaya metodika avtomatizirovannoi otsenki dinamicheskoi ustoychivosti zheleznodorozhnykh nasypei : dis. ... kand. tekhn. nauk [Automatic estimation of dynamic stability of embankments. PhD Thesis]. Moscow : MIIT Publ., 2000. 255 p. (rus)
4. *Smolin J.P., Vostrikov K.V.* Uchet dinamicheskoi nagruzki pri proektirovanii usileniya deformiruyushchegosya zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna metodom napornoj in"ektsii [Dy-

- dynamic load in design of reinforcement for deformable embankments using pressure injection method]. *Modern Technologies. System analysis. Modeling*. Irkutsk : ISTU Publ., 2013. V. 1. Pp. 89–94. (rus)
5. Andreeva P.I., Shablinskiy G.E. Izuchenie vliyaniya prokhozhdeniya zheleznodorozhnogo transporta na vibratsii raspolozhennogo vblizi zdaniya KB ‘Vertolety Rossii’ [Study of vibrations produced by rail transportation on ‘Russian Helicopters’ building]. *Vestnik TSUAB*. 2013. V. 1. Pp. 53–58. (rus)
 6. Kurbatskii E.N. Ispol'zovanie teoremy vzaimnosti dlya otsenki urovnei vibratsii poverkhnosti uprugogo poluprostranstva ot tochechnogo istochnika, raspolozhennogo vnutri polupros-transtva [Reciprocal theorem for estimation of elastic half-space vibrations produced by point source]. *Vestnik MIIT*. 2004. V. 2. Pp. 93–104. (rus)
 7. Titov E.Yu. Razrabotka metodov otsenki i sposobov snizheniya urovnei vibratsii sooruzhenii vblizi metropolitenov i zheleznodorozhnykh trass : dis. ... kand. tekhn. nauk [Development of methods for evaluation and ways to reduce vibration levels structures, located near the under-ground railroad and railway. PhD Thesis]. Moscow : MIIT Publ., 2006. 134 p. (rus)
 8. Il'ichev V.A., Yuldashev Sh.S., Saidov S.M. Issledovanie rasprostraneniya vibratsii pri prokhozhdenii poezdov v zavisimosti ot raspolozheniya zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna [Investigation of vibration propagation initiated by trains depending on embankment location]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1999. V. 2. Pp. 12–13. (rus)