

УДК: 699.842
OECD: 2.03

Исследование эффективности траншей для снижения вибрации, возникающей при движении поездов

Упоров П.А.^{1*}, Куклин Д.А.², Назарова Е.Д.³
¹Преподаватель, ²д.т.н, профессор кафедры, ³Ассистент,
^{1,2,3}Кафедра «Техносферная безопасность и вычислительная механика»,
БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Данная работа посвящена численному моделированию эффективности виброизолирующих траншей для защиты сооружений от вибраций высокоскоростных поездов, актуальность чего обусловлена негативным воздействием железнодорожного транспорта. Разработанная 2D модель валидирована на основе измерений на участках с открытыми траншеями различной глубины. Грунт на данном участке состоял из верхнего мягкого слоя и нижнего твёрдого слоя. Проведенные численные эксперименты включали изменение глубины от 1 м до 7,5 м и формы траншей - Т-образные траншеи и с наклонными секциями. Были построены поля распространения вибрационных волн на расстоянии до 50 м от оси железной дороги. Установлено, что наиболее эффективной является прямая траншея глубиной 7,5 м, обеспечивающая полный разрыв верхнего слоя грунта, по которому распространяется основная часть вибрационной энергии.

Ключевые слова: вибрация, железнодорожный транспорт, виброизоляция, траншеи, численное моделирование, защита сооружений, грунт

Research on the effectiveness of trenches for reducing vibrations caused by train movement

Uporov P.A.^{1*}, Kuklin D.A.², Nazarova E.D.³
¹Lecturer, ²D.Sc., Professor of the Department, ³Assistant,
^{1,2,3}Department of Environmental Engineering and Computational Mechanics,
Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia

Abstract

This work is dedicated to the numerical modeling of the effectiveness of vibration-isolating trenches for protecting structures from high-speed train vibrations, the relevance of which is due to the negative impact of railway transport. The developed 2D model was validated based on measurements in areas with open trenches of various depths. The soil in this area consisted of an upper soft layer and a lower hard layer. The conducted numerical experiments included varying the depth (up to 7.5 m) and shape of the trenches (T-shaped, with inclined sections). The conducted numerical experiments included varying the depth from 1 m to 7.5 m and the shape of the trenches – T-shaped trenches and those with inclined sections. Vibration wave propagation fields were constructed up to a distance of 50 m from the railway axis. It was established that the most effective solution is a straight trench with a depth of 7.5 m, which ensures a complete severance of the upper soil layer through which the main part of the vibrational energy propagates.

*E-mail: uporov_pa@voenmeh.ru (Упоров П.А.)

Keywords: vibration, railway transport, vibration isolation, trenches, numerical modeling, structural protection, soil

Введение

Расширение сети высокоскоростных железных дорог приводит к усилению проблем, связанных с повышенными уровнями вибрации [1], [2]. Эти вибрации, возникающие при движении поездов, могут оказывать негативное воздействие на близлежащие здания и сооружения, чувствительное оборудование, а также на комфорт проживания людей, что делает проблему их эффективного снижения актуальной задачей в современном транспортном и гражданском строительстве.

Современные методы снижения вибраций включают как активные, так и пассивные подходы [3]. Одним из наиболее изученных и применяемых пассивных методов является использование волновых барьеров, таких как траншеи [4]. Многочисленные теоретические, численные и лабораторные исследования демонстрируют высокий потенциал траншей в отражении и рассеянии поверхностных волн Рэлея, которые являются основным компонентом вибраций, распространяющихся в грунте. Значительная часть этих исследований основывается на идеализированных условиях, таких как стационарность источников вибрации, однородность грунтов или использование упрощенных моделей движения вибрационной нагрузки. Реальные условия, связанные с движением высокоскоростных поездов, характеризуются сложным динамическим воздействием, переменными скоростями, эффектами резонанса в насыпях и неоднородностью грунтов, что существенно усложняет прогнозирование и оценку эффективности виброзащитных мероприятий.

Данная работа базируется на экспериментальных данных, представленных в исследовании [5], где были проведены полномасштабные натурные испытания по снижению вибраций, вызванных высокоскоростными поездами, с использованием открытых траншей. Эксперименты были выполнены на реальной железнодорожной линии в Северо-Западной Турции в условиях мягких грунтов. Полученные данные включают значения виброускорений и виброскоростей на поверхности грунта при прохождении поездов на высоких скоростях, геометрические параметры исследуемых траншей и динамические характеристики грунта.

Эксперименты, проведенные данной группой исследователей, имеют ряд ограничений, так как в них исследовались лишь 3 траншеи разной глубины. Для разработки универсальных и эффективных мероприятий по снижению уровней вибрации необходимо расширить этот анализ с помощью численного моделирования. Создание и валидация численной модели, основанной на полученных экспериментальных данных, позволит расширить данный эксперимент путем изменения глубины и геометрии траншей.

Новизна данной работы заключается в создании и валидации численной модели распространения и затухания вибраций в грунте, с учётом наличия траншей. Настоящее исследование является логическим продолжением и развитием работ по виброизоляции зданий и сооружений, подверженных вибрации от железнодорожного транспорта.

1 Разработка и валидация численной модели распространения вибраций

Основными причинами возникновения вибрации при движении железнодорожного транспорта являются наличие волнообразных неровностей путей, повышенной

шероховатости поверхности колёс и сложно взаимодействие в паре колесо-рельса. Эти динамические воздействия передаются на грунт, где распространяются в виде поверхностных волн Рэлея, продольных волн и поперечных волн. Распространение вибраций в грунте зависит от геологических параметров грунта.

Данная работа опирается на измерения, представленные в [5]. В этой работе изучалась эффективность снижения вибрации с помощью пустых траншей различной глубины. Измерения проводились на участке Сакарья-Памукова высокоскоростной железнодорожной линии Стамбул-Анкара на северо-западе Турции. Источником вибрации служил высокоскоростной поезд серии НТ65000, движущийся со скоростью 260 км/ч.

Из геологической разведки было выявлено, что участок состоит из двух грунтовых слоёв – мягкого верхнего и твёрдого нижнего. Глубина верхнего слоя составила в среднем 7,34 м. Средние параметры обоих грунтов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры сред на участке измерения [6]

Среда	Скорость продольной волны, м/с	Скорость поперечной волны, м/с	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона
Грунт №1	410	125	1730	76,6	0,44
Грунт №2	1800	233	2020	320	0,49

Измерения вибрации проводились с помощью пяти акселерометров, расположенных перпендикулярно железнодорожной линии, как показано на рисунке 1.

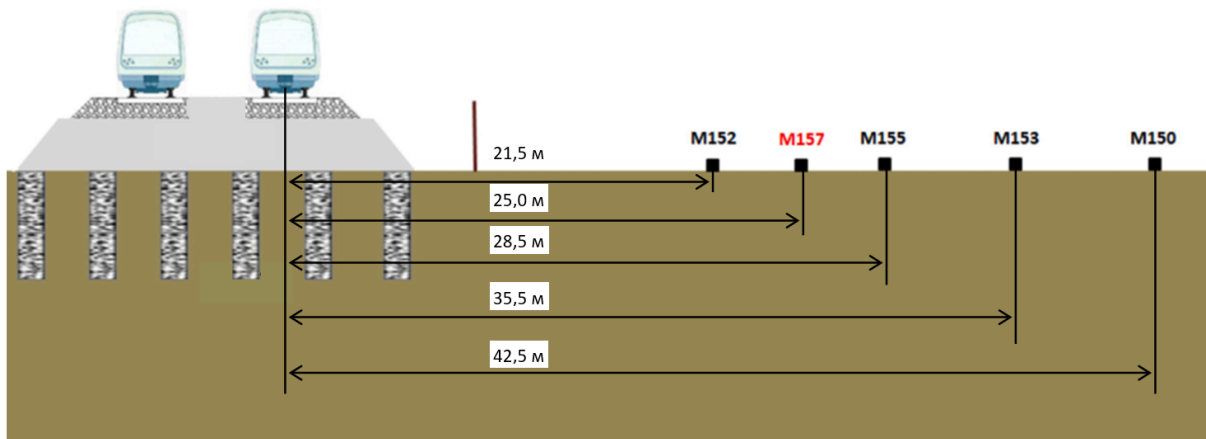


Рисунок 1 – Расположение акселерометров при измерении вибрации.

В рамках исследования были изучены три варианта открытых траншей с глубинами $H = 1,0$ м, $H = 1,5$ м и $H = 2,5$ м. Ширина всех траншей составляла 0,5 м, а длина – 5 м. Расстояние от траншеи до железнодорожного пути было выбрано $L = 24,5$ м, что представляет траншею как пассивный изолятор, расположенный на расстоянии более чем 2 длин волн Рэлея от источника. Отметим, что ширина траншеи выбрана из технологических особенностей процесса её выкапывания, а именно ширины ковша экскаватора. Исследования показали, что ширина траншеи имеет слабое влияние на её эффективность, так как для снижения вибрации необходим лишь разрыв сплошности грунта любого размера.

Модель распространения вибрации была построена в программном комплексе Comsol Multiphysics 6.2. Решение происходило в 2-х мерной постановке, длина поезда и траншеи не учитывалась, так как это оказывает малое влияние на значения вибрации в грунте. Геометрия модели (рисунок 2) представляет собой пространство размером 46 м на 10 м, где верхний слой занимает 7,4 м, а нижний – 2,6 м. Глубина нижнего слоя выбрана неглубокой, так как предполагается отражение большей части вибрационной энергии от границы раздела между слоями.

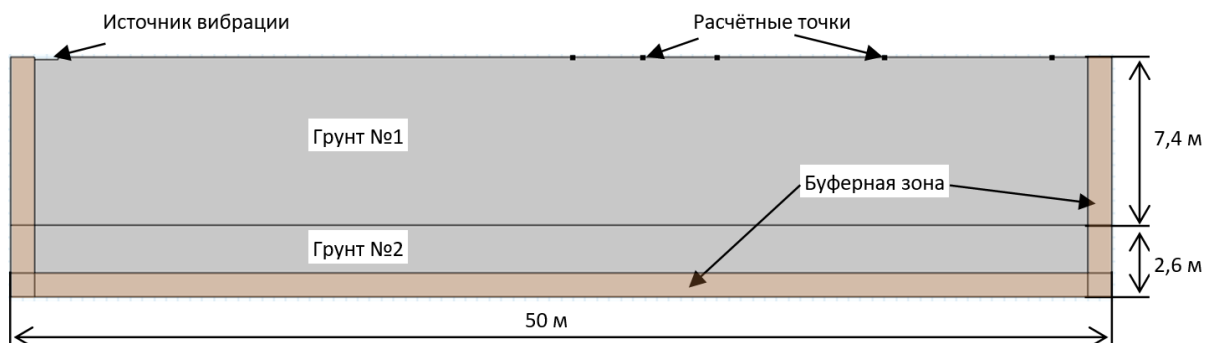


Рисунок 2 – Расчётная модель

Свойства обоих слоёв грунта были заданы согласно таблице 1. Верхняя граница грунта и поверхности траншеи заданы как свободные поверхности, а все остальные – как полностью поглощающие энергию поверхности, что по своей сути означает граничное условие бесконечности пространства. Для сглаживания эффектов поглощения вибрации на границе рассматриваемой области, а также для исключения переотражений, на границе области была определена буферная зона шириной 1 метр.

В модели рассматривался полный диапазон частот вибрации и инфразвука, характерный для железнодорожного транспорта, а именно от 4 Гц до 250 Гц в октавных полосах частот. Для качественного расчёта распространения вибрации рекомендуется определять размер сетки так, чтобы на самую низкую длину волны спектра приходилось 8 элементов. В нашем случае наименьшая длина волны составляет 1,6 м, следовательно максимальный размер элементов сетки ограничен величиной 0,2 м. Сетка расчётной области представлена на рисунке 3.

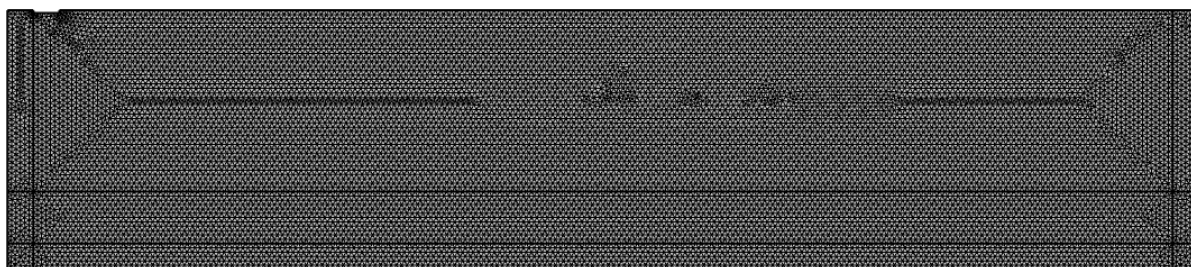


Рисунок 3 – Сетка расчётной области

В левой части области задан источник вибрации как вырез в грунте шириной 1 м (рисунок 2). К данному вырезу приложена виброскорость, которая генерируется при движении поезда. Наличие данного выреза обусловлено особенностями построения модели и задания граничных условий.

Валидация модели происходила путём определения одной величины виброскорости, которая бы приводила к виброскоростям в рассматриваемых точках близким к данным

эксперимента. Также корректировались значения скорости распространения продольных волн в верхнем грунте, так как в исходных данных эта скорость представлена как среднее значение. Было определено, что наилучшая сходимость достигается при виброскорости в источнике равной $v = 0,85$ см/с и скорости распространения продольных волн в грунте $c = 380$ м/с. Размер сетки был скорректирован для новой длины волны на частоте 250 Гц. На рисунке 4 показана сходимость значений в эксперименте и модели для 4х случаев – в отсутствии траншеи и при наличии траншеи глубиной 1, 1,5 и 2,5 м. Средняя ошибка составила 12%, что является хорошим показателем для подобных моделей.

Главными причинами неточности модели является недостаток данных о геологическом составе грунтов. Неизвестно, насколько волнообразную форму имеет площадка контакта между обоими грунтами, что может внести свой вклад в распространение волн по верхнему слою.

На рисунке 4 представлено моделирование распространения волны для случая с траншеей глубиной 2,5 м. Из рисунка видно, что в области перед траншеей происходит сложение приходящей и отраженной волн, что приводит к увеличению уровней виброскорости непосредственно перед траншеей, что также наблюдается в эксперименте.

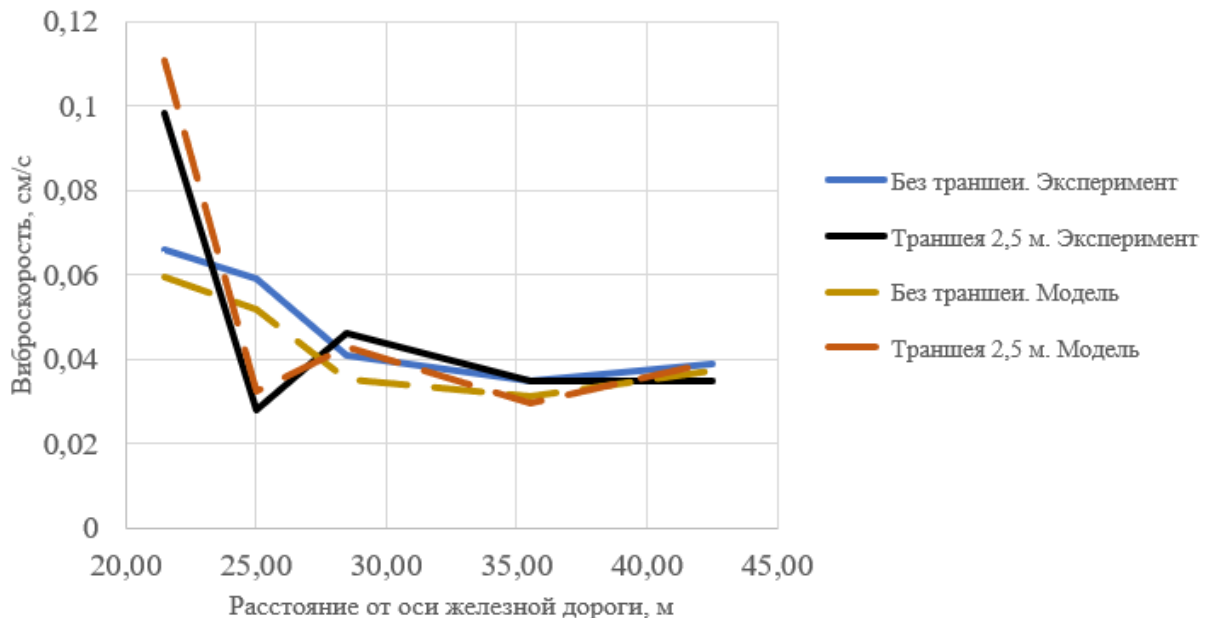


Рисунок 4 – Сходимость значений в модели и эксперименте

2 Проведение численного эксперимента с измененной формой траншеи

В построенной модели, после проведения валидации, были поставлены следующие численные эксперименты:

- увеличение глубины траншеи до 5 и 7,5 м. В последнем случае рассматривается ситуация, когда верхний слой грунта полностью разомкнут;

- изменение формы дна траншеи на Т-образную для глубин 1, 2,5 и 5 м. Получение такой формы траншеи может достигаться специальной техникой, которая предназначена для выкапывания Т-образных скважин для свай фундамента;

- изменение формы дна траншеи с добавлением поверхности, наклонной к плоскости траншеи. Данная форма была взята из практики борьбы с шумом – такая форма барьера часто используется при проектировании акустических экранов. Достичь данной формы можно путём пропиливания секции, находящейся под углом, специальными

роторными пилами для грунтов, которые применяются при прокладке коммуникаций.

На рисунке 5 представлена эффективность траншей различной глубины.

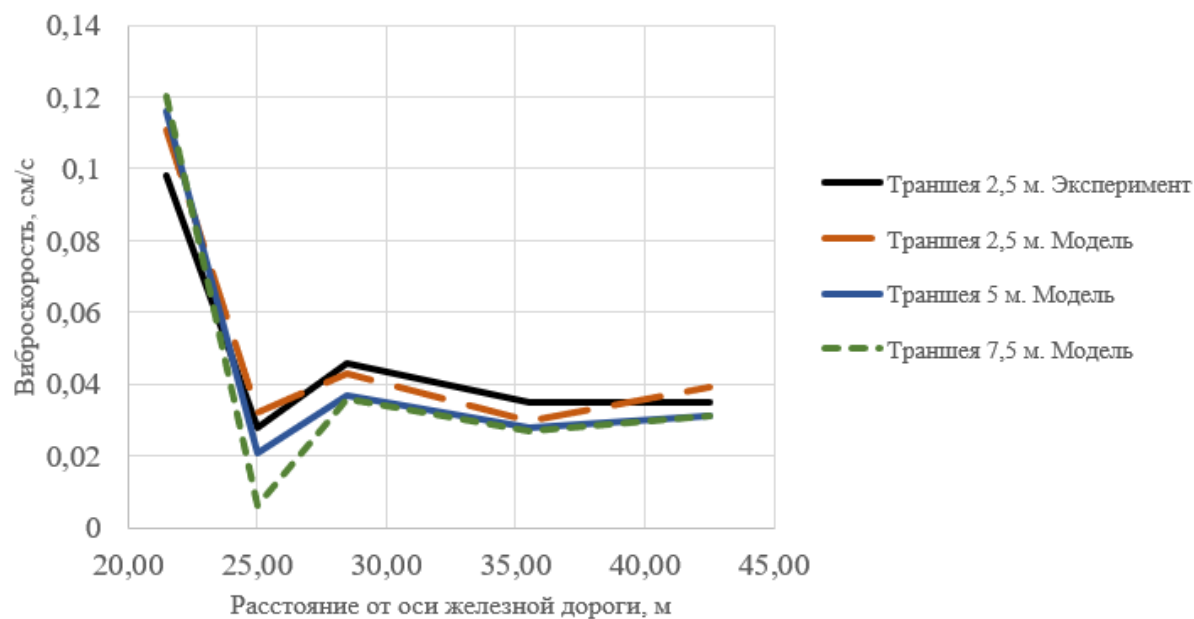


Рисунок 5 – Значение виброскорости в грунте траншей различной глубины

На рисунке 6 представлено распространение волн в случае глубины траншеи 7,5 м, а именно в случае, когда верхний слой грунта полностью разомкнут.

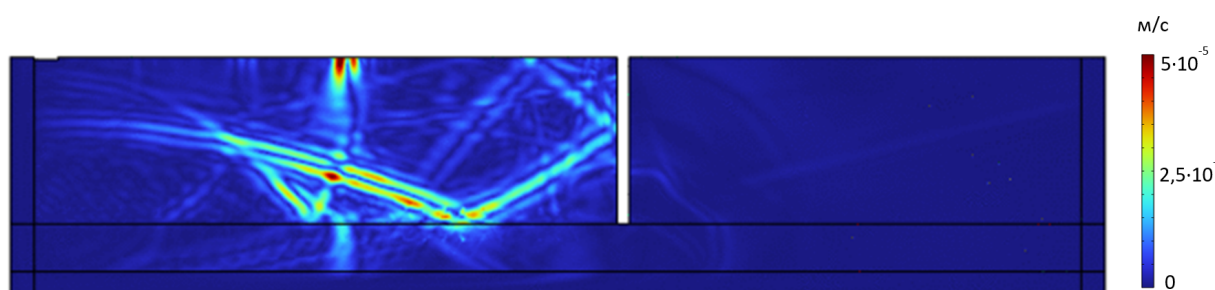


Рисунок 6 – Распространение вибрации при глубине траншеи 7,5 м

На рисунке 7 представлена эффективность Т-образных траншей. Изменение формы практически не повлияло на траншею глубиной 1 м.

На рисунке 8 показано распространение волн для Т-образной траншеи глубиной 5 м. Можно заметить, как меняется фронт волны возле траншеи – происходит дифракция звуковой волны на конце траншеи.

На рисунке 9 показана эффективность траншей с наклонными секциями. Видно, что наличие наклонной секции позволяет снижать вибрацию сильнее, чем в случае с Т-образной траншеей

На рисунке 10 представлено распространение волн для траншей с наклонными секциями. Из рисунка видно, что существенная часть волны отражается в обратном направлении и общий уровень виброскорости в точке снижается

В таблице 2 приведены виброскорости в точке за траншеей для всех рассмотренных в модели случаев. Как видно, самым эффективным является траншея глубиной 7,5 м.

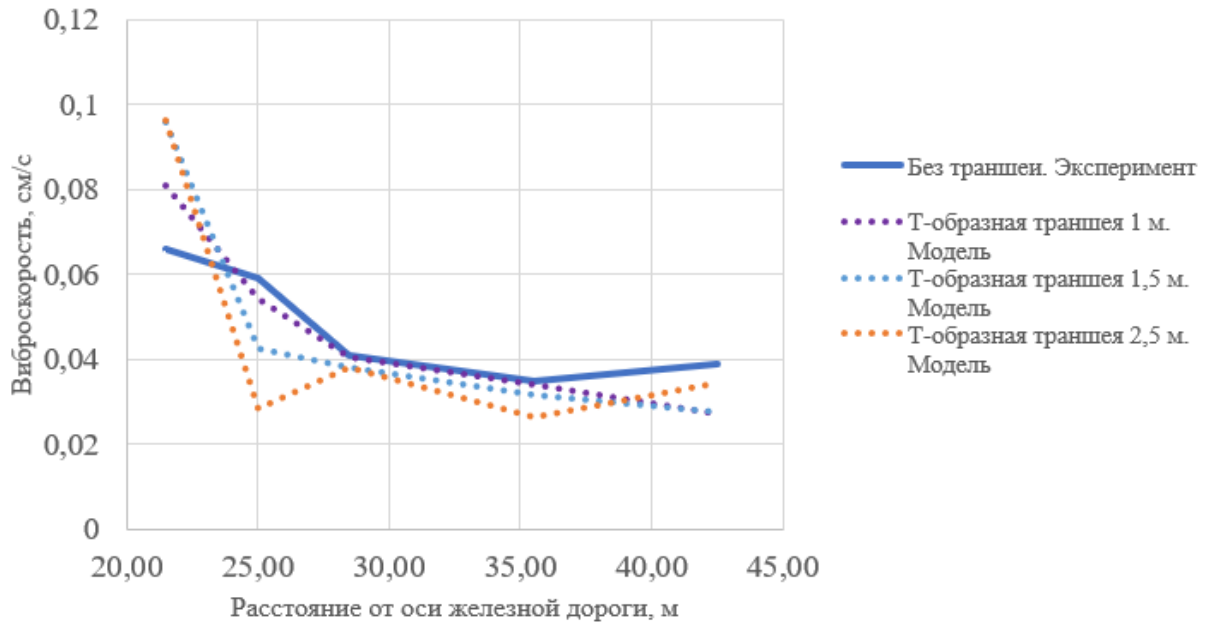


Рисунок 7 – Значение виброскорости в грунте для T-образных траншей

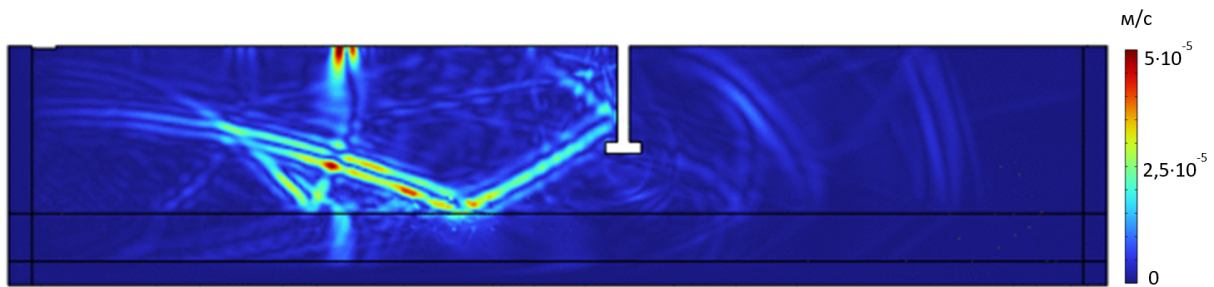


Рисунок 8 – Распространение вибрации при глубине T-образной траншеи 5 м

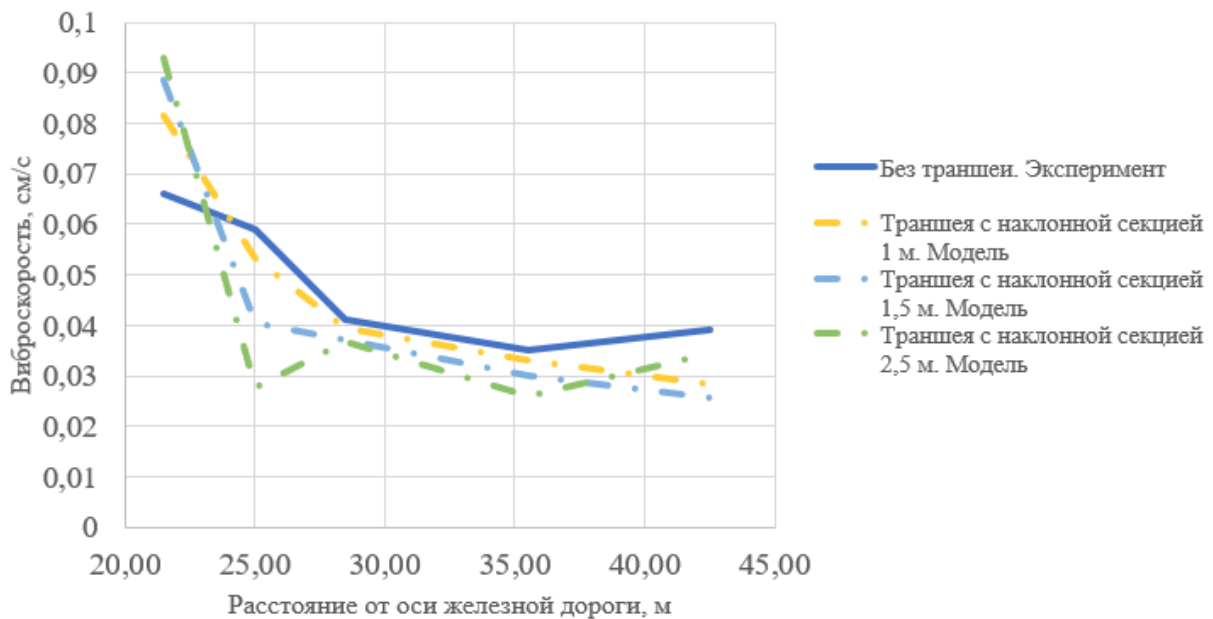


Рисунок 9 – Значение виброскорости в грунте для траншей с наклонными секциями

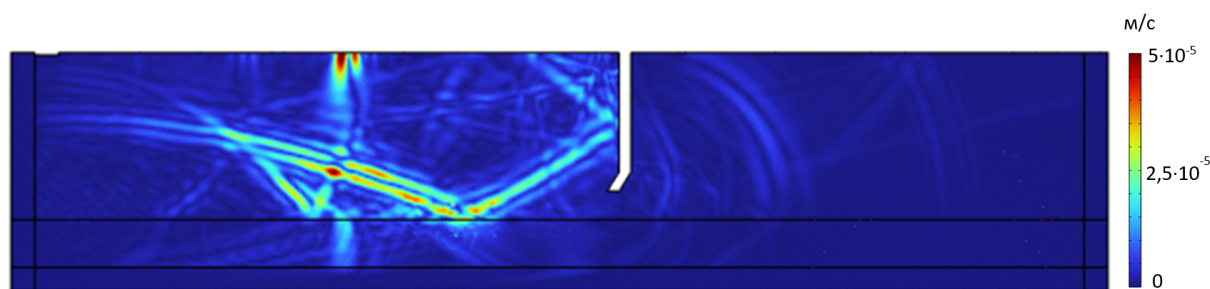


Рисунок 10 – Распространение вибрации при наклонной траншее глубиной 5 м

Таблица 2 – Значения виброскоростей, см/с, для всех рассматриваемых случаев

Рассматриваемый случай	Расстояние от оси железной дороги, м				
	21,5	25,0	28,5	35,5	42,5
Экспериментальные данные					
Без траншеи	0,066	0,059	0,041	0,035	0,039
Траншея 1 м	0,080	0,047	0,045	0,035	0,03
Траншея 1,5 м	0,090	0,040	0,043	0,035	0,03
Траншея 2,5 м	0,098	0,028	0,046	0,035	0,035
Данные из численного моделирования					
Без траншеи	0,059	0,052	0,035	0,031	0,037
Траншея 1 м	0,084	0,055	0,041	0,035	0,028
Траншея 1,5 м	0,102	0,044	0,041	0,033	0,029
Траншея 2,5 м	0,111	0,032	0,043	0,030	0,039
Траншея 5 м	0,116	0,021	0,037	0,028	0,031
Траншея 7,5 м	0,120	0,006	0,036	0,027	0,031
Т-образная траншея 1 м	0,081	0,054	0,041	0,034	0,027
Т-образная траншея 1,5 м	0,096	0,043	0,038	0,032	0,027
Т-образная траншея 2,5 м	0,096	0,025	0,038	0,026	0,034
Траншея с наклонной секцией 1 м	0,082	0,053	0,040	0,033	0,028
Траншея с наклонной секцией 1,5 м	0,088	0,040	0,037	0,030	0,026
Траншея с наклонной секцией 2,5 м	0,093	0,022	0,037	0,026	0,034

Заключение

В данной работе была построена численная модель распространения вибрационных волн, возникающих при движении поездов. В модели учитывалось наличие траншей разной формы и глубины. Данная модель была валидирована на основе экспериментальных данных, при этом ошибка модели составила 12%.

На основе данной модели были проведены численные эксперименты, в которых форма траншей была изменена. Было выявлено, что наиболее эффективной формой траншеи была бы прямая траншея глубиной 7,5 м, так как в данном случае происходит разрыв верхнего слоя грунта, по которому распространяется большая часть вибрационной энергии. Однако с практической точки зрения данная траншея может оказаться

достаточно ресурсозатратной и экономически невыгодной.

С точки зрения авторов данной работы наиболее оптимальным вариантом является траншея глубиной 2,5 м с наклонной секцией.

Список использованных источников

1. Балькин В.М. Элементы воздействия транспорта на здания и сооружения. Их защита от транспортного шума и вибраций // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. - 2013. - N 3 (11). - С. 44-45. DOI: 10.17673/Vestnik.2013.03.8
2. Соколов Д.А., Головина Е.И. Визуальное представление воздействия виброакустического фактора от железнодорожного транспорта на селитебную зону // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. - 2024. - Том 28. - N 1. - С. 118-125. DOI 10.36622/2541-9110.2024.28.1.012
3. Nistri F., Bosia F., Gliozzi A.S. [et al.] Design and in field validation of a modular metamaterial for mitigation of railway induced vibrations // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. - 2024. - Vol. 180. - P. 1-12. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.108594
4. Cui K., Xu Z.-D., Marzani A., Pu X. A multiple scattering formulation to design meta-trenches for mitigating low-frequency ground-borne vibrations induced by surface railways and subways // Journal of Sound and Vibration. - 2023. - Vol. 562. - P. 1-15. DOI: 10.1016/j.jsv.2023.117845
5. Istegün B., Çelebi E., Kırtel O., Faizan A. A., Goktepe F., Zülfiyar A. C., Subaş A., Navdar M. B. Mitigation of high-speed train-induced environmental ground vibrations considering open trenches in the soft soil conditions by in-situ tests // Transportation Geotechnics. - 2023. - Vol. 40. - P. 1-16. DOI: 10.1016/j.trgeo.2023.100980
6. Çelebi E., Kırtel O., Istegün B., Goktepe F., Navdar M. B., Subaş A., Zülfiyar A. C. Mitigation of high-speed train induced surface vibrations by open trench with aerated concrete panel walls // Construction and Building Materials. - 2023. - Vol. 400. - P. 1-19. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132771

References

1. Balkin V.M. Elements of transport impact on buildings and structures. Their protection from transport noise and vibrations // Vestnik SGASU. Urban Planning and Architecture. - 2013. - No. 3 (11). - P. 44-45. DOI: 10.17673/Vestnik.2013.03.8
2. Sokolov D.A., Golovina E.I. Visual representation of the impact of vibroacoustic factors from railway transport on residential areas // Housing and Utilities Infrastructure. - 2024. - Vol. 28. - No. 1. - P. 118-125. DOI 10.36622/2541-9110.2024.28.1.012
3. Nistri F., Bosia F., Gliozzi A.S. [et al.] Design and in field validation of a modular metamaterial for mitigation of railway induced vibrations // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. - 2024. - Vol. 180. - P. 1-12. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.108594
4. Cui K., Xu Z.-D., Marzani A., Pu X. A multiple scattering formulation to design meta-trenches for mitigating low-frequency ground-borne vibrations induced by surface railways and subways // Journal of Sound and Vibration. - 2023. - Vol. 562. - P. 1-15. DOI: 10.1016/j.jsv.2023.117845
5. Istegün B., Çelebi E., Kırtel O., Faizan A. A., Goktepe F., Zülfiyar A. C., Subaş A., Navdar M. B. Mitigation of high-speed train-induced environmental ground vibrations considering open trenches in the soft soil conditions by in-situ tests // Transportation Geotechnics. - 2023. - Vol. 40. - P. 1-16. DOI: 10.1016/j.trgeo.2023.100980

6. Çelebi E., Kırtel O., İstegün B., Goktepe F., Navdar M. B., Subas A., Zülfiyar A. C. Mitigation of high-speed train induced surface vibrations by open trench with aerated concrete panel walls // *Construction and Building Materials*. - 2023. - Vol. 400. - P. 1-19. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132771