

O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI FANLAR AKADEMIYASI  
АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

МЕХАНИКА  
МУАММОЛАРИ

O‘ZBEKISTON  
JURNALI

$\frac{2}{2023}$

УЗБЕКСКИЙ  
ЖУРНАЛ

ПРОБЛЕМЫ  
МЕХАНИКИ

*Журнал под таким названием издается с января 1992 г.*

Ташкент – 2023

## Исследования распространения колебаний, создаваемых Движением грузового транспорта, в грунтах

Мирсаидов М.<sup>1</sup>, Юлдашев Ф.Ш.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства, Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup>Наманганский инженерно-строительный институт, Наманган, Узбекистан

E-mail: [mirsaidov1948@mail.ru](mailto:mirsaidov1948@mail.ru), [faxa.star@gmail.com](mailto:faxa.star@gmail.com)

**Аннотация.** В статье рассмотрено трёхмерная задача о распространении вибраций в грунте, создаваемых грузовым транспортным средством. Нагрузка, создаваемая грузовым транспортом, представлена в виде динамической силы. Задача решается методом конечных элементов. Используются конечные элементы в виде неправильного тетраэдра. Приведены фрагменты результатов исследований по определению степени влияния физических параметров грунта на уровень вибраций, распространяемой в грунте. Проверались перемещения колебаний грунта в различных, удаленных от магистральной дороги, точках.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога, метод конечных элементов, грунт, теория упругости, упругие волны, вибрация, граничные условия, бесконечная плоскость, скорость.

**Введение.** В настоящее время, в результате увеличения численности населения, строительства зданий и сооружений, развития производственных процессов в промышленности растет спрос на транспортные средства, перевозящие людей и грузы.

Грузовой транспорт является удобным транспортным средством для обслуживания людей и перевозки различного вида грузов. Поэтому потребность в нем растет, количество грузовых транспортных средств увеличивается из года в год, появляются современные его типы, то есть увеличивается мощность и скорость.

В исследовании [1] анализируется взаимосвязь между типом и техническим состоянием дорожных покрытий, динамическими нагрузками, создаваемыми транспортным средством, и уровнем вибраций, распространяющихся в окружающей среде. Измерения вибрации проводились в восьми разных местах. Динамическая нагрузка измеряется для легковых и грузовых автомобилей. В результате измерений и сравнительного анализа установлено, в какой степени тип дорожного покрытия, его техническое состояние, а также различные динамические нагрузки, создаваемые транспортным средством, влияют на уровень вибрации, распространяющейся в окружающей среде.

Уровень воздействия шума и вибраций, создаваемых при движении транспортных средств, превышает санитарные нормы в несколько раз, возникает много нареканий на необходимость его снижения. В результате экспериментальных опросов населения проблема подобного рода подтверждается, а значит, данная тема остается актуальной [2].

Поскольку грунт является носителем, передающим колебания от источника к зданию или сооружению, необходимо определить свойства грунта, способствующие передаче колебаний через грунт [3, 4].

Колебания, возникающие в грунте в непосредственной близости от транспортных сооружений, приводят к возникновению изменений конструкции здания и структуры грунта. Эти негативные изменения чаще встречаются в зданиях, подверженных колебаниям, вызванными непрерывным движением транспортных средств. Учитывая это, в статье изучались колебания, создаваемые грузовыми транспортными средствами в близлежащих зданиях и грунте [5].

Влияние вибрации, создаваемой движущимся транспортом, на людей, здания и производства, расположенные вблизи её источника, было изучено в работе G.R.Watts [6]. На основе проведенных опросов среди населения была подробно изложена суть проблемы, методы прогнозирования степени раздражения при воздействии вибраций и шумов. Изучается влияние вибрации, создаваемой движением транспортных средств, на здания и приводятся данные ряда исследований. Исследования показали недостатки зданий, подверженных постоянным вибрациям.

Agostinacchio M., Ciampa D., Olita S. в своей статье [7] экспериментально проверили взаимодействие между колёсами и дорожным покрытием, при котором

вызывается динамическое возбуждение, генерируются волны, распространяющиеся в почве и ударяющиеся о фундаменты близлежащих зданий и сооружений.

Aires Colaço и Pedro Alves Costa проверили вибрации, вызванные движением железнодорожных поездов, в зданиях, с помощью метода конечных элементов 3D [8]. Авторы представили в данной работе общую и эффективную методику моделирования для решения задачи о распространении колебаний в грунтах.

Главной особенностью рассматриваемой нами методики является ее способность эффективно решать задачи с учетом дорожных и грунтовых свойств, т.е. позволяет моделировать большие площади в короткие сроки. При динамической оценке отклика для наблюдательной точки, расположенной в -15м, -25м и -35м от магистральной дороги для анализируемого конкретного случая, было достигнуто сокращение времени расчета почти на 50%.

Данная исследовательская работа направлена на определение уровня вибраций, возникающих в грунте, расположенном вблизи автомобильной дороги.

Результаты исследования показывают, что было выполнено большое количество работ для определения колебаний, создаваемых движением грузового транспорта, в большинстве которых были получены удовлетворительные результаты. В данном исследовании сравнивались результаты, полученные для различных видов грунтовых оснований.

При рассмотрении волновых процессов в грунте используются следующие модели грунта [9]:

1. Модель Мора-Кулона (упруго идеально пластическое поведение);
2. Модель упрочняющегося грунта;
3. Модели слабого грунта;
4. Модель нелинейного расширения (А.П. Сеницына).

В [24] сказано, что при расчете колебаний здания и сооружения допускается исходить из предположения о линейно-упругих свойствах основания для оценки его прочности с учетом взаимодействия несущих конструкций фундамента и соблюдением санитарных норм.

Авторы, изучающие свойства грунтов и сооружений при динамическом воздействии, используют упругопластические модели. Они проще в использовании и хорошо изучены. Однако результаты, полученные с помощью этих моделей, не всегда совпадают с результатами, полученными в ходе экспериментов. Модели вязкопластичных сред дают результаты, более соответствующие результатам эксперимента, но ими сложно пользоваться. Модель нелинейного расширения грунта позволяет рассматривать задачи, связанные с распространением волн в грунте и их взаимодействием с элементами зданий и сооружений, и получать параметры волн, существенно отличающиеся от показателей, полученных с использованием моделей идеальных упругих и нелинейно-упругих сред.

В рассматриваемой задаче определены уровни вибрации в грунте в результате движения грузового транспортного средства. В качестве модели было взято грунтовое основание с участком шириной 100 м, длиной 100 м и глубиной 20 м. В вопросе также учитывалось влияние грунтовых вод на глубину до 20 м от поверхности земли. В качестве примера были выбраны характеристики грунта, приведенные в таблицах 1 и 2.

При формировании асфальтобетонного покрытия для транспортной инфраструктуры был использован чертеж, приведенный на рисунке 1, исходя из норм строительства автомобильных дорог.

В соответствии с чертежом на грунт с отметки -1,5 метров над поверхностью укладывают 1 м уплотнённого щебня и 50 см бетонного основания, на которое проектируют асфальтобетонное покрытие толщиной 50 см. Исследовано движение грузового автомобиля массой 45 т вместе с грузом. Грузовой транспорт движется со скоростью 72 км/ч. Так как выбранная предельная площадь имеет длину 100 м, то время вибрации, воздействующей на грунтовое основание, продолжается до полного прохождения грузового транспорта. Исследуемая область разбита на 8701 конечных элементов. Формы конечных элементов выбраны в виде неправильного тетраэдра.

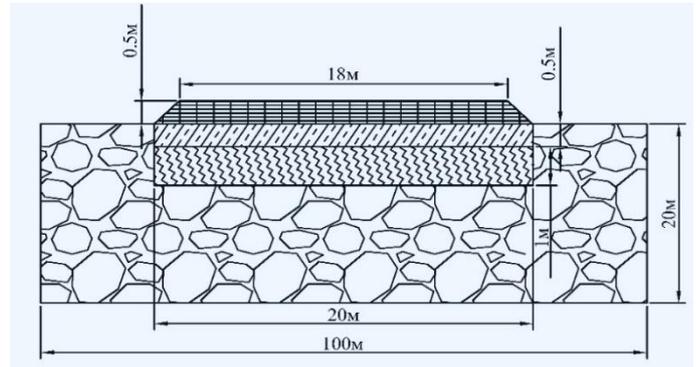


Рис. 1. Поперечный срез асфальтового основания для проектирования дороги

Считается, что динамические нагрузки через колеса грузовика влияют на покрытие автомобильной дороги. Определим перемещения и скорости полученных узлов в грунтах с учетом физико-механических характеристик материала. В этой задаче мы заменим бесконечное полупространство конечным параллелепипедом [10, 11, 12, 13]. При этом на гранях параллелепипеда, где отброшено продолжение среды, ставятся условия

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= a\rho V_p \dot{u} \\ \tau_{yz} &= b\rho V_s \dot{u} \\ \tau_{zy} &= b\rho V_s \dot{w} \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} \sigma_y &= a\rho V_p \dot{v} \\ \tau_{xz} &= b\rho V_s \dot{w} \\ \tau_{zx} &= b\rho V_s \dot{u} \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} \sigma_z &= a\rho V_p \dot{w} \\ \tau_{xy} &= b\rho V_s \dot{u} \\ \tau_{yx} &= b\rho V_s \dot{v} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Кинематическое отношение может быть сформулировано следующим образом:

$$\varepsilon = Lu \quad (2)$$

$L^T$ - это транспонирование дифференциального оператора, который определяется как

$$L^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Для решения задачи воспользуемся методом конечных элементов. Предельная динамическая модель поля решения задачи представлена на рис 2.

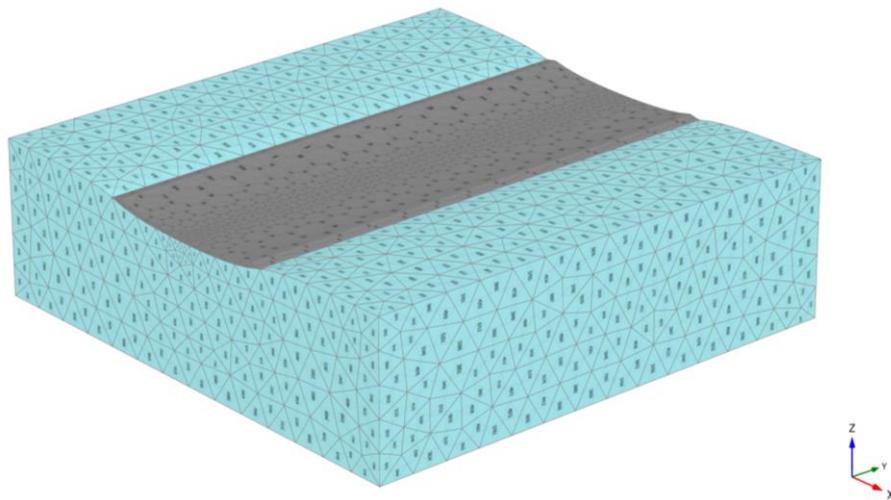


Рис.2. Модель, в которой область разбита на конечные элементы

Основное уравнение, зависящее от времени движения объема под действием динамической нагрузки, выражается следующим образом:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F, \quad (4)$$

где  $M$  – матрица масс,  $u$  – вектор смещения,  $C$  – матрица демпфирования, которая также учитывает граничные условия,  $K$  – матрица жесткости,  $F$  – вектор нагрузки. Перемещение  $u$ , скорость  $\dot{u}$  и ускорение  $\ddot{u}$  могут меняться со временем.

Здесь теория описана в основах линейной упругости. Однако в принципе все модели можно использовать для динамического анализа. Состояние почвы может быть как подсушенным, так и не подсушенным. (В исследуемых участках для получения данных могут присутствовать уровень грунтовых вод или их отсутствие). В программе Plaxis 3D можно решать задачи с присутствием уровня воды так и отсутствием воды.

Матрица  $M$  учитывает массу материалов (грунт+вода+любая структура).

Формирование интегрирования по времени в численном представлении динамики важным фактором является устойчивость и точность вычислительного процесса. Используется схема численного интегрирования Ньюмарка.

Свойства грунта и материалов приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1.

| Физико-механические свойства материалов       |                   |                  |                 |               |                        |
|---|-------------------|------------------|-----------------|---------------|------------------------|
| Параметр                                      | Единица измерения | Обозначение      | Название грунта |               |                        |
|   |                   |                  | Глина           | Твёрдый песок | Глинистая мягкая почва |
| Общие свойства                                |                   |                  |                 |               |                        |
| Модель грунта                                 | –                 | –                | Мора-Кулон      | Мора-Кулон    | Мягкий грунт           |
| Тип поведения материала                       | –                 | –                | Дренированный   | Дренированный | Недренированный (A)    |
| Удельный вес грунта выше уровня грунтовых вод | $kN/m^3$          | $\gamma_{unsat}$ | 16              | 17            | 15                     |
| Удельный вес грунта ниже уровня грунтовых вод | $kN/m^3$          | $\gamma_{sat}$   | 18              | 20            | 18                     |
| Начальный коэффициент пористости              | –                 | $e_{init}$       |                 |               | 1                      |
| Механические параметры                        |                   |                  |                 |               |                        |
| Модуль Юнга (постоянная величина)             | $kN/m^2$          | $E'_{ref}$       | 10000           | 75000         |                        |
| Коэффициент Пуассона                          | –                 | $\nu / \nu_{ur}$ | 0.35            | 0.3           |                        |
| Сцепление (постоянное)                        | $kN/m^2$          | $c'_{ref}$       | 5               | 1             | 1                      |
| Угол внутреннего трения                       | °                 | $\varphi'$       | 25              | 31            | 25                     |
| Угол дилатансии                               | °                 | $\psi$           | 0               | 0             | 0                      |
| Коэффициент сжимаемости                       | –                 | $\lambda *$      |                 |               | 0.05                   |
| Коэффициент набухания                         | –                 | $k *$            |                 |               | 0.01                   |

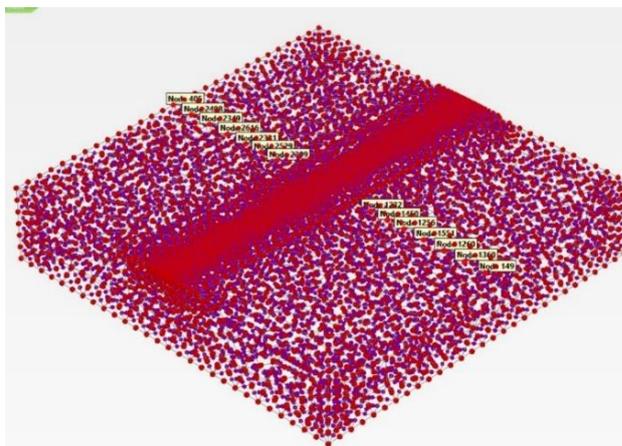
Таблица 2.

Особенности балластного слоя

|               |         |        |       |
|---------------|---------|--------|-------|
| Слой балласта | Асфальт | Щебень | Бетон |
|---------------|---------|--------|-------|

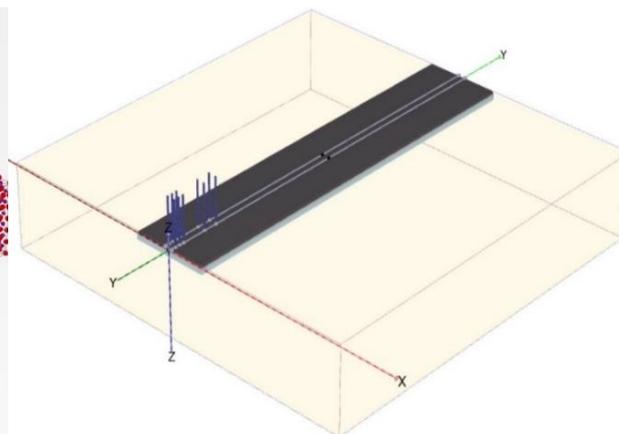
| Особенности укладки  |                    |               |                    |
|--|--------------------|---------------|--------------------|
| №  | 1                  | 2             | 3                  |
| Модель грунта  | Линейно эластичный | Мора-Кулон    | Линейно эластичный |
| Тип поведения материала  | Дренированный      | Дренированный | Непористый         |
| Удельный вес грунта выше уровня грунтовых вод - $\gamma_{\text{unsat}}$ [kN/m <sup>3</sup> ] | 20                 | 19            | 22,50              |
| Удельный вес грунта ниже уровня грунтовых вод - $\gamma_{\text{sat}}$ [kN/m <sup>3</sup> ]   | 20                 | 17,5          | 22,50              |
| Угол внутреннего трения – $\varphi$ [°]  |                    | 25            | –                  |
| Угол дилатансии – $\psi$ [°]   |                    | 4             | –                  |
| Сцепление (постоянное) - $c_{\text{ref}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]                               |                    | 14,0          | –                  |
| Модуль Юнга - E [kN/m <sup>2</sup> ]   | 2.1e6              | 55            | 26e6               |
| Коэффициент Пуассона - $\nu$   | 0.4                | 0,3           | 0,2                |

### Результаты.



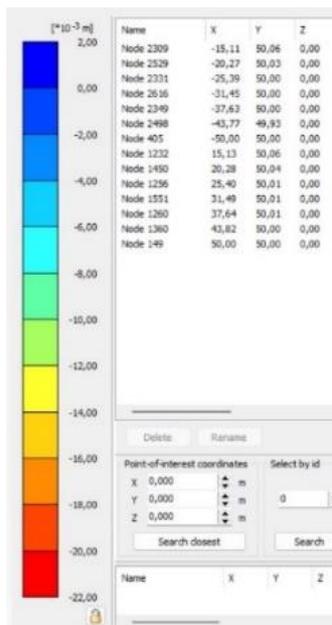
а)

а) Схема дискретизации выделенной области

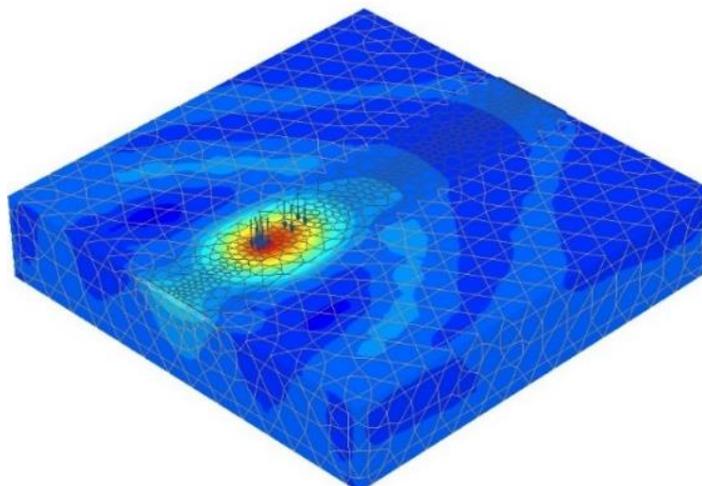


б)

б) Расположения магистральной дороги, и движений нагрузки на выделенной ограниченной области



в) Координаты расположения наблюдаемых точек в рассматриваемой области



г) Перемещение точек по направлению оси z

Рис. 3. Уровни вибрации в каждом узле проверяемой модели

Графики на рис. 4-6 детализировались, сравнивалось колебания, возникающие в результате движения грузовика, в грунте, находящемся на разном расстоянии от асфальтобетонного дорожного полотна. Для анализа различия уровней распространения колебаний в двух случаях были проанализированы перемещения колебаний в нескольких точках, то есть на расстоянии -15 м, -25 м и -35 м от асфальтобетонного основания.

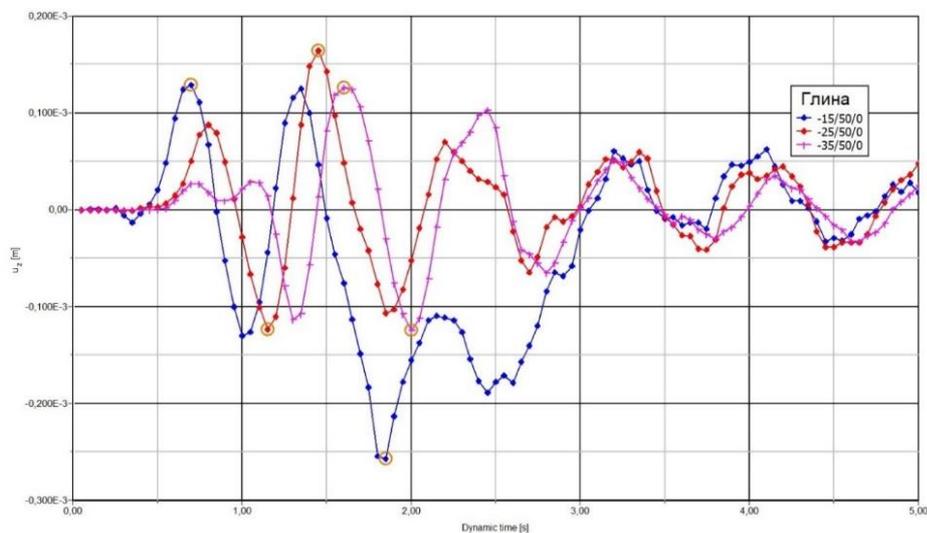


Рис.4. График зависимости от времени перемещения колебаний, возникающих в глинистом грунтовом основании

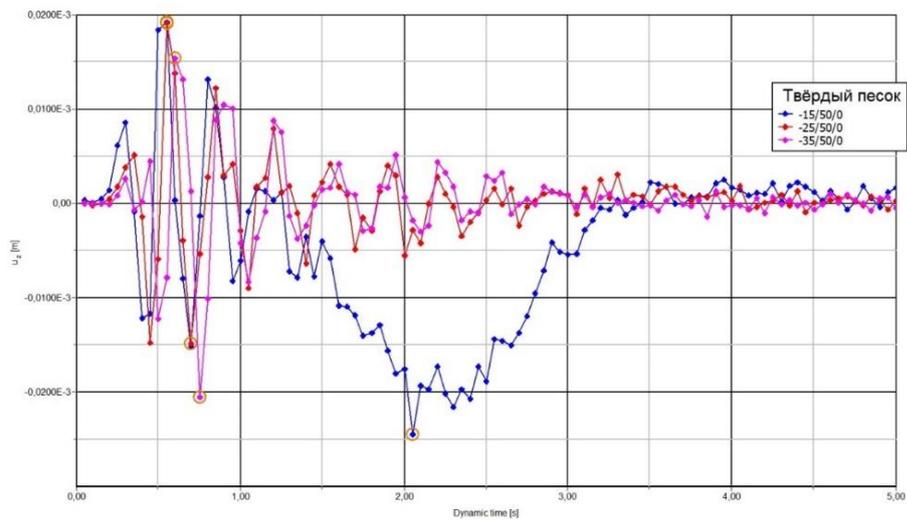


Рис.5. График зависимости от времени перемещения колебаний, возникающих в твёрдо-песчаном грунтовом основании на различных расстояниях

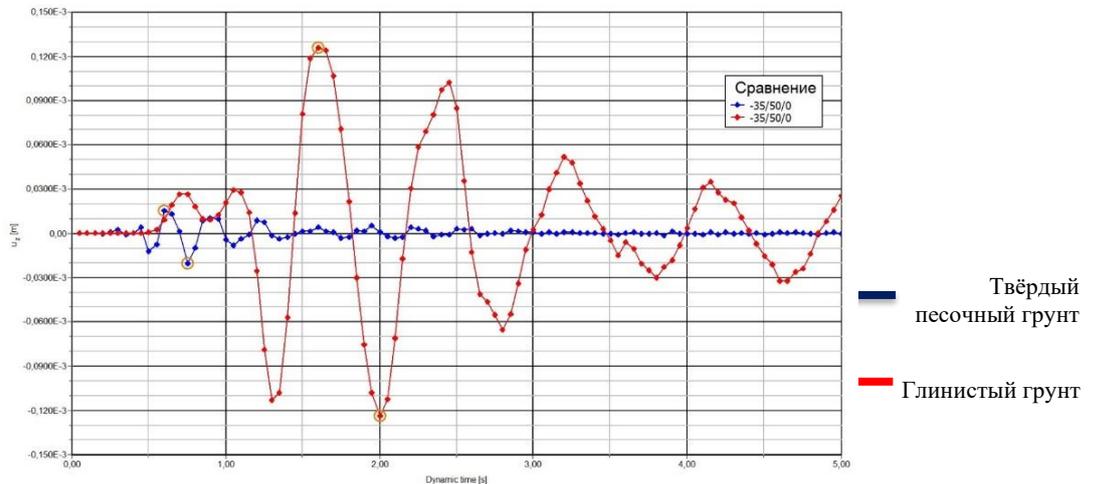


Рис.6. График зависимости от времени перемещения колебаний, в сравнении глинистым и твёрдо-песчаным грунтовым основанием

**Выводы.** Проведено сравнение результатов, полученных при решении задач о распространении вибраций для двух случаев (твёрдо-песчаное, глинистое) грунтовых оснований. Установлено, что разность наибольших значений виброперемещений в глинистом грунтовом основании с координатой  $x = -35, y = 50, z = 0$  в сравнении с перемещениями точки с координатами  $x = -15, y = 50, z = 0$  уменьшается в 2,32 раза. Аналогично в твёрдо-песчаном грунтовом основании  $x = -35, y = 50, z = 0$  в сравнении с перемещениями точки с координатами  $x = -15, y = 50, z = 0$  уменьшается в 3 раза. Выявлено, что распространение колебаний в грунтах и сооружениях зависит от их свойств (модуля упругости, коэффициента Пуассона, плотности). Исходя из этого, можно сказать, что при изучении процесса распространения вибраций в грунтах необходимо учитывать реальные физические параметры. Таким образом, на основе полученных результатов можно сказать, что степень вибрации, возникающей в результате движения транспортных средств в значительной степени зависит от свойства грунтов. Следовательно, при расчетах необходимо учитывать физико-механические свойства грунтов, касающиеся рассматриваемой местности.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Ильичев В.А., Маткаримов П.Ж., Юлдашев Ш.С.* Исследование вынужденных колебаний неоднородной плоской системы с учетом пассивной виброизоляции // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1999. – №. 2.
- [2] *Томпсон Д.Дж., Цзян Дж., К МГР, Хусейн М.Ф.М., Дийкманс А., Кулиер П., Дегранд Г., Ломберт Г.* Снижение вибрации, вызванной железной дорогой, с помощью усиления грунтового основания. Динамика грунтов и сейсморазведка, 2015 г.; 79: 89-103.
- [3] *Цытович Н.А.* Механика грунтов [Текст] / Н. А., Цытович. – М.: Высш.шк., 1983. – 288 с.
- [4] *Тер-Мартirosян З.Г.* Механика грунтов [Текст] / З.Г.Тер-Мартirosян. – М.: Издательство АСВ, 2005. – 488 с.
- [5] *Yuldashev S. S., Boytemirov M.* Влияние уровня расположения железнодорожного полотна на уровень распространения волн от движения поездов //Theoretical & Applied Science. – 2020. – №. 5. – С. 140-143.
- [6] *Watts G.R.* Traffic Induced Vibrations in Buildings, Research Report 246, Transport and Road Research Laboratory, Department of Transport, UK, 1990.
- [7] *Agostinacchio M., Ciampa D., Olita S.* The vibrations induced by surface irregularities in road pavements—a Matlab® approach //European Transport Research Review. – 2014. – Т. 6. – №. 3. – С. 267-275.
- [8] *Aires Colaço, Pedro Alves Costa.* Vibrations induced by railway traffic in buildings: Experimental validation of a substructuring methodology based on 2.5D FEM-MFS and 3D FEM // Engineering Structures. Volume 240, 1 August 2021, 112381
- [9] П.м. 52415 Российская Федерация, МПК7 E02D 27/34. Экран для защиты зданий и сооружений от вибраций // А. П. Бобряков, А. В. Лубягин. – № 2005118573/22; заявл. 15.06.2005; опубл. 27.03.2006; Бюл. № 9. – 2 с.
- [10] *Ильичев В.А., Юлдашев Ш.С., Саидов С.М.* Исследование распространения вибрации при прохождении поездов в зависимости от расположения железнодорожного полотна // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1999. – №. 2. – С. 12-13.
- [11] *Юлдашев Ш.С. и др.* Влияние высоты расположения железнодорожного полотна на уровень колебания грунта, возникающего при движении поездов //Научное знание современности. – 2018. – №. 10. – С. 55-57.
- [12] *Il'ichev V.A., Yuldashev S.S., Saidov S.M.* Propagation of vibration from trains in relation to track position //Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 1999. – Т. 36. – №. 2. – С. 55-56.
- [13] *Lysmer J., Kuhlemeyer L.* Finite Dynamic Model for Infinite Media // Jour Engineering Mechanics Division.ASCE. 1969. Vol. 95.NoEM4.August.P. 859 – 887.
- [14] *Юлдашев Ш.С., Маткаримов П.Ж.* Распространение вибраций в грунтах от транспортных средств и виброзащитные система // Ташкент,“Фан ва технологиялар маркази. – 2014.
- [15] *Юлдашев Ш.С., Саидов С.М., Набиев М.Я.* Распространение вибраций в грунтах, возникающих при движении железнодорожных поездов // Молодой ученый. – 2015. – №. 11. – С. 481-483.
- [16] *Юлдашев Ш.С., Карабаева М.У.* Прогнозирование уровня вибрации в грунтах, распространяющейся от тоннелей метрополитена круглого сечения // Молодой ученый. – 2016. – №. 6. – С. 249-253.
- [17] *Ильичев В.А., Юлдашев Ш.С.* Методика прогнозирования колебаний грунта от движений железнодорожных поездов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2006. – №. 1. – С. 3-8.
- [18] *Yuldashev S.S., Karabaeva M.U.* Колебания поверхности грунта при движении поездов метро в параллельных тоннелях // Theoretical & Applied Science. – 2020. – №. 5. – С. 117-121.
- [19] *Il'ichev V.A., Yuldashev S.S., Matkarimov P.Z.* Forced vibrations of an inhomogeneous planar system with passive vibrational insulation // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 1999. – Т. 36. – №. 2. – С. 50-54.
- [20] *Mirsaidov M., Boytemirov M., Yuldashev F.* Estimation of the Vibration Waves Level at Different Distances //Proceedings of FORM 2021. – Springer, Cham, 2022. – С. 207-215.
- [21] СП 22.13330.2016. Основания здания и поддержание. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\* [Текст]. – Москва: Минстрой России, 2016. – 220 с.
- [22] *Юлдашев Ф.Ш., Ваховов Б.Ж.* Матрица научного познания // Матрица научного познания Учредители: Общество с ограниченной ответственностью" Омега сайнс". – С. 93-99.
- [23] *Юлдашев Ф.Ш., Ваховов Б.Ж.* Нестационарная динамическая задача теории упругости о распространения вибраций, возникающих при движении железнодорожных поездов. // Научный электронный журнал «матрица научного познания». – С. 93.

Дата поступления

18.02.2023

***Мирсаидов М., Юлдашев Ф. Ш. Юк ташувчи транспорт воситалари ҳаракатидан, грунтда ҳосил бўладиган тебранишлар тарқалишини тадқиқот қилиш***

***Аннотация:*** Мақолада, юк автомобиллари ҳаракати натижасида грунтда ҳосил бўлган тебранишларнинг тарқалишини уч ўлчовли масаласи кўриб чиқилган. Юк автомобиллари ҳаракати натижасида ҳосил бўлган юк динамик куч сифатида ифодаланган. Муаммо чекли элементлар усули билан ҳал қилинган. Чекли элемент сифатида нотўғри тетраэдр шаклидаги элементлар ишлатилган. Тупроқнинг физик параметрларининг тупроқда тарқаладиган тебранишлар даражасига таъсир даражасини аниқлаш бўйича тадқиқотлар натижаларининг айримлари келтирилган. Асосий йўлдан узоқда жойлашган турли нуқталарда ер тебранишларида грунтнинг кўчишлари текирилган.

***Калит сўзлари:***автомобил йўли, чекли элемент усули, грунт, эластиклик назарияси, эластик тўлқинлар, тебраниш, чегаравий шартлар, чекзик текислик, тезлик

***M. Mirsaidov, F.SH. Yuldashev Studies of the propagation of oscillations created by the movement of freight transport in soils.***

***Annotation.*** The article considers a three-dimensional problem of the propagation of vibrations in the ground, created by a cargo vehicle. The load created by freight transport is presented as a dynamic force. The problem is solved by the finite element method. Finite elements in the form of an irregular tetrahedron are used. Fragments of the results of studies to

*determine the degree of influence of the physical parameters of the soil on the level of vibrations propagated in the soil are given. The movements of ground vibrations were checked at various points remote from the main road.*

**Keywords:** *road, finite element method, soil, theory of elasticity, elastic waves, vibration, boundary conditions, infinite plane, speed.*