

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 9, №4 (2017) <http://naukovedenie.ru/vol9-4.php>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/61TVN417.pdf>

Статья опубликована 06.09.2017

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Мальцева Т.В., Трефилин Е.Р., Краев А.Н., Соколов В.Г., Цернант А.А. Моделирование влияния вертикального армирования на жесткость основания автомобильной дороги // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №4 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/61TVN417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**УДК 624.1**

**Мальцева Татьяна Владимировна**

ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья», Россия, Тюмень  
Проректор по научной работе  
Доктор физико-математических наук, профессор  
E-mail: [maltv@utmn.ru](mailto:maltv@utmn.ru)  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=632046](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=632046)

**Трефилина Елена Рудольфовна**

ФГБОУ ВО «Тюменский государственный университет», Россия, Тюмень  
Доцент кафедры «Математика и информатика»  
Кандидат физико-математических наук  
E-mail: [trefilina@utmn.ru](mailto:trefilina@utmn.ru)  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=453874](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=453874)

**Краев Алексей Николаевич**

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Россия, Тюмень<sup>1</sup>  
Доцент кафедры «Строительные конструкции»  
Кандидат технических наук  
E-mail: [kraevaln@tyuiu.ru](mailto:kraevaln@tyuiu.ru)  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=546741](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=546741)

**Соколов Владимир Григорьевич**

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Россия, Тюмень  
Заведующий кафедрой «Строительная механика»  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: [sokolovvg@tyuiu.ru](mailto:sokolovvg@tyuiu.ru)  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=524484](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=524484)

**Цернант Александр Альфредович**

АО «Научно-исследовательский институт транспортного строительства», Россия, Москва  
Заместитель генерального директора  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: [kiselev3452@gmail.com](mailto:kiselev3452@gmail.com)  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=60429](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=60429)

---

<sup>1</sup> 625000, Тюменская обл., г. Тюмень, ул. Володарского 38, к. 337а

## **Моделирование влияния вертикального армирования на жесткость основания автомобильной дороги**

**Аннотация.** В статье рассматривается проблема моделирования в рамках кинематической модели воздействия тела автодороги на водонасыщенное вертикально армированное основание, при котором тело дороги заменяется равномерно распределенной нагрузкой, приложенной в зоне ее контакта с дневной поверхностью основания. В рассматриваемой модели на некотором расстоянии от насыпи искусственно вводится полосовая нагрузка, направленная вверх от дневной поверхности, которая обеспечивает равенство нулю горизонтальных перемещений поровой воды на отрезке, совпадающим с вертикальным армированием. При этом уменьшается осадка дневной поверхности основания в средней точке тела дороги. Для уменьшения осадки основания определены значения силы, которая действует на заданном расстоянии от линии симметрии насыпи.

В результате исследований выявлено, что возможно уменьшение осадок от действия силы нагружения на 20 %. Эта величина может варьироваться в зависимости от выбора точки приложения и величины силы.

Также в результате проведенных расчетов при моделировании найдены значения силы, которую необходимо приложить на заданном расстоянии для уменьшения осадки от равномерно распределенной нагрузки. В частности, при заданной равномерно распределенной нагрузке МПа значение силы воздействия уменьшается в два раза, если пленку имитировать на расстоянии, сокращенном от оси симметрии насыпи до 0,8 м.

**Ключевые слова:** водонасыщенный грунт; основание автодороги; вертикальное армирование; напряженно-деформированное состояние; кинематическая модель; тело дороги; осадка дневной поверхности

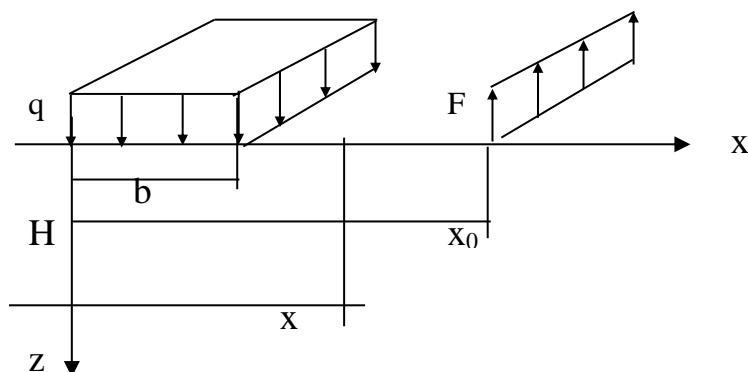
Проблемы строительства на слабых глинистых основаниях достаточно представлены в работах [1, 2].

Для возведения инженерных объектов разработано и внедрено множество способов искусственного усиления слабых грунтов основания, большинство из которых имеют достаточную эффективность. Производство всевозможных геосинтетических материалов, основанных на различных полимерных растворах, выступающих в качестве армирующих элементов для искусственного улучшения основания, широко применяются в строительстве. Использование армирующих элементов значительно повышает прочностные и деформативные характеристики грунтов [3-5].

Экспериментальные и теоретические исследования в рамках традиционных моделей, методики расчета оснований, усиленных армирующими элементами, под различными видами фундаментов представлены в работах [6-10].

При прохождении автомобильной дороги через болота или участки со слабым обводненным грунтом применяют также различные инженерные мероприятия, препятствующие движению воды в горизонтальном направлении из-под тела насыпи. Одновременно увеличивается жесткость основания и уменьшается осадка дневной поверхности в зоне контакта насыпи с основанием. В статье приводится аналитическое исследование уменьшения осадок в зоне контакта насыпи и основания.

Математическая постановка задачи следующая: тело насыпи заменяется равномерно распределенной нагрузкой  $q$ , приложенной в зоне контакта насыпи с дневной поверхностью водонасыщенного основания на расстоянии  $b$  от оси симметрии  $Oz$ . На некотором расстоянии  $x$  от насыпи искусственно вводится полосовая нагрузка  $F$ , направленная вверх от дневной поверхности и тем самым уменьшающая осадку дневной поверхности основания в средней точке насыпи (рис. 1).



**Рисунок 1.** Схема армированного основания автодороги (составлено авторами)

В точках окончания насыпи задаем расположение вертикальной преграды для движения воды. Введем два интеграла, один из которых характеризует горизонтальное перемещение поровой воды (индекс « $l$ »), вызванное прямоугольной нагрузкой  $q$ , а другой интеграл – горизонтальное перемещение поровой воды от полосовой нагрузки  $F$ . Запишем условие равенства этих интегралов

$$\int_0^H u_{l,x}^q(x, z) dz = \int_0^H u_{l,x}^F(x, z) dz, \quad (1)$$

которое описывает вертикальное препятствие горизонтальному перемещению поровой воды ( $F$  – искомая величина). Здесь  $H$ (м) – глубина сжимаемой толщины, индексы « $q$ » и « $F$ » указывают на горизонтальное движение частиц либо от насыпи ( $q$ ), либо от полосовой нагрузки ( $F$ ).

Задачи о действии равномерно распределенной нагрузки и о действии сосредоточенной силы на двухфазную (скелет грунта « $s$ » + поровая вода « $l$ ») полуплоскость можно описать с помощью одной и той же системы уравнений кинематической модели грунта [1], в которой наряду с допущениями теории упругости используются две гипотезы для поровой воды:

1. Относительная деформация поровой воды пропорциональна перепаду давлений, приходящемуся на единицу длины (физическое уравнение).
2. Относительные деформации поровой воды и скелета грунта пропорциональны и противоположны по знаку (уравнение взаимозамещения фаз).

Приведем систему уравнений кинематической модели в полярной системе координат:

$$\sigma_{s,r} - \sigma_{l,r} = \frac{-2F \cos \theta}{\pi r} \quad \text{– уравнение равновесия;}$$

$$\varepsilon_{s,r} = \frac{1}{E_s} \sigma_{s,r}, \quad \varepsilon_{l,r} = \frac{h}{E_l} \frac{\partial \sigma_{l,r}}{\partial r} \quad \text{– физические уравнения;}$$

$\varepsilon_{s,r} = -\chi\varepsilon_{l,r}$  – уравнение взаимозамещения фаз;

$$\varepsilon_{s,r} = \frac{\partial u_{s,r}}{\partial r}, \quad \varepsilon_{l,r} = \frac{\partial u_{l,r}}{\partial r} \quad \text{– соотношения Коши.}$$

С граничными условиями:

$$u_{s,r}(r = H) = 0,$$

$$u_{s,\theta}(\theta = 0) = 0,$$

где:  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,  $H$  – высота сжимаемой толщи.

Система уравнений сводится к линейному дифференциальному уравнению второго порядка относительно радиального перемещения скелета грунта  $u_{s,r}$ :

$$\frac{d^2 u_{s,r}}{dr^2} + a^2 \frac{du_{s,r}}{dr} = 0; \quad a^2 = \frac{E_l}{E_s \cdot \chi \cdot h},$$

где:  $a^2 (m^{-1})$  – универсальный параметр кинематической модели, так как он включает все параметры модели:  $E_s$  (МПа),  $E_l$  (МПа),  $h$  (м) и  $\chi$ . Параметр  $a^2$  является положительным числом, определяется из эксперимента [11, 12].

Второе граничное условие необходимо для определения константы  $f_1(\theta)$  и перемещений поровой воды  $u_{l,r}$  из физического уравнения

$$u_{l,r} = \frac{h}{E_l} \sigma_{l,r} + f_1(\theta).$$

По уравнениям совместности деформаций находим тангенциальное перемещение  $u_{s,\theta}$ . Переходя от полярной к декартовой системе координат по известным формулам теории упругости, получим горизонтальные и вертикальные перемещения. Например, приведем горизонтальное перемещение [13]:

$$u_{l,x}^F = \frac{F}{\pi E_s \chi} \left( \frac{2\chi z}{r^2} \left( e^{-a^2 r} \int_{\rho}^r \frac{e^{a^2 r}}{r} dr + (1-\nu^2) e^{-a^2 d} \int_{\rho}^d \frac{e^{a^2 r}}{r} dr \right) + (1+\nu)(1-2\nu) \frac{\chi^2}{r^2} \arcsin \frac{x}{r} e^{-a^2 r} \right),$$

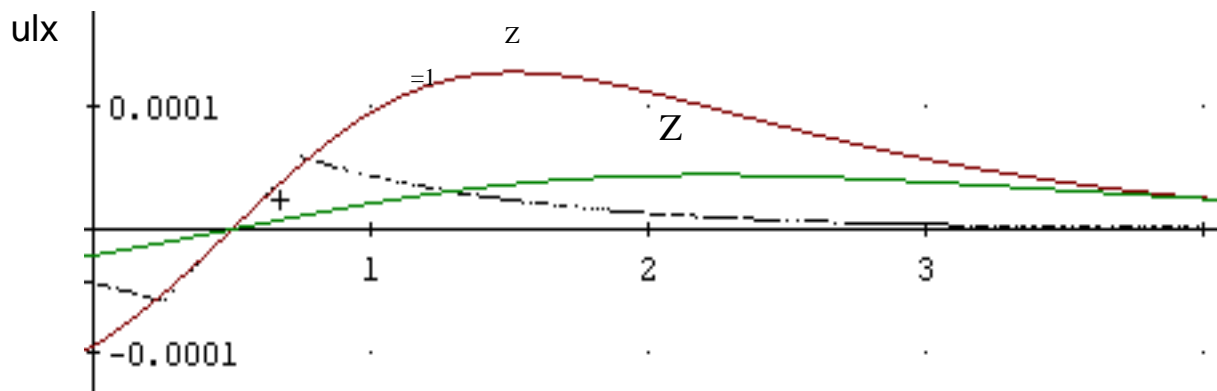
которое используется в формуле (1). Для определения перемещения  $u_{l,x}^q$  воспользуемся принципом суперпозиции.

Формула для вертикальных перемещений от действия сосредоточенной силы имеет вид:

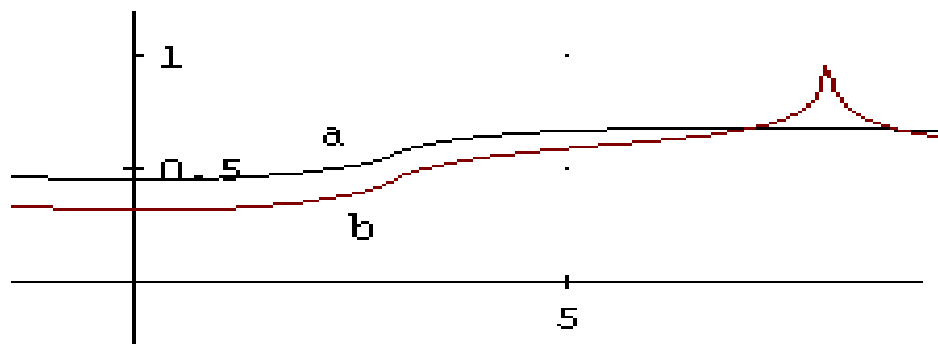
$$w_{s,z} = \frac{F}{\pi E_s} \left( 2(1-\nu^2) \left( -e^{-a^2 r} \int_{\rho}^r \frac{e^{a^2 r}}{r} dr + (1-\nu^2) e^{-a^2 d} \int_{\rho}^d \frac{e^{a^2 r}}{r} dr \right) - (1+\nu)(1-2\nu) \left( \frac{\nu}{1-\nu} a^2 r + 1 \right) \int_{\rho}^r \frac{e^{a^2 r}}{r} - 2(1+\nu)\nu \right).$$

На рисунках 2 и 3 приведены графики горизонтальных перемещений ( $u_{l,x}$ ) и осадки (вертикальное перемещение дневной поверхности  $w_{s,z}(z=0) = w_s$ ) без учета силы  $F$  (рис. 3, кривая  $a$ ) и от действия двух сил (рис. 3, кривая  $b$ ).

Графики приведены для модельной задачи:  $q = 0,0055$  МПа, загружаемый отрезок  $[0,25 \text{ м}, 0,75 \text{ м}]$ ,  $H = 1 \text{ м}$ ,  $a^2 = 1,2$ .



**Рисунок 2.** Изменение горизонтальных перемещений поровой воды по глубине  $z = 0$ ;  $1 \text{ м}$ ;  $3 \text{ м}$  (составлено авторами)



**Рисунок 3.** Графики осадки ( $a$ ) без учета силы  $F$  и ( $b$ ) от действия двух сил (составлено авторами)

Уменьшение осадок от действия силы  $F$  произошло на 20 %. Эта величина может варьироваться в зависимости от выбора точки приложения и величины силы  $F$ .

Найдены значения силы  $F$ , которую необходимо приложить на заданном расстоянии  $x$  для уменьшения осадки от равномерно распределенной нагрузки. В частности, при заданной равномерно распределенной нагрузке  $q = 0,0055$  МПа значение силы  $F = -0,001879252598$  МПа, если пленку имитировать на расстоянии  $x_0 = 1 \text{ м}$  от оси симметрии насыпи;  $F = -0,0005574620479$  МПа – при расстоянии  $x_0 = 0,8 \text{ м}$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мальцева Т. В. Математическая теория водонасыщенного грунта. Тюмень: «Вектор бук». 2012. – 240 с.
2. Мальцев Л. Е., Бай В. Ф., Мальцева. Кинематическая модель грунта и биоматериалов. Санкт-Петербург: Стройиздат СПб. 2002. – 336 с.
3. Липихин А. С., Воронцов В. В., Краев А. Н., Макаров А. С. Анализ деформированного состояния слабого глинистого армированного

- геотекстильным материалом, под действием полосовой нагрузки на маломасштабных моделях / Материалы международной научно-практической конференции: Актуальные проблемы строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири. Редакционная коллегия: М. Н. Чекардовский, Л. Н. Скипин, В. В. Воронцов, А. Е. Сбитнев. – Тюмень. 2014. С. 45-51.
4. Новиков Ю. А., Набоков А. В. Исследование напряженно-деформированного состояния водонасыщенного глинистого основания, усиленного песчаными армированными по контуру сваями под ленточным фундаментом // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 3 (44). С. 133-136.
  5. Бай В. Ф., Набоков А. В., Воронцов В. В., Краев А. Н. Способ повышения несущей способности фундаментов на слабых водонасыщенных основаниях. Патент на изобретение RUS 2363814. 06.11.2007.
  6. Бай В. Ф., Мальцева Т. В., Краев А. Н. Методика расчета слабого глинистого основания, усиленного песчаной армированной по контуру подушкой с криволинейной подошвой // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 5. – С. 108-111.
  7. Бай В. Ф., Мальцева Т. В., Набоков А. В., Воронцов В. В., Минаева А. В. Теоретические предпосылки расчета песчаных армированных массивов в слабых глинистых грунтах // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2011. № 1. С. 102-106.
  8. Игошин М. Е., Воронцов В. В., Краев А. Н., Ушаков А. Е. Численное моделирование конструктивного решения по укреплению основания и насыпи земляного полотна автомобильной дороги / Материалы международной научно-практической конференции: Актуальные проблемы строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири. Редакционная коллегия: М. Н. Чекардовский, Л. Н. Скипин, В. В. Воронцов, А. Е. Сбитнев. – Тюмень. 2014. С. 21-28.
  9. Кокошин С. Н. Физические основы процесса разрушения почвы // Вестник Государственного аграрного университета Северного Зауралья. 2015. № 4 (31). С. 100-104.
  10. Воронцов В. В., Чикишев В. М., Огороднова Ю. В., Липихин А. С. Экспериментальные исследования работы слабого глинистого основания, армированного геотекстильным материалом под действием полосовой нагрузки // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 3. С. 88-93.
  11. Бай В. Ф., Мальцев Л. Е., Мальцева Т. В., Набоков А. В., Демин В. А. Экспериментальная установка для испытания грунта методом одноостного сжатия. патент на изобретение RUS 2213952 20.03.2002.
  12. Мальцев Л. Е., Мальцева Т. В., Демин В. А. Экспериментальное определение параметров кинематической модели для водонасыщенного образца грунта. // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2001. № 2. С. 96-102.
  13. Трефилина Е. Р. Исследование напряженно-деформированного состояния двухфазного вязкоупругого полупространства. автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Казанский государственный университет им. В. И. Ульянова-Ленина. Казань, 2004.



**Maltseva Tatiana Vladimirovna**

The state agrarian university of the Northern Trans-Ural Region, Russia, Tyumen  
E-mail: [maltv@utmn.ru](mailto:maltv@utmn.ru)

**Trefilina Elena Rudolfovna**

Tyumen state university, Russia, Tyumen  
E-mail: [trefilina@utmn.ru](mailto:trefilina@utmn.ru)

**Kraev Alexey Nikolaevich**

Industrial university of Tyumen, Russia, Tyumen  
E-mail: [kraevaln@tyuiu.ru](mailto:kraevaln@tyuiu.ru)

**Sokolov Vladimir Grigorievich**

Industrial university of Tyumen, Russia, Tyumen  
E-mail: [sokolovvg@tyuiu.ru](mailto:sokolovvg@tyuiu.ru)

**Cernant Alexander Alfredovich**

Scientific research institute of transport construction, Russia, Moscow  
E-mail: [maltv@utmn.ru](mailto:maltv@utmn.ru)

## **Modeling the effect of vertical reinforcement on the rigidity of the base of the road**

**Abstract.** The article deals with the problem of modeling within the kinematic model of the impact of the body of a road on a water-saturated vertically reinforced base, in which the body of the road is replaced by a uniformly distributed load applied in the area of its contact with the day surface of the base. In the model under consideration, at some distance from the embankment, a strip load is injected artificially upward from the surface, which ensures that the horizontal displacements of the pore water on the interval coincide with the vertical reinforcement. In this case, the sediment of the day surface of the base decreases at the mid point of the road body. To reduce the settling of the base, the force values are determined, which acts at a given distance from the line of symmetry of the embankment.

As a result of the studies, it was found that it is possible to reduce the sediment from the loading force by 20 %. This value may vary depending on the choice of the application point and the magnitude of the force.

Also, as a result of the calculations performed, the simulation found the force values that must be applied at a given distance to reduce the draft from the evenly distributed load. In particular, for a given uniformly distributed load MPa, the value of the force of action is halved if the film is imitated at a distance shortened from the axis of symmetry of the mound to 0,8 m.

**Keywords:** water-saturated ground; road foundation; vertical reinforcement; stress-strain state; kinematic model; road body; sediment of the surface