

**В.С.Макаров, Д.В.Зезюлин, В.В. Беляков**  
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**  
**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕСЧАНОГО ГРУНТА**

*Нижегородский государственный технический университет им Р.Е.Алексеева*

В статье дается определение подвижности транспортно-технологических машин. Рассматривается влияние различных факторов на проходимость и эффективность движения. Показаны основные параметры достаточные для расчета силы тяги и сопротивления движению. Приведена методика определения физико-механических характеристик песчаного опорно-грунтового основания. Приведен пример расчета основных характеристик: влажности, объемной плотности грунта, модуля деформации, угла внутреннего трения, внутреннего сцепления в грунте. Даны аналитические зависимости для расчета этих параметров. Приведены графики статистического распределения этих параметров.

*Ключевые слова:* подвижность, песчаный грунт, статистическое распределение.

*Подвижность* – это интегральное эксплуатационное свойство транспортно-технологических машин (ТТМ) определяющее её способность выполнять поставленную задачу с оптимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и техническому состоянию самой машины, то есть возможность машины противостоять внешним и внутренним факторам, препятствующим выполнению поставленной задачи [1, 2]. Таким образом, процесс поддержания подвижности является ключевым в решении проблемы обеспечения *устойчивого и безопасного функционирования* мобильных наземных транспортных машин и транспортно-технологических комплексов. Также в процессе эксплуатации должна обеспечиваться эксплуатационная и конструкционная подвижность.

Исследование эффективности функционирования различных мобильных систем, по сути, основывается на множестве различных показателей, которые в свою очередь характеризуют как среду, с которой взаимодействует транспортно-технологическое средство.

Сама среда представляет собой верхний покров планеты и складывается из таких составляющих как грунты, почвы с расположенной на ней растительностью, озера, реки и моря; горы и скалистые массивы, которые делятся на естественные и искусственные препятствия и т.д. Математические модели взаимодействия транспортно-технологического средства со средой можно создать на физических и геометрических показателях среды, при этом давая приемлемые закономерности для определения эффективности функционирования в целом, соответствия машины для данных условий, экономической оценки целесообразности применения. Такие исследования проводились в работах [3, 4].

Для определения возможности движения ТТМ по определенному опорному основанию достаточно знать массово-геометрические параметры машины, а также основные характеристики грунта. Так достаточными будут влажность –  $W$ , объемная плотность грунта –  $\rho$ , модуль деформации –  $E$ , угол внутреннего трения –  $\varphi_0$ , внутреннее сцепление в грунте –  $c_0$ , толщина мягкого слоя –  $H_{\Gamma}$ . Данные характеристики входят в большинство разработанных на сегодняшний день математических моделей движения автомобиля по мягким грунтам [5].

Анализ показывает, что все опорные основания неоднородны и изменяются случайным образом по протяженности их залегания. Таким образом, для всех исследуемых типов грунтов можно спрогнозировать изменение физико-механических характеристик грунтов в стохастической постановке.

Рассмотрим на примере песчаного опорного основания, как меняются его характеристики на однотипном мерном участке.

Для изучения физико-механических характеристик наиболее простым и доступным способом является применение следующих приборов: пенетромтр грунтовой (рис. 1) и комплекс оборудования для определения плотности и влажности грунта (рис. 1) [6].



Рис. 1. Пенетромтр грунтовой ПГ-1



Рис. 2. Полевая лаборатория Литвинова ПЛЛ-9

При работе с пенетромтрром определяют показания индикатора пенетромтрра ( $S$ , мм) путем получения среднего значения по результатам 5-10 замеров в точках, расположенных друг от друга на расстоянии не менее 10 см.

Далее в соответствии с диаграммами пересчета по прилагаемому паспорту определяют необходимые параметры:

- Усилие пенетрации ( $P$ , Н) определяется по эмпирической зависимости  $P = k_S S$ , где  $k_S$  – эмпирический коэффициент (Н/мм).

- Сопротивления пенетрации ( $E_w$ , Н/см<sup>2</sup>) получают зная усилие пенетрации и диаметра уплотняющей площадки:

$$E_w = k_i P,$$

где  $k_i$  – коэффициент пересчета, зависящий от диаметра уплотняющей площадки (см<sup>-2</sup>).

- Модуль упругости ( $E_y$ , Н/см<sup>2</sup>) определяется по номограмме из средней величины сопротивления пенетрации.

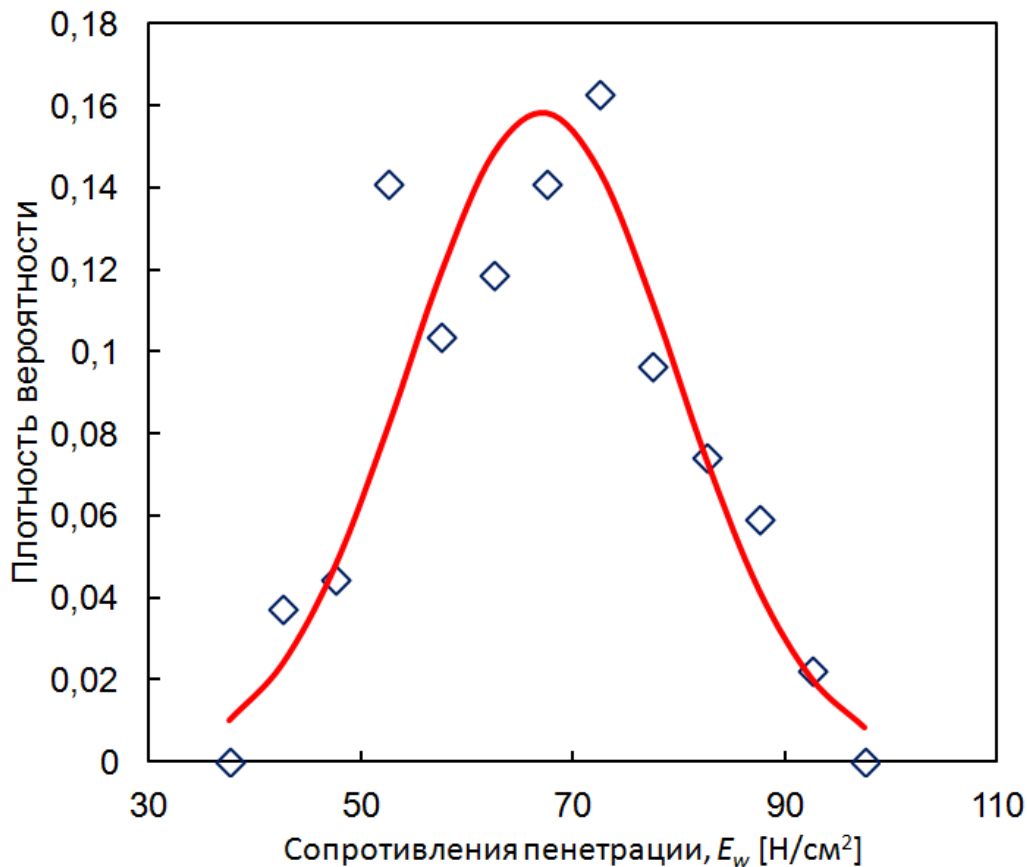
- Угол внутреннего трения ( $\varphi_{zp}$ , °) определяется по эмпирической зависимости:

$$\varphi_{zp} = 12.27 + 0.033 E_w.$$

- Удельное сцепление грунта ( $C_{zp}$ , МПа) определяется по эмпирической зависимости:

$$C_{zp} = 0.0094 + 5.9 \cdot 10^{-5} E_w.$$

Проанализируем полученные данные. Характер распределения сопротивления пенетрации песчаного опорного основания представлен на рисунке 3.



**Рис. 3. Характер изменения сопротивления пенетрации на однотипном мерном песчаном участке**

Анализ полученных данных показывает, что на измеренном участке сопротивление пенетрации подчиняется нормальному закону распределения. Выражение для расчета плотности вероятности имеет вид:

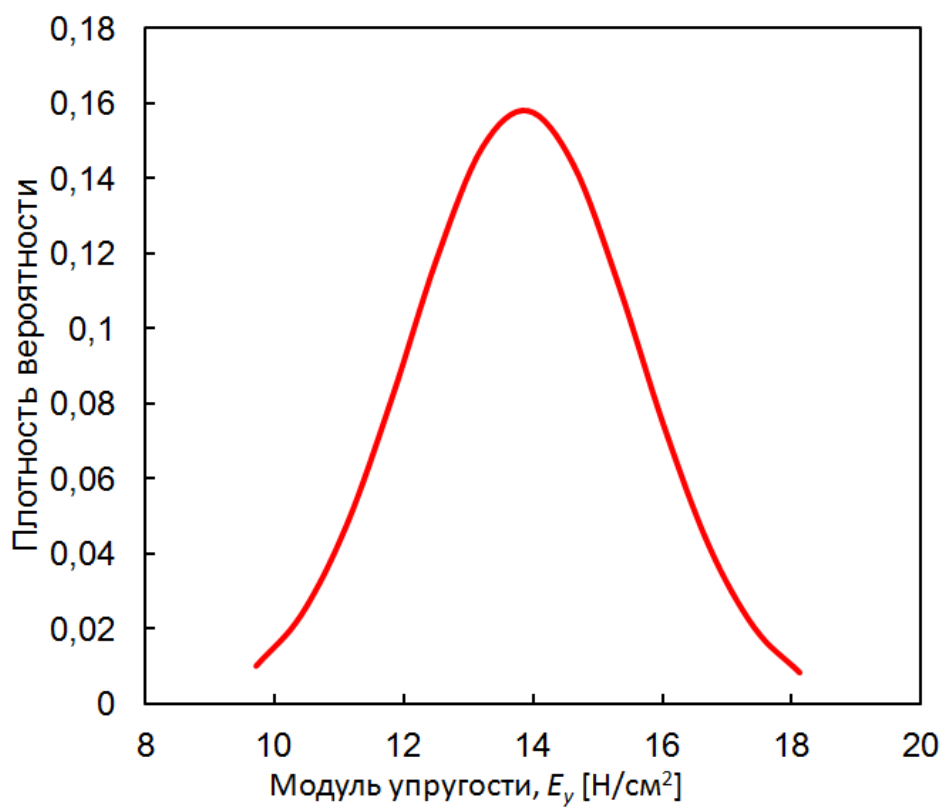
$$\rho(E_w) = \frac{\Delta E_w}{\sigma_{E_w} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(E_w - \bar{E}_w)^2}{2 \sigma_{E_w}^2}},$$

где  $\bar{E}_w$ ,  $\sigma_{E_w}$  – параметры распределения,  $E_{w(i+1)} = E_{wi} + \Delta E_w$ ,  $E_w = 0,5(E_{wi} + E_{w(i+1)})$ ,  $E_w = (E_w^{\min}, E_w^{\max})$ ,  $E_w^{\min}$ ,  $E_w^{\max}$  – минимальное и максимальное выбранные значения. Для графика на рисунке 3 средние значения составляют  $\bar{E}_w = 67$ , а среднее квадратичное отклонение  $\sigma_{E_w} = 12,6$ .

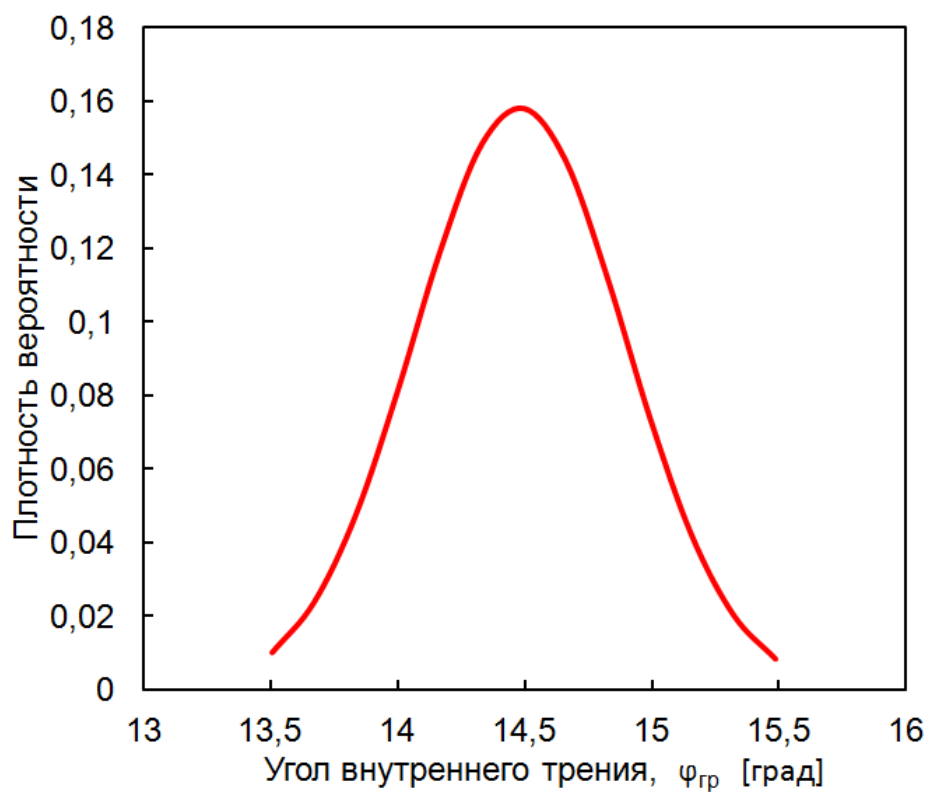
Таким образом, зависимость изменения модуля упругости песка будет выглядеть так, как представлено на рисунке 4, а средние значения и среднее квадратичное отклонение составлять соответственно  $\bar{E}_y = 13,9 \text{ Н/см}^2$ ,  $\sigma_{E_y} = 1,8$ .

На рисунке 5 показано изменение угла внутреннего трения песка на мерном участке. Среднее значение и среднее квадратичное отклонение составляет соответственно  $\bar{\varphi}_{zp} = 14,5$ ,  $\sigma_{\varphi_{zp}} = 0,4$ .

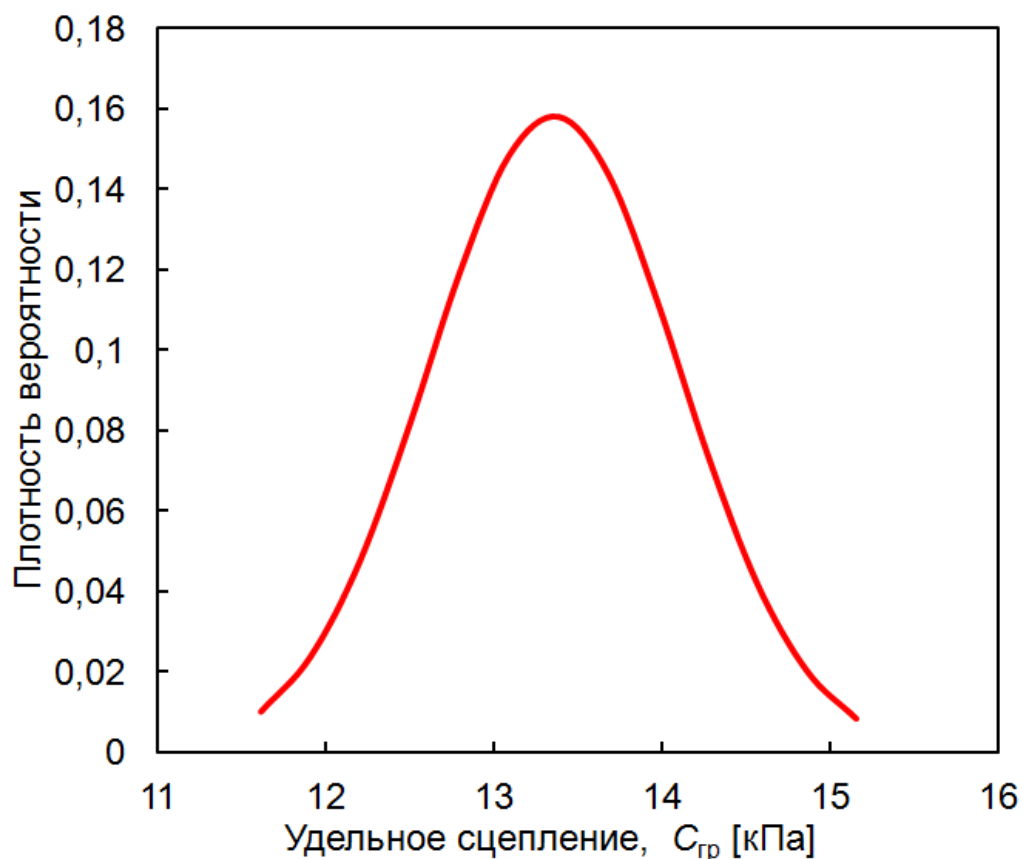
На рисунке 6 показано изменение удельного сцепления песка на мерном участке. Среднее значение и среднее квадратичное отклонение составляет соответственно  $\bar{C}_{zp} = 13,4 \text{ кПа}$ ,  $\sigma_{C_{zp}} = 0,7$ .



**Рис. 4. Характер изменения модуля упругости песка на однотипном мерном песчаном участке**



**Рис. 5. Характер изменения угла внутреннего трения песка на однотипном мерном песчаном участке**



**Рис. 6. Характер изменения удельного сцепления песка на однотипном мерном песчаном участке**

Отметим, что данный тип распределения будет характерен только однотипного участка. Для протяженных участков поле подходящим будет логарифмически-нормальный закон распределения.

Плотность грунта определяют путем взвешивания нормированного объема. Аналитическая зависимость для вычисления плотности грунта:

$$\rho = \frac{m - m_0}{V_0},$$

где  $m$  – масса грунта с банкой в естественном состоянии,  $m_0$  – масса банки,  $V_0$  – объем банки. Плотность речного песка может колебаться в зависимости от его влажности и уплотненности колеблется в пределах 1,2-2 г/см<sup>3</sup>, при определенных условиях может достигать 3 г/см<sup>3</sup>. Так как исследовался именно однотипный участок, то средние значения по результатам замеров составили 1,6 г/см<sup>3</sup>, что соответствует речному уплотненному песку без глинистой фракции.

Влажность грунта определяется по зависимости:

$$W = \frac{m - m_1}{m_1} \cdot 100\%,$$

где  $m_1$  – масса грунта с банкой в сухом состоянии. На мерном участке средняя влажность составила 3%

В представленные материалы могут быть использованы как методика для получения основных характеристик грунта опорного основания. Полученные данные можно использовать для прогнозирования подвижности транспортно-технологических машин на местности.

*Представленные результаты получены при финансовой поддержке грантов Президента Российской Федерации молодых ученых - кандидатов наук МК-5854.2016.5.*

### *Библиографический список*

1. Беляков, В.В. Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В.Беляков, А.М.Беляев, М.Е.Бушуева, У.Ш. Вахидов, К.О.Гончаров, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, К.Я. Лелиовский, В.С.Макаров, А.В. Папунин, А.В. Тумасов, А.В. Федоренко [Текст] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 3 (100). С. 145-174.
2. Беляков, В.В. Подвижность наземных транспортно-технологических машин /В.В.Беляков, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, В.С. Макаров [Текст] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 4. С. 72-77.
3. Wong, J.Y. Theory of ground vehicles.4rd ed. – N.Y.: Wiley-Interscience, 2008. – 592 p.
4. Беккер, М.Г. Введение в теорию систем местность-машина: пер. с англ. / под ред. В.В. Гуськова [Текст] / М.Г. Беккер. – М.: Машиностроение, 1973. – 520 с.
5. Вольская, Н.С. Разработка методов опорно-тяговых характеристик колесных машин по заданным дорожно-грунтовым условиям в районах эксплуатации: Дисс. ...докт. техн. наук: 05.05.03. МГТУ им. Н.Э.Баумана [Текст] / Н.С. Вольская. – М.,2008. – 485 с.
6. Куркин, А.А.Исследования прибрежных районов охотского моря с использованием наземного мобильного робота / А.А. Куркин, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров, А.И. Зайцев, А.М. Беляев, П.О. Береснев, В.В. Беляков, Е.Н. Пелиновский, Д.Ю. Тюгин [Текст] // Экологические системы и приборы. 2016, № 8.С. 11-17