

УДК 629.1.073

ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧНОСТИ НАГРУЖЕНИЯ ГРУНТА НА ЕГО ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА В РАСЧЕТАХ НА ПРОХОДИМОСТЬ КОЛЕСНЫХ МАШИН

Н. С. Вольская, К. Н. Ширяев

Разработана методика оценки степени изменения плотности верхнего слоя грунта в зависимости от числа циклов нагружения. По изменяющимся в процессе испытаний значениям плотности можно рассчитать механические параметры грунта и определить опорно-тяговые характеристики колесного движителя полноприводных колесных машин.

Ключевые слова: колесная машина, число проходов, плотность грунта, глубина колеи, динамический коэффициент, плотность скелета грунта, физико-механические характеристики грунта.

Введение

При оценке проходимости многоосных колесных машин проводятся расчеты с целью определения их опорно-тяговых характеристик. При этом для каждого колеса всех осей машины необходимо решать основную задачу – определять взаимные деформации шины и грунта. Результаты решения этой задачи в большой степени зависят от типа и физического состояния грунта. При последовательных проходах колес осей многоосного автомобиля «след в след» грунт уплотняется и его деформативные свойства изменяются. Поэтому необходимо разработать методику, позволяющую оценить изменение физического и механического состояний грунта от числа нагружений (проходов).

При движении даже одиночной двухосной колесной машины также характерно циклическое нагружение грунта в колею за счет последовательного прохода колес осей этого транспортного средства. Рассматриваемая проблема осложняется тем, что грунты, по которым движутся колесные машины высокой проходимости, различны по своему гранулометрическому

составу и физическому состоянию.

Вопросы циклического нагружения в механике грунтов [1] изучены достаточно подробно. Однако результаты этих исследований в первую очередь касаются грунтовых масс, не образующих верхний слой земной поверхности. На глубине более двух метров грунт находится в более стабильном и прогнозируемом по механическим свойствам состоянии.

К вышеперечисленным затруднениям, возникающим при оценке механического состояния грунта под каждым из колес автомобиля, необходимо добавить, что модель циклического (повторного) нагружения верхнего слоя грунта должна учитывать не только число циклов нагружения, но и особенности напряженного состояния грунта каждого цикла, т.е. отражать предисторию нагружения.

Влияние типа грунта на его механические параметры при циклическом нагружении

При последовательных нагружениях грунта происходит изменение его физического со-

стояния: плотности ρ и влажности W , а следовательно, механических свойств, характеризуемых такими параметрами, как модуль деформации E , угол внутреннего трения φ_0 , внутреннее сцепление c_0 , толщина мягкого слоя H_r .

Для связных грунтов выделяют следующие граничные значения влажности [1], характеризующей их состояние: W_T – влажность на границе текучести; W_p – влажность на границе раскатывания; W_n – число пластичности.

Известно, что песчаные и связные грунты при многократном воздействии на них ведут себя по-разному. Угол внутреннего трения песка в основном зависит от четырех составляющих:

$$\varphi_0 = 36^\circ + \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4,$$

где $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ – углы, отражающие, соответственно, степень уплотнения, форму и шероховатость, размер частиц и их однородность.

Циклические деформации грунта приводят к изменению углов φ_1 и φ_4 , что составляет не более 18% от начального значения этих углов при переходе из совершенно рыхлого состояния в слежавшееся и из однородного в неоднородное.

Для влагонасыщенных песков благодаря их хорошей фильтрационной способности при нагружении наблюдается значительный отток жидкости. Это может привести к изменению внутреннего сцепления c_0 в грунте (увеличению до 5% или уменьшению до 55% от первоначального значения).

Связные грунты, обладая низкой водопроницаемостью и значительными межмолекулярными и силовыми связями между частичкам грунта, имеют более сложный характер нагружения при циклическом воздействии. У них наблюдается более сильная связь внутреннего сцепления с влажностью.

Из механики грунтов известно, что:

$$c_0 = k \cdot (W_T - W)^5,$$

где k – коэффициент пропорциональности; W – влажность грунта.

Параметры k и W определяются экспериментально.

При циклическом нагружении для большинства связных грунтов характерны структурные изменения с переориентацией микроструктуры, что приводит к снижению внутреннего сцепления и росту угла внутреннего трения.

Результаты экспериментов [2] показывают, что зависимость внутреннего сцепления от числа циклов нагружения более сложна.

С ростом циклов нагружения сначала наблюдается повышение внутреннего сцепления c_0 , а затем, в связи с разрушением дерна и структуры, монотонное снижение. Угол внутреннего трения монотонно возрастает.

Сложность изучаемого процесса циклического нагружения усугубляется изменением контактной (продольной) нагрузки в каждом последующем цикле. Для глинистых грунтов внутреннее сцепление с ростом амплитуды сдвиговых колебаний снижается гиперболически, а угол внутреннего трения возрастает линейно. Мгновенное или кратковременное приложение сдвигающей нагрузки не влияет на степень ориентации частиц грунта. Переориентация происходит при длительной деформации грунта.

Методики определения механических параметров грунта с учетом числа нагружений

Для приблизительного определения механических параметров грунта в зависимости от цикличности нагружения В.В. Сапожниковым [2] получены следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{0n} &= (\varphi_1 + 18) \cdot \left(1 - \frac{18}{\varphi_1 + 18} \cdot n^{-\alpha_n} \right) \\ c_{0n} &= n^{x \cdot \alpha_\omega \cdot \tau_n} \cdot (c_{01} + c_\Omega \cdot n^{-\alpha_\Omega}) \\ E_n &= E_1 \cdot e^{k_E \cdot (n-1)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\tau_n = \tau_{\max n} / (\tau_{\max} - \tau_{\max n});$$

$$x = 1 \text{ при } \tau_n \geq 0,5 \cdot \tau_{\max};$$

$$x = -0,1 \text{ при } \tau_n < 0,5 \cdot \tau_{\max},$$

где φ_0 – угол внутреннего трения, зависящий от числа нагружений; c_0 – внутреннее сцепление, зависящее от числа нагружений; E_n – модуль деформации, зависящий от числа нагружений; φ_1, E_1, c_{01} – определены в первом цикле; n – номер прохода; x – параметр, характеризующий направленность процесса; τ_n – уровень напряжений в n -м цикле; $\tau_{\max n}$ – максимальное напряжение при n -м цикле нагружения; $\tau_{\max}$ – максимальное напряжение при первом цикле нагружения; $\alpha_\Omega, \alpha_\omega, c_\Omega, k_E$ – эмпирические коэффициенты, зависящие от типа почвогрунта.

Средние значения коэффициентов, входящих в зависимости (1), приведены в [2] для грунтов типа песок, задернованная супесь и задернованный суглинок.

Методика В.В. Сапожникова, которая позволяет определять механические характеристики E , φ , c_0 в зависимости от количества нагружений для трех типов грунтов верхних слоев земной поверхности, является, по-видимому, единственной известной работой в рассматриваемой области. Ее использование затруднено необходимостью проведения дорогостоящих экспериментальных исследований для других основных типов грунтов (например, глины). Физическое состояние этих приведенных в исследовании грунтов практически не определено. Необходимо отметить большой разброс численных значений коэффициентов по зависимостям (1). Таким образом, применение на практике этой методики достаточно затруднительно.

Вторая методика, также не нашедшая широкого применения в виду сложности систематизации многочисленных экспериментов, проведенных на разных грунтах по отличающимся друг от друга методикам, заключается в использовании диаграмм штамповых испытаний [3]. В основе методики лежит следующий подход.

Цикличность нагружения n может быть отождествлена со временем действия одноразовой нагрузки t , но с большим эффектом. Рассматриваемый эффект нашел отражение в соответствующем коэффициенте перехода от времени действия нагружения к числу циклов нагружения. Для этого используем известное выражение для коэффициента динамичности [4]:

$$k_d = \left[1 + \frac{\alpha}{t \cdot \varphi_0} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где $\alpha=0,5$ с·град – эмпирический коэффициент.

По результатам испытаний фиксируются глубины колеи при единичном проходе и после нескольких проходов колес (например $n=10$). По углу внутреннего трения φ_0 исследуемого грунта и скорости перемещения колесной машины V определяется коэффициент динамичности k_d . Результатом достаточно сложной обработки экспериментальных данных является зависимость глубины z (при заданном значении среднего давления q в пятне контакта шины с грунтом) от числа проходов колес или циклов нагружения n [3].

На данный момент накоплен обширный материал по изменению глубины колеи z при последовательном проходе колес по одному следу.

Один и тот же грунт при различных значениях его физического состояния ρ и W , а также меняющихся значениях глубины мягкого слоя H_T

может по-разному вести себя при приложении вертикальной нагрузки, поэтому установлено четыре вида возможной зависимости $z = f(q, n)$ (рис. 1).

Покровский Г.И. предложил учитывать кратковременность нагрузки увеличением модуля деформации [4]:

$$E_d = E \left(1 + \frac{B}{t} \right),$$

где E_d – динамический модуль деформации; E – модуль деформации при статическом вдавливании; B – постоянная, зависящая от вида грунта ($B = \frac{1}{2 \cdot \varphi_0}$).

В работе [4] показано, что кратковременность нагрузки можно учесть заменой действительного давления q динамическим, определяемым по выражению:

$$q_d = q / \left[1 + \frac{B}{t} \right].$$

Выразив время действия нагрузки через скорость V (м/с), число проходов n и длину контакта l (м), получим зависимость:

$$q_d = q / \left[1 + \frac{B \cdot V}{l \cdot n} \right].$$

Тогда, согласно выводам Агейкина Я.С. [4], динамическое давление на грунт связано со статическим следующей зависимостью:

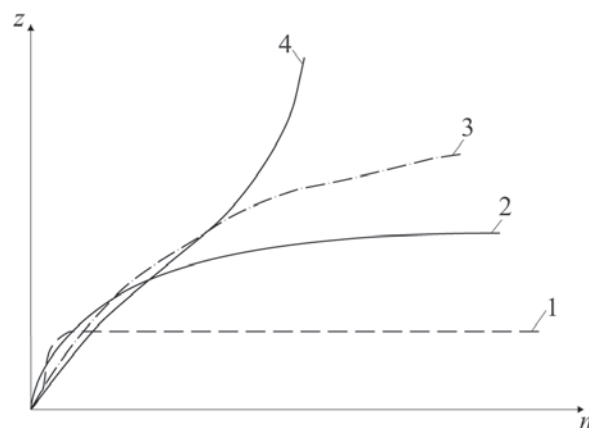


Рис. 1. Характеристики изменения глубины колеи в зависимости от числа проходов колес:

- 1 – на связных грунтах при $W < W_p$;
- 2 – на грунтах в пластичном состоянии при нагрузке, не большей несущей способности;
- 3 – на грунтах при $W < W_T$ при нагрузке выше несущей способности;
- 4 – на грунтах при $W \approx W_T$ или при нагрузке, значительно превышающей несущую способность

$$q_d = q / [1 + \frac{V}{2 \cdot \varphi_0 \cdot l \cdot n}] \quad (3)$$

или

$$q_d = k_d \cdot q, \quad k_d = 1 / [1 + \frac{V}{2 \cdot \varphi_0 \cdot l \cdot n}]. \quad (4)$$

где k_d – коэффициент динамичности.

Рассмотрим пример влияния цикличности нагружения и времени действия нагрузки t ($t = l/V$) на глубину колеи z . На рисунке 2 представлена диаграмма штамповых испытаний для грунта $q = f(z)$ [3]. Считаем заданными следующие условия эксперимента: $V=20$ м/с; $l \approx 0,5$ м; $\varphi_0=30^\circ$. Анализировались два варианта нормальной нагрузки на колесо: а) при $n=1$, $z_1=1,5$ см; $n=10$, $z_2=2,3$ см; среднее давление в пятне контакта шины с грунтом $q'=0,2$ МПа; б) при $n=1$, $z_1=2,8$ см; $n=10$, $z_2=9,5$ см; среднее давление в пятне контакта шины с грунтом $q'=0,3$ МПа.

Определив k_d , по известным значениям q_d

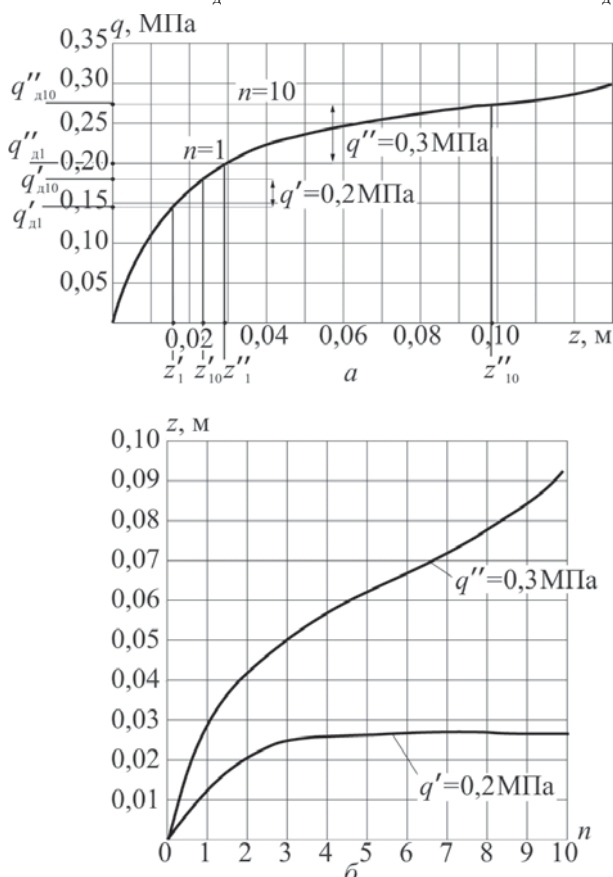


Рис. 2. Использование динамического коэффициента k_d для определения глубины колеи в зависимости от числа проходов: а – пример штамповых испытаний грунта; б – расчетный график зависимости глубины колеи z от числа проходов колес n

находим статическое давление. Значения коэффициентов динамичности при первом и десятом проходах соответственно: $k_{d1}=0,6$; $k_{d10}=0,92$. На рисунке 2, б представлены зависимости $z = f(n)$, где соответствующие значения глубины колеи определены по статическим давлениям на графиках рис. 2, а.

Для случая единичного прохода колеса по известному прогибу шины h выражение для коэффициента динамичности k_d (4) можно привести к виду (5). Для этого обратимся к рис. 3.

Пусть r_c – свободный радиус колеса, тогда x'_0 – длина задней зоны контакта колеса ($x'_0 \cong \frac{l}{2}$, где l – длина плоской зоны пятна контакта) с грунтом может быть определена:

$$\frac{l}{2} = \sqrt{r_c^2 - (r_c - h)^2}, \quad h^2 \approx 0, \quad \text{тогда} \\ l = 2\sqrt{2 \cdot r_c \cdot h}.$$

Поставив это выражение для l в уравнение (3), получим:

$$k_d = \frac{2\sqrt{2 \cdot r_c \cdot h}}{2\sqrt{2 \cdot r_c \cdot h} + \frac{V}{2\varphi_0}}. \quad (5)$$

Предлагаемый способ позволяет по ранее проведенным и известным из технических источников результатам экспериментов определять коэффициент динамичности k_d и с его помощью – глубину колеи после n циклов нагружения (т.е. проходов колес по схеме «след в след»).

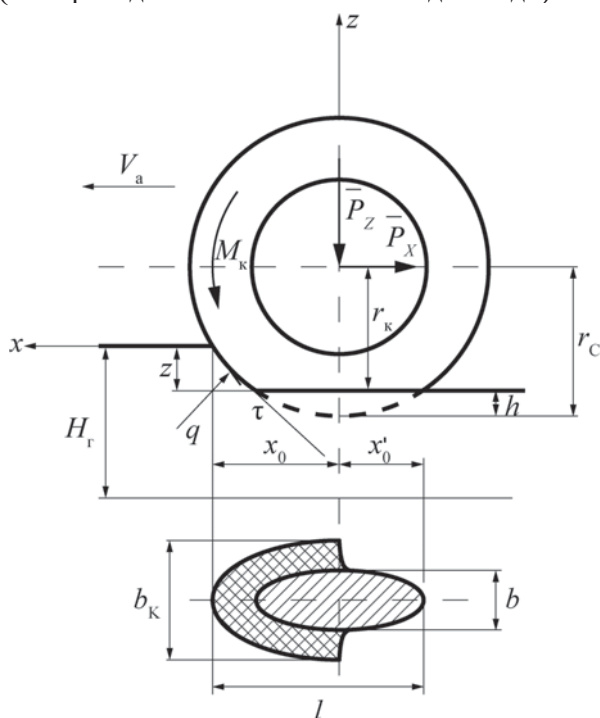


Рис. 3. Схема взаимодействия шины с грунтом

Методика оценки механических параметров грунтов в зависимости от их плотности

Новая предлагаемая методика позволяет реализовать более общий и доступный подход к учету цикличности нагружения грунта от колес многоосных машин. Он основан на следующих положениях.

1. Все виды опорных грунтовых поверхностей классифицируются по типу грунта (песок, глина, супесь, суглинок).

2. Механические свойства грунта оцениваются параметрами E , φ , c_0 и H_r . Поскольку механические свойства зависят от физического состояния, необходимо разработать методику определения, прежде всего, изменения плотности грунта в зависимости от циклов нагружения на базе штамповых прочностных испытаний грунта.

3. При воздействии штампа на грунт происходит два вида деформации: уплотнение частиц грунта и сдвиг грунта.

4. Зависимость относительного погружения штампа, вызываемого уплотнением грунта, можно принять линейной [4]:

$$\lambda = \frac{\sigma}{\sigma + E}, \quad (6)$$

где σ – напряжение сжатия в грунте.

Для определения абсолютной деформации уплотнения необходимо знать закон распределения напряжений в грунте по глубине и толщину деформируемого слоя грунта.

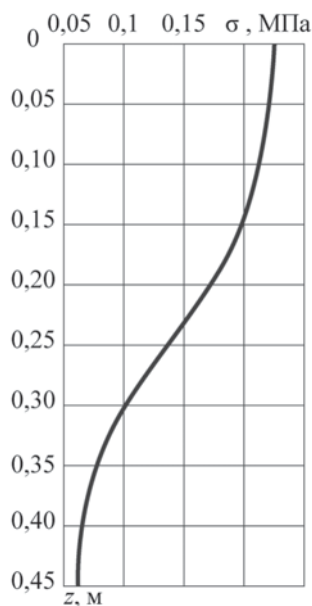


Рис. 4. Распределение напряжений в грунте под штампом [3]

Используя опытные данные из работы [4], полученное распределение напряжений в грунте представим графически (рис. 4). Схема для расчета уплотнения грунта представлена на рис. 5. Связь напряжений сжатия σ в грунте с давлением в контакте q , толщиной мягкого слоя H_r и площадью контакта колеса (штампа) F с грунтом определяется по следующим зависимостям [4]:

$$\sigma = k_F \cdot q;$$

$$k_F = \frac{H_r}{\int_0^{H_r} \left(1 + \frac{(a \cdot z)^2}{F} \right) dz} = \frac{1}{1 + \frac{a^2 H_r^2}{3F}}, \quad (7)$$

где $a = 0,55 - 0,6$ – параметр, учитывающий уменьшение напряжений и толщину уплотняемого слоя. Следовательно, напряжения сжатия в грунте под колесом выражаются зависимостью:

$$\sigma = \frac{q}{1 + \frac{a^2 H_r^2}{3F}}. \quad (8)$$

Относительное уплотнение реального грунта λ_r можно оценить по следующей зависимости:

$$\lambda_r = \frac{\rho_c - \rho_{c0}}{\rho_r},$$

где ρ_{c0} – объемная плотность скелета грунта после предыдущего прохода; ρ_c – объемная плотность скелета грунта на данном проходе; ρ_r – объемная плотность твердых частиц данного грунта.

Вернемся к зависимостям (6) и (8). По своей физической сути λ и λ_r оценивают один и тот же процесс уплотнения грунта под действием распределенной нагрузки в пятне контакта колеса с деформируемой поверхностью. Совместное рассмотрение зависимостей (6), (7) и (8) позво-

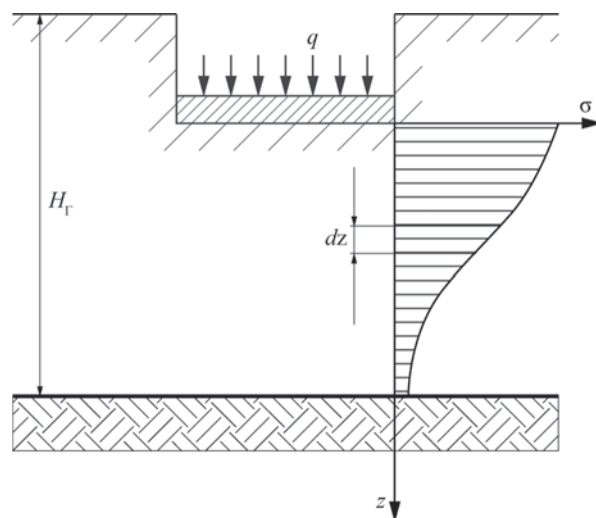


Рис. 5. Схема для расчета уплотнения грунта

ляет определить объемную плотность грунта ρ_i после прохода колеса:

$$\rho_{ci} = \rho_{ci-1} + \frac{\rho_r \cdot q}{q + E \left(1 + \frac{a^2 H_r^2}{F} \right)},$$

где $i=1, \dots, n$ (n – число проходов).

Связь напряжений сжатия в почве со временем действия нагрузки определяется:

$$\sigma_v = k_d \sigma. \quad (9)$$

Поэтому, корректируя уравнение (9) с учетом времени действия нагрузки, давления в пятне контакта, площади пятна контакта, числа проходов или осей колесной машины, скорости ее движения, толщины уплотняемого слоя и начальной плотности скелета грунта и его типа, можно определить объемную плотность скелета грунта после каждого прохода с учетом динамичности нагружения (q_d) по следующей зависимости ($\rho_{ci-1} = \rho_{c0}$):

$$\rho_{ci} = \rho_{ci-1} + \frac{\rho_r \cdot q_d}{q_d + E \left(1 + \frac{a^2 H_r^2}{F} \right)}. \quad (10)$$

При первом проходе в расчеты вводится объемная плотность скелета реального недеформированного грунта.

Таким образом, можно прогнозировать степень уплотнения грунта в зависимости от номера прохода колес по одному и тому же следу.

Эксперименты и исследования показали, что модуль деформации, угол внутреннего трения и внутреннее сцепление в грунте в значительной степени зависят от его объемной плотности. По результатам статистической оценки взаимосвязи физического состояния различных грунтов и их механических характеристик получены эмпирические зависимости $E=f_1(\rho_c, W)$, $\varphi_0=f_2(\rho_c, W)$ и $c_0=f_3(\rho_c, W)$, которые представлены в работах [5, 6].

Заключение

Рассматриваемый вопрос – один из основных в решении проблемы оценки деформативных свойств грунтов при расчете опорно-тяговых характеристик колесных машин высокой проходимости.

Предлагаемая методика позволяет напрямую решать вопрос об определении численных значений E, φ_0, c_0 в процессе предварительной

оценки деформативных свойств различных грунтов с учетом изменения этих механических параметров после прохода каждой оси многоосной колесной машины или при движении колоны транспортных средств по схеме «след в след».

Преимущество предлагаемой методики состоит в том, что получена теоретически обоснованная математическая зависимость, связывающая объемную плотность грунта с числом циклов нагружения.

В этой зависимости учтен динамический характер нагружения грунта, характерный для особенностей взаимодействия многоосной колесной машины с опорной поверхностью при движении «след в след».

Полное экспериментальное подтверждение разработанной зависимости (10) предполагается получить для связных и несвязных грунтов на экспериментальном стенде типа «грунтовой канал–активное колесо» кафедры автомобилей и двигателей в МГИУ, предназначенном для детальных исследований взаимодействия колесного движителя машин с грунтом.

Список литературы

1. Маслов Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1982. – 511 с.
2. Сапожников В.В. Метод оценки проходимости многоколесных транспортных средств большой грузоподъемности по обследованным маршрутам на слоистых грунтах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – М., 1985. – 18 с.
3. Вольская Н.С., Агейкин Я.С. Моделирование движения автомобиля по мягким грунтам: проблемы и решения // Автомобильная промышленность. 2004. № 10. С. 24–25.
4. Агейкин Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. Теория и расчет. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.
5. Вольская Н.С. Оценка проходимости колесной машины при движении по неровной грунтовой поверхности. – М.: МГИУ, 2007. – 215 с.
6. Агейкин Я.С., Вольская Н.С., Чичекин И.В. Определение механических характеристик верхнего слоя грунтов при оценке проходимости колесных машин // Грузовик. 2010. № 6. С. 42–45.

Материал поступил в редакцию 21.07.2010

**ВОЛЬСКАЯ
Наталья
Станиславовна**

Е-mail: volskaja@mail.msiu.ru
Тел. +7 (495) 675-62-42

Доктор технических наук, профессор. Заведующая кафедрой автомобилей и двигателей ГОУ МГИУ. Сфера научных интересов – определение опорно-тяговых характеристик колесных машин по заданным дорожно-грунтовым условиям. Автор около 40 научных и учебно-методических работ.

**ШИРЯЕВ
Константин
Николаевич**

Е-mail: ssw11@mail.msiu.ru
Тел. +7 (495) 675-62-42

Ассистент кафедры автомобилей и двигателей ГОУ МГИУ. Сфера научных интересов – экспериментальные исследования взаимодействия пневматической шины с различными типами грунтов. Автор 5 научных и учебно-методических работ.