

УДК 004.942

О.В. Стрельцов, канд. техн. наук, доц.,
А.В. Ладыгин, бакалавр,
Одес.нац. политехн. ун-т

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ “ГРУНТ-КОЛЕСО” ДЛЯ КОЛЕСНОГО РОБОТА

О.В. Стрельцов, О.В. Ладыгин. Дослідження математичної моделі взаємодії “грунт — колесо” для колісного робота. Розглянуто проблему визначення типу ґрунту на основі його фізико-математичних властивостей. Проведено теоретичні дослідження в галузі математичного моделювання та взаємодій механіки ґрунтів. Показано та оцінено результати параметричного аналізу з використанням запропонованої комбінації методів експериментального моделювання.

Ключові слова: тип ґрунту, колесо, деформація, коефіцієнт буксування, фізико-механічні властивості.

О.В. Стрельцов, А. В. Ладыгин. Исследование математической модели взаимодействий “грунт — колесо” для колесного робота. Рассмотрена проблема определения типа ґрунта на основе его физико-математических свойств. Проведены теоретические исследования в области математического моделирования и взаимодействий механики ґрунтов. Показаны и оценены результаты параметрического анализа с использованием предложенной комбинации методов экспериментального моделирования.

Ключевые слова: тип ґрунта, колесо, деформация, коэффициент буксования, физико-механические свойства.

O.V. Streltsov, A.V. Ladygin. Research of “soil — wheel” interactions mathematical model for a wheeled robot. The problem of determining the type of soil on the basis of its physical and mathematical properties is considered. Theoretical research in the field of mathematical modeling and interactions of soil mechanics is conducted. The results of parametric analysis are shown and evaluated using the proposed combination of experimental modeling methods.

Keywords: type of soil, wheel, deformation, slippage ratio, physical-mechanical properties.

Проектирование новых роботизированных транспортных средств, для которых важна оценка поведения в различных дорожных условиях, является актуальной проблемой. Это может быть движение на подъем, разгон, когда под колесами находится ґрунт с разными сцепными свойствами, а также движение по неровностям или же по ґрунтам различного типа и структуры. В настоящее время разработки направлены на изучение проходимости только по твердой опорной поверхности и не затрагивают движение по ґрунту.

Но эффективное решение данной проблемы практически невозможно представить без применения методов математического моделирования [1]. Рассмотрим сложный режим движения — движение на подъем (разгон) по ґрунтам со слабой несущей способностью. При этом сделаны следующие основные допущения: движение считается установившимся, и рассматривается велосипедная схема транспортного средства.

Для начала проведен расчет показателей проходимости по осредненным параметрам ґрунта. За основу была взята модель движения колеса по ґрунту [2]. Цель расчета — определить значения глубины колеи h_i , продольные реакции по колесам автомобиля Rx_1 , Rx_2 , момент сопротивления движению M_{fi} . Такой метод допустим при сравнительно небольшой неоднородности ґрунта, которая компенсируется сглаживающим действием транспортного средства.

В качестве параметров, характеризующих механические свойства ґрунта, использовались: модуль деформации E , глубина мягкого слоя ґрунта H_r , коэффициент внутреннего трения ґрун-

та $\operatorname{tg}\varphi_0$, внутреннее сцепление в грунте c_0 , коэффициент трения резины по грунту φ_p , коэффициент трения стали по грунту φ_k , параметры изменения сцепления грунта по глубине s и μ , плотность грунта γ . Остальные параметры можно охарактеризовать корреляционными зависимостями [3]. При известных значениях влажности и плотности связных грунтов расчетные параметры можно определить по графикам и таблицам.

Таблица 1

Статические значения параметров некоторых грунтовых поверхностей, характеризующих их деформируемость и сцепные свойства

Вид и состояние грунта	E , МПа	H_r , см	φ_0 , град	c_0 , МПа
Глина твердая	$>50,0$	∞	18...22	0,05...0,1
Суглинок мягкопластичный	8,0...35,0	∞	16...21	0,015...0,03
Песок малоуплотненный	5,0...10,0		34...40	0,001...0,006
Болотный неуплотненный	0,1...0,2		0,1...0,2	0,01

Как видно из табл. 1, наблюдается исключительно большой разброс значений по всем параметрам. Статистическая обработка этих данных, определение законов распределения отсутствуют, что затрудняет их практическое использование. Установлено, что распределение влажности в большинстве случаев подчиняется нормальному закону. Данные по физическим параметрам грунта (почвы) накапливаются систематическим их измерением на метеостанциях.

На основании физических процессов деформации грунтов математическая модель должна учитывать:

- две составляющие деформации грунта: уплотнение и сдвиги;
- зависимость деформации от площади и формы контакта колеса с грунтом;
- влияние на нормальную деформацию грунта направления суммарной силы, приложенной к колесу;
- зависимость величины деформации от толщины мягкого грунта;
- влияние скорости качения колеса (динамического нагружения);
- независимые параметры грунта, по которым накапливаются статистические материалы.

Математическая модель должна позволять рассчитывать глубину колеи, сопротивление качению, буксование, уплотнение почвы грунта, а также проводить расчеты с учетом действия колебательных нагрузок на колесо. Сложность поставленной задачи заключается в большом числе предложенных методов оценки деформируемости грунта, отличающихся подходом, применяемыми исходными параметрами, трудоемкостью расчетных методов, с одной стороны, и возможностью учета большого числа факторов, влияющих на деформируемость грунта, с другой стороны.

Следует учитывать, что чрезмерное усложнение расчетных методов для более глубокого отражения процессов, происходящих при сложном нагружении грунта, характерном для воздействия колес, приводит к увеличению необходимых исходных параметров, определяемых экспериментально, и часто не оправдывается при практическом применении из-за отсутствия исходных данных и сложности расчетов.

На основании исходных и параметрических данных была построена математическая модель и предложен теоретический метод решения:

- определение зависимости давлений в грунтовом контакте от деформации шины;
- нахождение несущей способности грунта;
- определение зависимости давлений p в грунтовом контакте от глубины колеи

$$p = \frac{E \cdot h_r}{\frac{2E \cdot h_r}{\pi \cdot p_{so}} \cdot \operatorname{arctg} \frac{\pi \cdot (H_r - h_r)}{2b_{np}} + ab_{np} \cdot \operatorname{arctg} \frac{H_r - h_r}{ab_{np}}}, \quad (1)$$

где E — модуль деформации,

h_r — глубина колеи,
 H_r — глубина мягкого слоя грунта,
 p_{so} — давление в колесе,
 $b_{пр}$ — ширина протектора,
 $a = 0,64 \cdot (1 + b_{пр} / H_r)$ — коэффициент проходимости; (2)

— нахождение зависимости динамического давления от глубины колеи (рис. 1);
 — расчет зависимости ширины колеи от глубины колеи на второй оси;
 — расчет зависимости коэффициента сцепления от коэффициента буксования (табл. 2 и рис. 2).

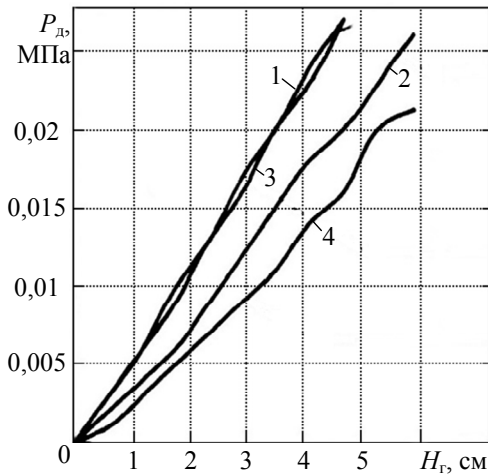


Рис. 1. Зависимости динамического давления p_d от глубины колеи h_r при песчаном (1), болотистом (2), сухом (3) и размокшем (4) грунте

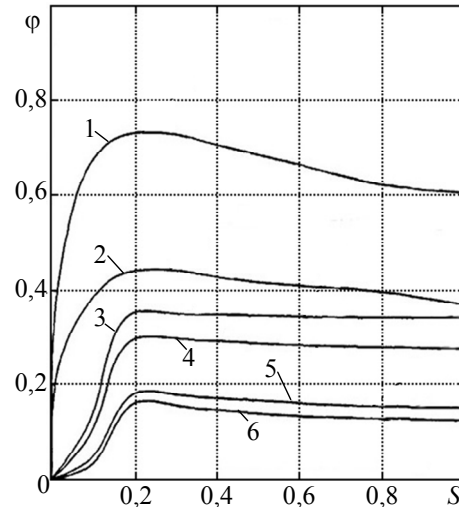


Рис. 2. Зависимость коэффициента сцепления от коэффициента буксования на сухом (1) и мокром (2) асфальте, сухой грунтовой дороге (3), пахоте (4), грунтовой размытой дороге (5) и болоте (6)

Таблица 2

Зависимость коэффициента сцепления от коэффициента буксования S_6 на примере для сухой грунтовой дороги ϕ_1 и мокрого асфальта ϕ_2

S_6	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
ϕ_1	0,095	0,311	0,332	0,363	0,36	0,359	0,358	0,357	0,355	0,353
ϕ_2	0,384	0,428	0,421	0,413	0,408	0,404	0,401	3,989	3,912	3,786

Предложенный подход использования комбинации методов экспериментального моделирования и все выходные данные расчетных имитационных моделей являются достаточным начальным материалом для решения проблемы опорной проходимости по неизвестному типу грунта. Но, с другой стороны, возникают проблемы описания типа и физического состояния грунта, адекватных математических моделей деформативных свойств грунта, возможностей представления предполагаемых дорожных условий эксплуатации для проектируемого роботизированного транспортного средства с учетом их неоднородности по типу и влажности. При этом необходимо учесть, что оно движется как по прямолинейной, так и по криволинейной траекториям, и физико-механические характеристики грунта изменяются, если колеса одного борта движутся след в след.

Взаимные деформации шины и грунта — это контактная задача, решению которой уделено не так уж много внимания. Исследование поставленной проблемы позволило незначительно, но упростить определение типа грунта на основе его физико-математических свойств.

Литература

1. Зарубин, В.С. Математическое моделирование в технике / В.С. Зарубин. — М.: МГТУ им. Баумана, 2001. — 496 с.
2. Агейкин, Я.С. Проходимость автомобилей / Я.С. Агейкин. — М.: Машиностроение, 1981. — 232 с.
3. Цытович, Н.А. Механика грунтов. Краткий курс / Н.А. Цытович. — М.: Высш. шк., 1983. — 288 с.

References

1. Zarubin, V.S. Matematicheskoe modelirovanie v tekhnike [Mathematical modeling in engineering] / V.S. Zarubin. — Moscow, 2001. — 496 p.
2. Ageykin, Ya.S. Prokhodimost' avtomobiley [Cross-country ability of cars] / Ya.S. Ageykin. — Moscow, 1981. — 232 p.
3. Tsytovich, N.A. Mekhanika gruntov. Kratkiy kurs [Soil mechanics. A short course] / N.A. Tsytovich. — Moscow, 1983. — 288 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Ситников В.С.

Поступила в редакцию 25 октября 2013 г.