УДК 625.033 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-2-116-120

Метод решения задачи о вдавливании штампа-движителя в неоднородный массив грунта

Е.Г. Хитров[1a], В.Б. Песков[1b], Д.П. Казаков[1c], В.Е. Божбов[1d], М.В. Степанищева[2e]

[1]Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский 5, Санкт-Петербург, Россия
[2] Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]yegorkhitrov@gmail.com, [b]vbpeskof@gmail.com, [c]kdp.manage@gmail.com, [d]v-b@mail.ru, [e]marina01031977@inbox.ru
[a] https://orcid.org/0000-0003-4569-9508, [b] https://orcid.org/0000-0002-4010-7369
[c] https://orcid.org/0000-0001-5337-9585, [d] https://orcid.org/0000-0003-0881-2911
[e]https://orcid.org/0000-0003-4867-3901
Статья поступила 2.04.2018, принята 27.04.2018

Представлены зависимости, позволяющие в практических расчетах определить осадку штампа-движителя с учетом переменного характера деформативных свойств массива грунта. Теоретические результаты получены с применением численных методов решения уравнений, вычислительного эксперимента и аппроксимации расчетных данных. При решении задачи движитель машины представлен штампом, опорная поверхность — деформируемым массивом с ограниченной толщиной и физико-механическими свойствами, изменяющимися по глубине по линейному, квадратичному либо кубическому закону. Предложен общий подход, позволяющий рассчитать модуль деформации и несущую способность однородной опорной поверхности, у которой, при прочих равных, интегральные показатели взаимодействия со штампом (деформация сжатия грунта и осадка штампа) равны соответствующим показателям взаимодействия штампа с исследуемым неоднородным массивом грунта. По результатам обработки расчетных данных, полученных в ходе вычислительного эксперимента, получены формулы для расчета характеристик однородного массива грунта, поведение которого под нагрузкой эквивалентно поведению неоднородного массива с заданными характеристиками. Результаты выполненного исследования показывают, что при определении интегральных показателей взаимодействия штампа-движителя с неоднородной опорной поверхностью функции модуля деформации и несущей способности в практических расчетах можно заменить приведенными числовыми значениями, получаемыми с использованием предлагаемых зависимостей и параметров исходных формул, характеризующих изменение деформативных свойств массива грунта по глубине. В заключение отмечены перспективные направления дальнейших исследований, относящиеся к области моделирования взаимодействия штампа-движителя с неоднородными массивами грунта неограниченной толщины, а также с массивами грунта, свойства которых характеризуются дискретными функциями.

Ключевые слова: вдавливание штампа; неоднородный грунт; модуль деформации; несущая способность.

Method of solving the problem of stamp indention into inhomogeneous soil massif

E.G. Khitrov[1a], V.B. Peskov[1b], D.P. Kazakov[1c], V.E. Bozhbov[1d],M.V. Stepanishcheva[2e]

[1]St. Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia
[2]Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia
[a]yegorkhitrov@gmail.com, [b]vbpeskof@gmail.com, [c]kdp.manage@gmail.com, [d]v-b@mail.ru, [e]marina01031977@inbox.ru
[a] https://orcid.org/0000-0003-4569-9508, [b] https://orcid.org/0000-0002-4010-7369
[c] https://orcid.org/0000-0001-5337-9585, [d] https://orcid.org/0000-0003-0881-2911
[e]https://orcid.org/0000-0003-4867-3901
Received 2.04.2018, accepted 27.04.2018

The article presents dependencies that allow determining sinkage of a stamp as a machine's mover model, taking into account variable deformative properties of the soil massif. The study obtains theoretical results with numerical methods for solving equations, computational experiment and calculated data approximation. In solving the problem, the machine's mover is modelled by a stamp, while the surface – by a deformable massif with limited thickness and mechanical properties varying depending on the depth according to linear, quadratic or cubic relationships. The study describes an approach, which allows calculating deformation modulus and bearing capacity of a homogeneous massif, whose integral results of interaction with the stamp (deformation of the massif and the stamp sinkage) are equal to corresponding results of interaction between the stamp and inhomogeneous massif with given deformative properties. Thus, basing on the results of computational experiment and calculated data processing, the study obtains formulae for calculating the characteristics of homogeneous soil massif, whose behavior under the load is equivalent to behavior of inhomogeneous massif with given characteristics. The results of the study show that in determining the integral indices of the interaction of a mover with an inhomogeneous soil, the functions of the deformation modulus and bearing capacity can be replaced by numerical values in practical calculations. The values should be obtained using the proposed dependencies and parameters of the initial relationships characterizing the *deformative properties of the inhomogeneous massif. In conclusion, the paper notes prospective areas of further research related to modeling of interaction of stamps with inhomogeneous soil massifs of unlimited thickness, as well as with soil massifs whose properties are characterized by discrete functions.*

Keywords: stamp indention; heterogeneous soil massif; deformation modulus; bearing capacity.

Введение

В исследованиях, сосредоточенных на проблематике взаимодействия движителей колесных и гусеничных машин с опорной поверхностью, предложены математические модели, базирующиеся на решении задачи о вдавливании штампа-движителя в грунт [1–4]. Как правило, модели строятся при допущении об однородности опорной поверхности по глубине [5, 6]. Подходы, позволяющие учесть переменный характер деформативных свойств опорной поверхности, разработаны лишь частично[1, 5, 6]. Из известных в технике следует отметить два основных. В первом учет неоднородности грунта возможен при использовании в расчетах приведенного значения несущей способности [7–15], получаемого как среднее арифметическое дискретных значений несущей способности отдельных слоев опорной поверхности, что не всегда представляется корректным. В другом варианте предлагается пользоваться общими зависимостями, следующими из нелинейной постановки задачи Фламана– Буссинеска, не имеющими замкнутых аналитических решений, что ограничивает использование подхода на практике[1, 5].

Цель настоящей работы—получить зависимости, позволяющие в практических расчетах определить осадку штампа-движителя с учетом переменного характера деформативных свойств массива грунта.*Методы исследования*— численные методы решения уравнений, вычислительный эксперимент и аппроксимация расчетных данных.

Постановка задачи. Зададимся расчетной схемой процесса вдавливания штампа в опорную поверхность. Движитель машины представим штампом, опорную поверхность —деформируемым массивом с ограниченной толщиной и физико-механическими свойствами, изменяющимися по глубине по заданному закону.

Под воздействием штампа происходит сжатие массива грунта, причем деформацию элементарного слоя, вызванную сжатием, определим по формуле:

$$dh_L = \varepsilon dz_0, \qquad (1)$$

где ε—относительная деформация сжатия;dz_0—толщина элементарного слоя массива в недеформированном состоянии.

Толщину сжатого элементарного слоя массива найдем по формуле:

$$dz = (1-\varepsilon)dz_0. \qquad (2)$$

Тогда:

$$dh_L = \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}dz_0. \qquad (3)$$

Относительную деформацию сжатия определим по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \qquad (4)$$

где σ—нормальное напряжение в элементарном слое;E—модуль деформации элементарного слоя (обе величины зависят от координаты z).

Кроме того, учтем, что под воздействием штампа в массиве грунта развиваются не только нормальные, но и касательные напряжения, что вызывает дополнительное увеличение осадки штампа. Увеличение тем более заметно, чем ближе нормальное напряжение к несущей способности слоя грунта. В связи с этим определим полную деформацию элементарного слоя следующим образом [1]:

$$dh = \frac{p_S}{p_S - \sigma}dh_L. \qquad (5)$$

По выражениям (3) – (5) получим следующую формулу для суммарной деформации элементарного слоя грунта [1]:

$$dh = \frac{p_S}{p_S - \sigma}\cdot\frac{\sigma}{E-\sigma}dz_0, \qquad (6)$$

где p_S—несущая способность грунта (зависит от координаты z).

Общую полную деформацию массива грунта (осадку штампа) найдем по уравнению[1, 16–20]:

$$h = \int_0^{H-h}\frac{p_S}{p_S - \sigma}\cdot\frac{\sigma}{E-\sigma}dz_0, \qquad (7)$$

где H—толщина массива грунта.

Нормальное напряжение зависит от геометрических параметров штампа, чаще всего считающегося прямоугольным, и изменяется по глубине деформируемого массива. Примем следующую зависимость для расчета напряжения σ[1]:

$$\sigma = \frac{J}{1+\left(z/ab\right)^2}p, \qquad (8)$$

где J—параметр, учитывающий соотношение длины и ширины штампа;a—параметр, учитывающий толщину массива грунта;b—ширина штампа;p—среднее давление по пятну контакта штампа с грунтом.

Предположим, что изменение модуля деформации и несущей способности грунта по глубине описывается непрерывными функциями, параметры которых определяются, например, исходя из полевых наблюдений, и принимаются в качестве исходных данных для расчета.

Для исследования примем три следующие зависимости модуля деформации от координаты z:

$$E = a_0 + a_1 z, \qquad (9)$$

$$E = b_0 + b_1 z + b_2 z^2, \qquad (10)$$

$$E = c_0 + c_1 z + c_2 z^2 + c_3 z^3, \qquad (11)$$

где a_0, a_1, b_0, b_1, b_2, c_0, c_1, c_2, c_3—коэффициенты, характеризующие зависимости модуля деформации от координаты z.

Примем в общем виде зависимости несущей способности от координаты z:

$$p_S = \alpha_0 + \alpha_1 z \, , \tag{12}$$

$$p_S = \beta_0 + \beta_1 z + \beta_2 z^2 \, , \tag{13}$$

$$p_S = \gamma_0 + \gamma_1 z + \gamma_2 z^2 + \gamma_3 z^3 \, , \tag{14}$$

где α_0, α_1, β_0, β_1, β_2, γ_0, γ_1, γ_2, γ_3—коэффициенты, характеризующие зависимости модуля деформации от координаты z.

Значение h определим из решения уравнения (7) после подстановки в него формулы (8), одной из зависимостей (9) – (11) и одной из зависимостей (12) – (14). Найти аналитическое решение уравнения (7) в общем случае затруднительно, по этой причине обратимся к численным методам.

В качестве примера для расчета используем данные, представленные на рис.1. Деформируемый массив грунта имеет толщину 0,6 м, известны четыре значения модуля деформации E (2,3 МПа при z = 0 м; 0,5 МПа при z = 0,2 м; 1,8 МПа при z = 0,4 м; 1,2 МПа при z = 0,6 м) и четыре значения несущей способности p_S (0,27 МПа при z = 0 м; 0,18 МПа при z = 0,2 м; 0,11 МПа при z = 0,4 м; 0,11 МПа при z = 0,6 м).

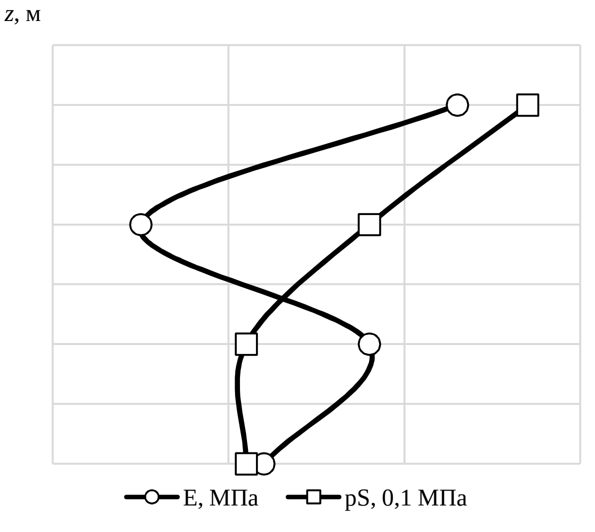

Рис. 1. Исходные данные к примеру расчета осадки штампа

По предложенным исходным данным найдем коэффициенты зависимостей (11) и (14), тогда:

$$E = 2{,}3 - 25{,}083z + 101{,}25z^2 - 104{,}17z^3 \tag{15}$$

$$p_S = 0{,}27 - 0{,}4167\,z - 0{,}375\,z^2 + 1{,}0417\,z^3 \tag{16}$$

Для примера расчета примем p = 0,8 МПа; b = 0,7 м; a = 0,6;J = 1,2.

Подставим формулы (8), (15), (16) в уравнение (7) и решим последнее численно относительно h при принятых значениях p, a, b, J. Методом итераций найдем значение h = 0,08042 м (расчет выполнен в программе *Maple* 2015).

При тех же значениях p, a, b, Jрешим уравнение для суммарной деформации сжатия массива грунта без учета сдвига:

$$h_L = \int_0^{H-h_L} \frac{\sigma}{E-\sigma} dz_0 \, . \tag{17}$$

Методом итераций найдем значение h_L = 0,04688 м.

Предположим, что найденное значение h равно корню h_0 известного уравнения для полной осадки штампа при вдавливании в однородный массив грунта с модулем E_0 и толщиной $H_0 = H$:

$$h_0 = \frac{Jp_{S0}\,pab\arctan\left(\dfrac{E_0\left(H_0 p - h_0\left(p_{S0}-p\right)\right)}{abp\sqrt{E_0\left(E_0 - Jp\right)}}\right)}{\left(p_{S0}-p\right)\sqrt{E_0\left(E_0-Jp\right)}}, \tag{18}$$

а найденное значение h_L, в свою очередь,—корню h_{L0} уравнения для деформации сжатия однородного массива грунта:

$$h_{L0} = \frac{Jpab\arctan\left(\dfrac{E_0\left(H_0 - h_{L0}\right)}{ab\sqrt{E_0\left(E_0-Jp\right)}}\right)}{\sqrt{E_0\left(E_0-Jp\right)}}, \tag{19}$$

где p_{S0}—несущая способность однородного массива грунта, значение которой найдем из решения уравнения:

$$h_0 = \frac{p_{S0}}{p_{S0}-p}\cdot h_{L0} \, . \tag{20}$$

Подставив решение уравнения (20) p_{S0} = 0,19182 МПа в формулу (18), придем к трансцендентному уравнению относительно E_0, корень которого E_0 = 0,81547 МПа.

Таким образом, найдены характеристики однородной опорной поверхности, у которой, при принятых исходных данных, интегральные показатели взаимодействия со штампом h_0 и h_{L0} равны показателям взаимодействия штампа с неоднородным массивом грунта h и h_L.

Очевидно, что, в плане вычислений, найти h_0 и h_{L0} по формулам (18), (19) заметно проще, чем решить уравнения (7), (17). Кроме того, учтем, что значения h и h_L используются в математических моделях при расчете тягово-сцепных свойств движителя, который ведется по уравнениям, также не имеющим замкнутых аналитических решений. В связи с этим полагаем, что переход к «эквивалентным» характеристикам массива грунта сделает решение задач о взаимодействии движителя с неоднородной опорной поверхностью более эффективным с практической точки зрения.

Результаты исследования. Реализуем вычислительный эксперимент на базе изложенного подхода, формализованного в процедурах программы *Maple* 2015. Расчеты выполнены при линейных функциях E и p_S (9) и (12), квадратичных —(10) и (13), кубических —(11) и (14).

Исходные данные для эксперимента получены следующим образом. В зависимости от принятого закона изменения модуля E и p_S по z (линейный, квадратичный либо кубический), в каждом цикле вычислений сгенерированы две, три либо четыре тройки значений E, p_S, z как случайные числа, распределенные по равномерному закону в пределах: E = 0,4–5 МПа;p_S = 0,1–0,3 МПа;z = 0,3–0,8 м. По этим значениям определены коэффициенты требуемых функций E и p_S(для линейных функций —a_0, a и α_0, α_1, для квадратичных —b_0, b_1, b_2 и β_0, β_1, β_2, для кубических —c_0, c_1, c_2, c_3 и γ_0, γ_1, γ_2, γ_3). Значение H принято по максимальному значению z.

Для полученных численных решений уравнений (7), (17) h и h_L подобраны такие значения E_0, p_{S0} по формулам (18) – (20), при которых $h_0 = h$ и $h_{L0} = h_L$ (при $H_0 = H$). Всего выполнено по 500 циклов расчета для каждого из отмеченных законов изменения E и p_S по z.

По результатам обработки расчетных данных установлено, что значения E_0 и p_{S0} могут быть выражены через H и параметры законов изменения E и p_S по следующим формулам:

$$E_0 = k_1 a_0 + k_2 a_1 H \quad (21)$$

$$E_0 = l_1 b_0 + l_2 b_1 + l_3 b_0 b_1 b_2 + l_4 b_0 b_1 H + l_5 b_0 b_2 H \quad (22)$$

$$\begin{gathered} E_0 = m_1 + m_2 c_0 + m_3 c_1 + m_4 c_2 + m_5 H + m_6 c_0 c_2 + \\ m_7 c_0 c_3 + m_8 c_0 H + m_9 c_1 c_2 + m_{10} c_1 c_3 + \quad (23) \\ m_{11} c_1 H + m_{12} c_2 c_3 + m_{13} c_0 c_1 H + m_{14} c_0 c_2 H + m_{15} c_0 c_3 H + \\ + m_{16} c_1 c_2 H + m_{17} c_1 c_3 H + m_{18} c_2 c_3 H \end{gathered}$$

$$p_{S0} = n_1 \alpha_0 + n_2 \alpha_1 H \quad (24)$$

$$\begin{gathered} p_{S0} = q_1 \beta_0 + q_2 \beta_0 H + q_3 \beta_1 H + q_4 \beta_0 \beta_1 \beta_2 + q_5 \beta_0 \beta_1 H + \\ + q_6 \beta_0 \beta_2 H + q_7 \beta_0 \beta_1 \beta_2 H \quad (25) \end{gathered}$$

$$\begin{gathered} p_{S0} = s_1 + s_2 \gamma_0 + s_3 H + s_4 \gamma_0 \gamma_1 + s_5 \gamma_0 \gamma_2 + s_6 \gamma_1 \gamma_2 + \\ + s_7 \gamma_1 \gamma_3 + s_8 \gamma_1 H + s_9 \gamma_2 \gamma_3 + \quad (26) \\ s_{10} \gamma_0 \gamma_1 \gamma_2 + s_{11} \gamma_0 \gamma_1 \gamma_3 + s_{12} \gamma_0 \gamma_2 H + s_{13} \gamma_0 \gamma_3 H + \\ s_{14} \gamma_1 \gamma_2 H + s_{15} \gamma_1 \gamma_3 H + s_{16} \gamma_2 \gamma_3 H + s_{17} \gamma_0 \gamma_1 \gamma_2 H \end{gathered}$$

Значения коэффициентов k, l, m, n, q, s в формулах (21) – (26) представлены в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициенты зависимостей (21) – (26)

E_0		p_{S0}	
коэффициент	значение	коэффициент	значение
при линейном законе изменения:			
формула (21), R^2 = 0,9456		формула (24), R^2 = 0,8983	
k_1	0,948	n_1	1,14
k_2	0,42	n_2	0,42
при квадратичном законе изменения:			
формула (22), R^2 = 0,96521		формула (25), R^2 = 0,92086	
l_1	0,964	q_1	0
l_2	0,0985	q_2	0,93
l_3	0,000078	q_3	0,394
l_4	0,0642	q_4	0,189
l_5	0,0372	q_5	0,00482
–		q_6	0,665
		q_7	0,323
		q_8	0,0469
при кубическом законе изменения:			
формула (23), R^2 = 0,9813		формула (26), R^2 = 0,9175	
m_1	–0,891	s_1	–0,045
m_2	1,27	s_2	1,22
m_3	0,153	s_3	0,0627
m_4	0,0177	s_4	0,774
m_5	1,53	s_5	0,105
m_6	–0,00305	s_6	–0,0152
m_7	–0,00259	s_7	–0,00692
m_8	–0,495	s_8	0,14
m_9	–0,000173	s_9	–0,0000174
m_{10}	–0,000314	s_{10}	0,0487
m_{11}	–0,0345	s_{11}	0,017
m_{12}	–0,0000296	s_{12}	0,415
m_{13}	0,0522	s_{13}	0,201
m_{14}	0,0363	s_{14}	0,032
m_{15}	0,0193	s_{15}	0,0134
m_{16}	0,00131	s_{16}	0,000172
m_{17}	0,00162	s_{17}	–0,0509
m_{18}	0,000123	–	

Заключение

По результатам выполненного исследования можем заключить, что при определении интегральных показателей взаимодействия штампа-движителя с неоднородной опорной поверхностью (осадки штампа и суммарной деформации сжатия грунта) функции модуля деформации и несущей способности в практических расчетах можно заменить числовыми значениями, получаемыми с использованием формул (21) – (26) и параметров формул (9) – (14), характеризующих изменение свойств массива грунта по глубине.

Полагаем перспективными дальнейшие исследования взаимодействия штампа-движителя с неоднородными массивами грунта неограниченной толщины, а также с массивами грунта, свойства которых характеризуются дискретными функциями.

Литература

1. Агейкин Я.С., Вольская Н.С. Динамика колесной машины при движении по неровной грунтовой поверхности. М.: МГИУ, 2003. 124 с.

2. Гуськов В.В., Велев Н.Н., Атаманов Ю.Е. Тракторы: теория. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.

3. Григорьев И.В., Никифорова А.И., Пелымский А.А., Хитров Е.Г., Хахина А.М. Экспериментальное определение времени релаксации напряжений лесного грунта // Учен. зап. Петрозав. гос. ун-та. Сер. Естественные и технические науки. 2013. № 8 (137). С. 77-80.

4. Рудов С.Е., Хитров Е.Г., Рудов М.Е. Устинов В.В. Расчет тяговых и сцепных свойств колесного скиддера с использованием данных зарубежных коллег // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 1 (12). С. 223-228.

5. Никифорова А.И., Хитров Е.Г., Пелымский А.А., Григорьева О.И. Определение осадки при движении лесозаготовительной машины по двуслойному основанию // Учен. зап. Петрозав. гос. ун-та. Сер. Естественные и технические науки. 2014. № 2 (139). С. 87-91.

6. Grigorev I.V., Khitrov E.G., Ivanov V.A., Kalistratov A.V., Bozhbov V.E. New approach for forest production stock

7. taking based on energy cost // Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconferences, Vol. 2. Water Resources. Marine and Ocean Ecosystems, 16 – 26 June 2014, Albena, Bulgaria. P. 407-414.

8. Wismer R.D., Luth, H. J. Off-road traction prediction for wheeled vehicles. Transaction ASAE. 1973. № 17 (1). P. 8-10,14.

9. Dwyer M.J. Tractive performance of a wide, low-pressure tyre compared with conventional tractor drive tyres // Journal of terramechanics. 1987. № 24 (3). P. 227-234.

10. Maclaurin E.B. The use of mobility numbers to describe the in-field tractive performance of pneumatic tyres // Proceedings of the 10th International ISTVS Conference, Kobe, Japan, 1990. Vol. 1. P. 177-186.

11. Ashmore C., Burt C., Turner J. An empirical equation for predicting tractive performance of log- skidder tires // Transactions of the ASAE. 1987. № 30 (5). P. 1231-1236.

12. Wong J.Y.Terramechanics and Off-mad Vehicles. Amsterdam // The Netherlands: Elsevier Science, 1989.

13. Wong J.Y., Reece A.R. Soil Failure Beneath Rigid Wheels," in Proc. 2nd Int. Conf. of the International Society for Terrain Vehicle Systems. Toronto. Canada: University of Toronto Press, 1966.

14. Wong J.Y. Review of ‘Soil Mechanics for Off-road Vehicle Engineering // Canadian Geotechnical Journal. 1981. Vol. 16, № 3.

15. Bekker M.G.Introduction to Terrain-Vehicle Systems. Ann Arbor, Ml: University of Michigan Press, 1969.

16. McKyes E.Soil Cutting and Tillage. Developments in Agricultural Engineering 7. Amsterdam. The Netherlands: Elsevier Science. 1985.

17. Калистратов А.В., Иванов В.А., Коротков Р.К., Хитров Е.Г., Григорьев Г.В. Исследование коэффициента фильтрации лесной почвы (случай дерново-подзолистой почвы) // Системы Методы Технологии. 2014. № 2 (22). С. 190-193.

18. Хитров Е.Г., Божбов В.Е., Ильюшенко Д.А. Расчет несущей способности лесных почвогрунтов под воздействием колесных движителей // Системы Методы Технологии. 2014. № 4 (24). С. 122-126.

19. Хитров Е.Г., Григорьев Г.В., Дмитриева И.Н., Ильюшенко Д.А. Расчет конусного индекса по величине модуля деформации лесного почвогрунта // Системы Методы Технологии. 2014. № 4 (24). С. 127-131.

20. Grigorev I.V., Khitrov E.G., Kalistratov A.V., Stepanishcheva M.V. Dependence of filtration coefficient of forest soils to its density // Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconferences, Vol. 2. Water Resources. Marine and Ocean Ecosystems, 16 – 26 June 2014, Albena, Bulgaria. P. 339-344.

21. Grigorev I.V., Khitrov E.G., Ivanov V.A., Gasparian G.D., Nikiforova A.I. Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation // Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconferences, Vol. 2. Water Resources. Marine and Ocean Ecosystems, 16 – 26 June 2014, Albena, Bulgaria. P. 443-446.

References

1. Agejkin YA.S., Vol’skaya N.S. Dynamics of wheel vehicle when driving on rough dirt surface. M.: MGIU, 2003. 124 p.

2. Gus’kov V.V., Velev N.N., Atamanov YU.E. Tractors: theory. M.: Mashinostroenie, 1988. 376 p.

3. Grigor’ev I.V., Nikiforova A.I., Pelymskij A.A., Hitrov E.G., Hahina A.M. Experimental determination of stress relaxation time of forest //Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences. 2013. № 8 (137). P. 77-80.

4. Rudov S.E., Hitrov E.G., Rudov M.E. Ustinov V.V. Calculation of traction and coupling properties of a wheeled skidder using data from foreign colleagues //Actual directions of scientific researches of the XXI century: theory and practice. 2015. T. 3, № 1 (12). P. 223-228.

5. Nikiforova A.I., Hitrov E.G., Pelymskij A.A., Grigor’eva O.I. Determination of precipitation while moving forest machine on a two-layer base //Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences. 2014. № 2 (139). P. 87-91.

6. Grigorev I.V., Khitrov E.G., Ivanov V.A., Kalistratov A.V., Bozhbov V.E. New approach for forest production stocktaking based on energy cost // Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconferences, Vol. 2. Water Resources. Marine and Ocean Ecosystems, 16-26 June 2014, Albena, Bulgaria. P. 407-414.

7. Wismer R.D., Luth, H.J. Off-road traction prediction for wheeled vehicles. Transaction ASAE. 1973. № 17 (1). P. 8-10, 14.

8. Dwyer M.J. Tractive performance of a wide, low-pressure tyre compared with conventional tractor drive tyres // Journal of terramechanics. 1987. № 24 (3). P. 227-234.

9. Maclaurin E.B. The use of mobility numbers to describe the in-field tractive performance of pneumatic tyres // Proceedings of the 10th International ISTVS Conference, Kobe, Japan, 1990. Vol. 1. P. 177-186.

10. Ashmore C., Burt C., Turner J. An empirical equation for predicting tractive performance of log- skidder tires // Transactions of the ASAE. 1987. № 30 (5). P. 1231-1236.

11. Wong J.Y. Terramechanics and Off-mad Vehicles. Amsterdam // The Netherlands: Elsevier Science, 1989.

12. Wong J.Y., Reece A.R. Soil Failure Beneath Rigid Wheels," in Proc. 2nd Int. Conf. of the International Society for Terrain Vehicle Systems. Toronto. Canada: University of Toronto Press, 1966.

13. Wong J.Y. Review of ‘Soil Mechanics for Off-road Vehicle Engineering // Canadian Geotechnical Journal. 1981. Vol. 16, № 3.

14. Bekker M.G. Introduction to Terrain-Vehicle Systems. Ann Arbor, Ml: University of Michigan Press, 1969.

15. McKyes E. Soil Cutting and Tillage. Developments in Agricultural Engineering 7. Amsterdam. The Netherlands: Elsevier Science. 1985.

16. Kalistratov A.V., Ivanov V.A., Korotkov R.K., Hitrov E.G., Grigor’ev G.V.Studies of filtration coefficient of sod-podzolic forest soils //Systems Methods Technologies. 2014. № 2 (22). P. 190-193.

17. Hitrov E.G., Bozhbov V.E., Il’yushenko D.A.Calculation of load-bearing capacity for forest potting soils influenced by the wheeled running gears //Systems Methods Technologies. 2014. № 4 (24). P. 122-126.

18. Hitrov E.G., Grigor’ev G.V., Dmitrieva I.N., Il’yushenko D.A.Calculation of a cone index on value of the deformation modulus for forest potting soils // Systems Methods Technologies. 2014. № 4 (24). P. 127-131.

19. Grigorev I.V., Khitrov E.G., Kalistratov A.V., Stepanishcheva M.V. Dependence of filtration coefficient of forest soils to its density // Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconferences, Vol. 2. Water Resources. Marine and Ocean Ecosystems, 16-26 June 2014, Albena, Bulgaria. P. 339-344.

20. Grigorev I.V., Khitrov E.G., Ivanov, V.A., Gasparian G.D., Nikiforova A.I. Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation // Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconferences, Vol. 2. Water Resources. Marine and Ocean Ecosystems, 16-26 June 2014, Albena, Bulgaria. P. 443-446.