

Расчет конусного индекса по величине модуля деформации лесного почвогрунта

Е.Г. Хитров^a, Г.В. Григорьев^b, И.Н. Дмитриева^c, Д.А. Ильюшенко^d

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский 5, Санкт-Петербург, Россия

^aye.gorkhitrov@gmail.com, ^bvtl-lta@mail.ru, ^cin2907@mail.ru, ^dtlzp@inbox.ru

Статья поступила 7.09.2014, принята 13.11.2014

В настоящей работе предложена зависимость, позволяющая на практике производить конвертирование моделей взаимодействия движителей лесных и лесозаготовительных машин, построенных с использованием конусного индекса, в модели, построенные с использованием фундаментальных характеристик лесных почвогрунтов, и обратно. Исследование выполнено с целью обеспечения возможности оперативного сравнения результатов, полученных в зарубежных научных работах по изучению процессов взаимодействия лесных и лесозаготовительных машин с почвогрунтами лесосек (модели, построенные с использованием конусного индекса в качестве показателя сопротивляемости почвогрунта деформированию), и результатов отечественных исследований (при построении моделей процессов взаимодействия движителей машин с почвогрунтами используются в основном фундаментальные характеристики почвогрунтов — модуль упругости, модуль деформации, внутреннее сцепление, угол внутреннего трения и проч.). По результатам выполненных исследований получена зависимость, с помощью которой возможно на практике конвертировать модели, полученные с использованием фундаментальных характеристик свойств почвогрунта, в модели, использующие конусный индекс. Это облегчает валидацию результатов исследований за счет обеспечения возможности сопоставления между собой результатов различных авторов. В частности, выполнено сравнение результатов зарубежных авторов с известными в России рекомендациями по выбору трелевочной техники при организации первичного транспорта леса в зависимости от категорий почвогрунтов. Сравнение показывает, что результаты, полученные независимо отечественными и зарубежными учеными, практически идентичны, и, как следствие, подтверждают друг друга.

Ключевые слова: конусный индекс, лесные почвогрунты, модуль деформации, конвертирование.

Calculation of a cone index on value of the deformation modulus for forest potting soils

E.G. Hitrov^a, G.V. Grigoriev^b, I.N. Dmitrieva^c, D.A. Iliushenko^d

Saint Petersburg State Forest Technical University under name of S.M.Kirov; 5, Institutskiy per., Saint Petersburg, Russia

^aye.gorkhitrov@gmail.com, ^bvtl-lta@mail.ru, ^cin2907@mail.ru, ^dtlzp@inbox.ru

Received 7.09.2014, accepted 13.11.2014

The article deals with the relationship which allows making in practice the conversion of models of interaction between wheeled running gears and timber and timber logging machinery, designed by using the cone index, into the models, designed by using the fundamental characteristics of forest potting soils, and vice versa. The study has been performed in order to allow comparing the results obtained in foreign scientific studies on the interaction processes between timber and timber logging machinery and forest potting soils in cutting areas (the models designed by using the cone index as an indicator of forest potting soil resistance to deformation), and the results of national studies (when models of interaction processes between wheeled running gears and forest potting soil are designed, fundamental characteristics of the forest potting soils such as elasticity modulus, deformation modulus, internal cohesion, internal friction angle, etc.) are used. According to the results of the study, the relationship has been received which allows practically converting the models obtained with the fundamental properties of the forest potting soils, into the models, which use cone index. This makes it easy to validate the results of research by allowing a comparison between the results of different authors. In particular, the results of foreign scientists have been compared with the results of well-known recommendations in Russia on selecting the skidding equipment when organizing the primary timber transfer depending on the categories of the forest potting soils. The comparison shows that the results obtained independently both by domestic and foreign scientists are almost identical, and, therefore, confirm each other.

Key words: cone index, forest potting soils, deformation modulus, converting.

Введение. В зарубежных научных работах широкое распространение получили модели процессов взаимодействия лесных и лесозаготовительных машин с почвогрунтами лесосек, построенные с использованием в качестве показателя сопротивляемости почвогрунта деформированию конусного индекса CI [1, 2]. Конусный индекс определяется опытным путем при помощи специального прибора — стандартного пенетрометра, представляющего собой металлический стержень с

коническим наконечником. Геометрические параметры стандартного пенетрометра регламентированы. Пенетрометр вдавливаются на определенную глубину (20 см) [1, 2], при этом при помощи индикатора замеряется усилие вдавливания. Конусный индекс определяется путем деления зарегистрированного значения усилия вдавливания на площадь проекции наконечника на плоскость вдавливания.

Вместе с тем, у отечественных исследователей при построении моделей процессов взаимодействия движителей машин с почвогрунтами используются, в основном, характеристики грунтов, называемые фундаментальными (модуль упругости, модуль деформации E , внутреннее сцепление C_0 , угол внутреннего трения φ_0 и проч.) [3 – 5].

По причине использования различных величин, на практике затруднительно сравнить между собой результаты, полученные зарубежными и отечественными коллегами [3, 6, 7].

Целью настоящей работы является получение зависимостей, которые позволят на практике производить конвертирование моделей взаимодействия движителей лесных и лесозаготовительных машин, построенных с использованием конусного индекса CI в модели, построенные с использованием фундаментальных характеристик лесных почвогрунтов, и обратно.

Методы исследования: анализ литературных источников, численные методы анализа и аппроксимации расчетных данных.

Результаты исследований. Известны теоретические работы, в которых приводятся зависимости для расчета конусного индекса с использованием фундаментальных механических характеристик грунта, а именно — угла внутреннего трения, внутреннего сцепления и модуля сдвига [1].

Расчетная схема процесса вдавливания конуса согласно [1] представлена на рис. 1.

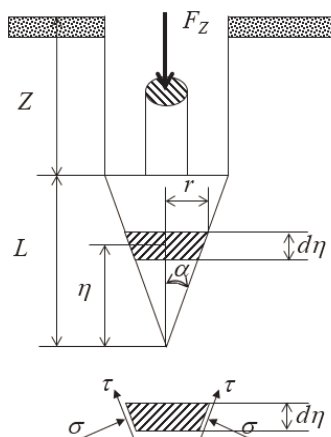


Рис. 1. Расчетная схема процесса вдавливания конусного пенетрометра в грунт [1]

Усилие вдавливания F_Z определяется по формуле [1]:

$$F_Z = \int_0^L \pi d_K (\sigma \tan \alpha + \tau) d\eta, \quad (1)$$

где d_K — диаметр основания конуса (20,29 мм); L — длина конической части пенетрометра (38 мм) [2]; Z — расстояние от поверхности грунта до начала конической части прибора (238 мм) [2]; α — угол заточки конуса (30°); σ — нормальная к плоскости конуса составляющая сопротивления вдавливанию; τ — касательная к плоскости конуса составляющая сопротивления вдавливанию; η — координата элементарного поперечного сечения конуса.

Нормальная составляющая сопротивления вдавливанию определяется по формуле [8]:

$$\sigma = 3 \frac{1 + \sin \varphi_0}{3 - \sin \varphi_0} (q + C_0 \cot \varphi_0) \times \left(\frac{G}{C_0 + q \tan \varphi_0} \right)^{\frac{4 \sin \varphi_0}{3(1 + \sin \varphi_0)}} - C_0 \cot \varphi_0, \quad (2)$$

$$q = (Z + L - \eta) \rho. \quad (3)$$

где ρ — плотность грунта; G — модуль сдвига грунта.

Модуль сдвига G определяется по зависимости:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}. \quad (4)$$

Касательная составляющая сопротивления вдавливанию определяется по формуле:

$$\tau = C_0 + \sigma \tan \varphi_0. \quad (5)$$

Непосредственно конусный индекс CI рассчитывается при известном значении F_Z по формуле [2]:

$$CI = 4F_Z / (\pi d_K^2). \quad (6)$$

Для расчета величин C_0 [кПа], φ_0 [°], ρ [кг/м³], ν можно воспользоваться следующими зависимостями, полученными по результатам аппроксимации данных о связи модуля деформации E [МПа] с прочими физико-механическими свойствами лесных почвогрунтов, представленных в работах [3; 4]:

$$C_0 = 10,774E^{0,7737}, \quad (7)$$

$$\varphi_0 = 13,669E^{0,1818}, \quad (8)$$

$$\rho = 840,08E^{0,1168}, \quad (9)$$

$$\nu = 0,242E^{-0,422}. \quad (10)$$

После подстановки зависимостей (2) – (5), с учетом (7) – (10) и геометрических параметров конуса, переменной величиной в формулах (1), (6) будет являться модуль деформации E .

Результаты расчета усилия вдавливания F_Z по зависимости (1) и конусного индекса по зависимости (6) представлены в виде графиков на рис. 2 и 3, а также в табл. 1.

Результаты расчета CI [МПа] практически точно аппроксимируются линейной зависимостью:

$$CI = 0,4862E. \quad (11)$$

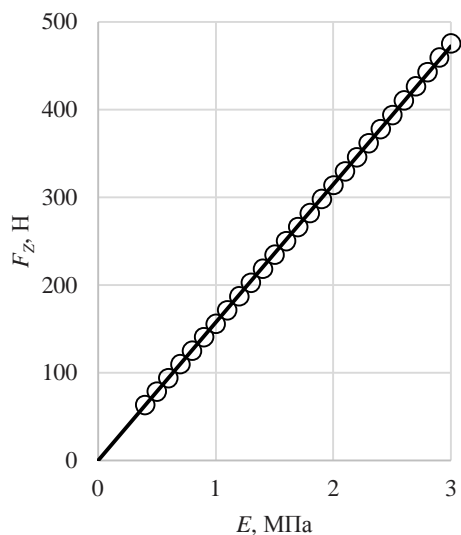


Рис. 2. Зависимость усилия вдавливания стандартного конуса от модуля деформации почвогрунта

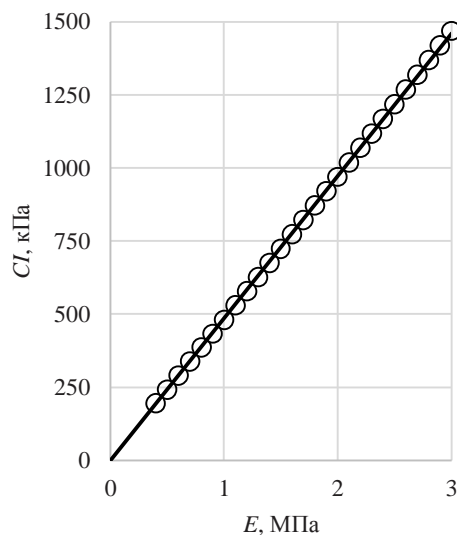


Рис. 3. Зависимость конусного индекса от модуля деформации почвогрунта

Таблица 1

Результаты расчета усилия вдавливания стандартного конуса и конусного индекса при варьировании модуля деформации лесного почвогрунта

E , МПа	F_z , Н	CI , кПа	E , МПа	F_z , Н	CI , кПа	E , МПа	F_z , Н	CI , кПа
0,4	63,157	195,2	1,3	202,748	626,8	2,2	345,480	1068,0
0,5	78,550	242,8	1,4	218,448	675,3	2,3	361,533	1117,6
0,6	93,958	290,5	1,5	234,188	724,0	2,4	377,620	1167,4
0,7	109,390	338,2	1,6	249,968	772,7	2,5	393,747	1217,2
0,8	124,855	386,0	1,7	265,789	821,6	2,6	409,908	1267,2
0,9	140,355	433,9	1,8	281,649	870,7	2,7	426,105	1317,2
1	155,894	481,9	1,9	297,549	919,8	2,8	442,337	1367,4
1,1	171,471	530,1	2	313,487	969,1	2,9	458,605	1417,7
1,2	187,090	578,4	2,1	329,464	1018,5	3	474,906	1468,1

Таблица 2

Сопоставление результатов по исследованию проходимости [2] с классификацией почвогрунтов [3; 4]

CI , кПа [4]	E , МПа расчет по (11)	Качественная характеристика проходимости [2]	Категория почвогрунта [3], [4]
11	0,02	Местность непроходима	III
51	0,10	Человек испытывает трудности при ходьбе	III
134	0,28	Местность проходима для гусеничной техники массой до 2 т	III
207	0,43	Местность проходима для гусеничной техники массой до 10 т	III
314	0,65	Местность проходима для гусеничной техники массой до 15 т	II
435	0,89	Местность проходима для легкой колесной техники	II
590	1,21	Местность проходима для тяжелой гусеничной техники	II
809	1,66	Местность проходима для колесной техники	I
1217	2,50	Местность проходима без ограничений	I

Примечание. Грунт категории I классифицируется как прочный, II — нормальный, III — слабый

Практическое значение полученной формулы (11), по нашему мнению, заключается в том, что с ее помощью можно оперативно проводить сопоставление результатов исследований, выполненных с использованием величин, привычных для отечественных ученых, с результатами, полученными зарубежными коллегами, которые, как правило, используют конусный индекс и производные от него величины (например, скорректированный конусный индекс RCI и т. д.).

Например, в работе [2] приводится таблица, в которой обобщены практические наблюдения о связи конусного индекса с возможностью передвижения того или иного транспортного средства по поверхности грунта (качественная характеристика проходимости). С использованием данных [3, 4] можно составить таблицу, позволяющую связать качественные характеристики проходимости с классификацией почвогрунтов по Григорьеву

Выполненные исследования позволяют сделать ряд выводов.

Зависимость величины сопротивления вдавлению стандартного конуса CI от модуля деформации лесного почвогрунта носит линейный характер и описывается формулой (11).

Сопоставление результатов, представленных в табл. 2, с практическими рекомендациями по выбору трелевочной техники при организации первичного транспорта леса в зависимости от категорий почвогрунтов [3; 4; 9] показывает, что результаты, полученные независимо отечественными и зарубежными учеными, практически идентичны, и, как следствие, подтверждают друг друга.

С использованием формулы (11) предлагается на практике конвертировать модели, полученные с использованием фундаментальных характеристик свойств почвогрунта (E , C_0 , φ) в модели, использующие конусный индекс CI , и тем самым облегчить валидацию результатов исследований за счет обеспечения возможности сопоставления между собой результатов различных авторов.

Валидация моделей с использованием предложенного подхода позволит интегрировать их в общую методику эколого-энергетической оценки эффективности лесопользования, заложенную в работах [9; 10], в которую ранее включены результаты исследований, проведенных в работах [11 – 15].

Литература

1. Rohani, B., Baladi, G.Y. Correlation of mobility cone index with fundamental engineering properties of soil. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1981, 41 p.
2. Saarihahti M. Evaluation of the WES-method in assessing the trafficability of terrain and the Mobility of forest tractors, part 4. University of Helsinki, 2002. 15 p.
3. Григорьев И.В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных трелевочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: Изд-во ЛТА, 2006. 236 с.
4. Григорьев И.В., Жукова А.И., Григорьева О.И., Иванов А.В. Средообразующие технологии разработки лесосек в

условиях Северо-Западного региона Российской Федерации. СПб.: Изд-во ЛТА, 2008. 176 с.

5. Григорьев И.В., Макуев В.А., Никифорова А.И., Хитров Е.Г., Устинов В.В., Калинин С.Ю. Исследование коэффициента сопротивления передвижению колесных лесных машин // Вестник Московского государственного университета леса. Лесной вестник. 2014. № 2. С. 36-41.

6. Григорьев И.В., Никифорова А.И., Пельмский А.А., Хитров Е.Г., Хахина А.М. Экспериментальное определение времени релаксации напряжений лесного грунта. Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. Естественные и технические науки. 2013. № 8 (137). С. 77-80.

7. 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.

8. Vesic, A.S. Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division 1972. № 98. P. 113-123.

9. Никифорова А.И., Хитров Е.Г., Пельмский А.А., Григорьева О.И. Определение осадки при движении лесозаготовительной машины по двухслойному основанию // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. Естественные и технические науки. 2014. № 2 (139). С. 87-91.

10. Григорьев И.В., Хитров Е.Г., Никифорова А.И., Григорьева О.И., Куницкая О.А. Определение энергоемкости продуктов лесопользования в рамках методики оценки экологической эффективности лесопользования // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки. 2014. Т. 19. № 5. С. 1499-1502.

11. Григорьев И.В., Никифорова А.И., Григорьева О.И., Куницкая О.А. Обоснование методики оценки экологической эффективности лесопользования // Вестник КрасГАУ. 2012. № 6. С. 72-77.

12. Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьев Г.В., Есин Г.Ю. Исследование кинетики центробежной пропитки древесины // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2013. № 2 (332). С. 156-162.

13. Григорьев Г.В., Хитров Е.Г., Есин Г.Ю., Гумерова О.М. Кинетика насыщения древесины жидкостью при центробежной пропитке // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2013. № 203. С. 108-116.

14. Гончаров Ю.А., Куницкая О.А., Григорьев Г.В., Дмитриева И.Н. Экспериментальные исследования процесса пропитки древесины сосны в поле центробежных сил с учетом соотношения зон ранней и поздней древесины [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. 2014. № 3. URL (дата обращения: 10.10.2014).

15. Григорьев И.В., Былев А.Б., Хахина А.М., Никифорова А.И. Математическая модель уплотняющего воздействия динамики поворота лесозаготовительной машины на боковые полосы трелевочного волока // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. Естественные и технические науки. 2012. Т. 1, № 8 (129). С. 72-77.

References

1. Rohani, B., Baladi, G.Y. Correlation of mobility cone index with fundamental engineering properties of soil. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1981, 41 p.
2. Saarihahti M. Evaluation of the WES-method in assessing the trafficability of terrain and the Mobility of forest tractors, part 4. University of Helsinki, 2002. 15 p.

3. Grigor'ev I.V. Reduce negative impacts on soil of the wheeled skidders by justification modes of its motion and process equipment. SPb.: Izd-vo LTA, 2006. 236 p.

4. Grigor'ev I.V., Zhukova A.I., Grigor'eva O.I., Ivanov A.V. Sparing the environment technologies of the development of cutting areas in the North-West region of the Russian Federation. SPb.: Izd-vo LTA, 2008. 176 p.

5. Grigor'ev I.V., Makuev V.A., Nikiforova A.I., Khitrov E.G., Ustinov V.V., Kalinin S.Yu. Study of resistance coefficient of the movement of wheeled forestry machines // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa. Lesnoi vestnik. 2014. № 2. P. 36-41.

6. Grigor'ev I.V., Nikiforova A.I., Pelymskii A.A., Khitrov E.G., Khakhina A.M. Experimental determination of the stress relaxation time of the forest soil. Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2013. № 8 (137). P. 77-80.

7. Kalistratov A.V., Ivanov V.A., Korotkov R.K., Khitrov E.G., Grigor'ev G.V. Investigation of forest soil filtration coefficient (the case of sod-podzolic soil). Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2014. № 2 (22). P. 190-193.

8. Vesic, A.S. Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division 1972. № 98. 113 – 123 p.

9. Nikiforova A.I., Khitrov E.G., Pelymskii A.A., Grigor'eva O.I. Determination of sinkage of the forest machine during the motion on the two-layered base // Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2014. № 2 (139). P. 87-91.

10. Grigor'ev I.V., Khitrov E.G., Nikiforova A.I., Grigor'eva O.I., Kunitskaya O.A. The definition of energy-intensive forest use products within the framework of methodology assessment of eco-efficiency forest management // Vestnik Tambovskogo universiteta. Ser. Estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2014. T. 19. № 5. P. 1499-1502.

11. Grigor'ev I.V., Nikiforova A.I., Grigor'eva O.I., Kunitskaya O.A. Substantiation of the assessment methodology of the ecological efficiency of forest management // Vestnik KrasGAU. 2012. № 6. P. 72-77.

12. Grigor'ev I.V., Kunitskaya O.A., Grigor'ev G.V., Esin G.Yu. Investigation of the kinetics of centrifugal impregnation of wood // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal. 2013. № 2 (332). P. 156-162.

13. Grigor'ev G.V., Khitrov E.G., Esin G.Yu., Gumerova O.M. Kinetics of saturation liquid of timber with the centrifugal impregnation // Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii. 2013. № 203. P. 108-116.

14. Goncharov Yu.A., Kunitskaya O.A., Grigor'ev G.V., Dmitrieva I.N. Experimental studies of the impregnation of pine wood in the field of centrifugal forces taking into account the relationship between areas of early and late wood [Elektronnyi resurs] // Inzhenernyi vestnik Dona. 2014. № 3. URL (data obrashcheniya:10.10.2014).

15. Grigor'ev I.V., Bylev A.B., Khakhina A.M., Nikiforova A.I. A mathematical model of the dynamics of the sealing effects of rotation of the forestry machines on the sidebands of the skidding track // Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2012. T. 1, № 8 (129). P. 72-77.

