

УДК 630*372

В. Ю. Лисов, В. Н. Язов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ, ОПТИМАЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ И ОСАДКИ ЛЕСНОЙ ПОЧВЫ

Движение лесных машин по волокам сопровождается процессом накопления деформаций, в результате чего растёт глубина колеи. В результате экспериментов получены зависимости осадки лесной почвы от количества повторных нагрузок и влажности почвы. Полученные зависимости могут быть использованы для повышения проходимости лесных машин и снижения экологического ущерба при их работе в лесу.

Ключевые слова: осадка почвы; оптимальная влажность почвы; максимальная плотность почвы; уплотнение почвы.

Введение. Актуальной проблемой для лесозаготовителей является выбор лесосечных машин по условию проходимости. Под проходимостью понимается количество возможных проходов трактора по волоку [1–2]. Проходимость лесных машин в значительной степени определяется деформацией почвы и колееобразованием, что зависит от давления движителей на почву, её физико-механических параметров, времени действия нагрузки и кратности её повторения [3].

Целью исследования является определение физико-механических показателей лесной почвы, влияющих на колееобразование, а также получение зависимости осадки лесной почвы от количества повторных нагрузок и влажности почвы. Научная и практическая значимость полученных результатов заключается в получении дополнительных фактических данных о физико-механических свойствах лесных почв как опорных поверхностей для лесных машин.

Анализ исследований [4–6] взаимодействия движителей лесных тракторов с почвами показал, что наибольший отри-

цательный эффект заключается в чрезмерном уплотнении почвы.

Процесс уплотнения почвы, в составе которой имеются твёрдые минеральные частицы, вода и воздух, заключается в сжатии всей системы воздействием повторных нагрузок [7–8]. В результате этого происходит уменьшение объёма почвы за счёт более плотной упаковки твёрдых частиц и выжимания из пор почвы воздуха.

Вода при уплотнении [9–10] не успевает отжаться из зоны контакта между частицами, поскольку для её фильтрации сквозь тонкие поры требуется определённое время. Работа уплотнения уходит на преодоление трения между частицами и их перемещение. Пока влажность почвы мала, добавление в неё воды облегчает перемещение частиц относительно друг друга и способствует их более тесной укладке при той же затраченной работе. В результате с увеличением содержания воды в образце почвы до определённого предела плотность скелета увеличивается. При этом в почве существует связанная система воздушных пор, сообщающихся с атмосферой, объём которых постепенно

убывает при вытеснении воздуха в атмосферу. Но при чрезмерной влажности смазывающий эффект уже не увеличивается, а вода препятствует сближению частиц. В итоге зависимость плотности скелета от влажности почвы имеет максимум. Дальнейшее увеличение влажности приводит не к сближению частиц, а к раздвижению их водой. Находящиеся в воде пузырьки воздуха замкнуты, то есть не связаны между собой и не сообщаются с атмосферой, поэтому при одинаковой затраченной на уплотнение механической работе наибольший эффект уплотнения получается при некоторой оптимальной влажности W_{opt} , которой соответствует максимальная плотность скелета почвы ρ_{max} .

Оптимальной влажностью называется такая влажность, при которой почва может быть уплотнена до максимально возможной плотности при наименьшей работе уплотняющих средств. При этом плотность почвы, которая выражается плотностью сухой почвы, называют максимальной плотностью [8].

Техника эксперимента. Исследования по определению максимальной плотности, оптимальной влажности и осадки лесной почвы проводились в ноябре 2012 года в лабораторных условиях, по методике, приведённой в ГОСТ 22733-2002 [11].

Для лабораторных испытаний были взяты 10 проб почвы с лесосеки, находящейся в квартале № 95 Морозовского Военного лесничества во Всеволожском районе Ленинградской области.

Проведя зерновой анализ образцов почвы, было установлено:

1) почва армирована корневой системой подстилающего слоя;

2) доля крупных корней (диаметром от 2 до 5 мм) составляет 14 %. Доля мелких корней (диаметром до 2 мм) составляет 30 %. Остальную массу составляет почва.

Образцы почвы помещались в сушильный шкаф, где высушивались до постоянной массы при температуре 105 °С.

Для определения максимальной плотности и оптимальной влажности лесной почвы использовались следующие приборы и оборудование: прибор для стандартного уплотнения СоюзДорНИИ, сито с диаметром отверстий 2 мм, весы технические, фаянсовая ступка с пестиком, нож – шпатель, эксикаторы, штангенциркуль, линейка.

Порядок проведения эксперимента:

- провели шесть опытов с восемнадцатью образцами почвы. Для каждого опыта брали по три навески воздушно-сухой почвы массой 0,1 кг ($m_{сух}$) каждая, просеянной через сито с размером отверстий 2 мм, и увлажняли почву до необходимой влажности. Далее рассчитывали среднеарифметическое значение результатов для каждого опыта;

- испытания проводили с образцами почвы, влажность которых лежит в диапазоне от 5 до 30 %, с шагом измерений – 5 %;

- увлажнённую почву перемешивали и помещали на 10–15 часов в эксикатор для равномерного распределения влаги;

- увлажнённую почву поочередно, начиная с самого малого увлажнения, помещали в прибор для стандартного уплотнения;

- производили уплотнение ударами стандартной трамбовки весом 2,5 кг при высоте падения 0,3 м. Для определения осадки почвы после каждого удара трамбовки фиксировали изменение осадки штампа (h). Удары трамбовкой производили до тех пор, пока почва не перестанет уплотняться;

- после окончания уплотнения снимали направляющий цилиндр, выступающую почву срезали ножом по верхней кромке нижнего разъёмного цилиндра;

- уплотнённый образец почвы вынимали из разъёмного цилиндра, измеряли штангенциркулем его диаметр (D), высоту (H), взвешивали с точностью до 1 % и определяли плотность почвы по формуле:

$$\rho_{\text{влаж}} = \frac{m_{\text{влаж}}}{V},$$

где $\rho_{\text{влаж}}$ – плотность влажной почвы, г/см³; $m_{\text{влаж}}$ – масса влажной почвы, г; V – объём почвы, см³;

- из образца вырезали 10 г почвы, взвешивали с точностью до 1 %, помещали в сушильный шкаф, высушивали до постоянной массы, а затем определяли влажность почвы. Таким же образом изготавливали последующие образцы почвы, но с разной влажностью;

- после испытаний и определения влажности по объёмному весу влажной почвы находили объёмный вес её скелета по формуле:

$$\rho_{\text{сух}} = \frac{\rho_{\text{влаж}}}{1 + 0,01 \cdot W},$$

где $\rho_{\text{сух}}$ – плотность сухой почвы, г/см³; W – влажность почвы, %.

Характерные результаты эксперимента по определению оптимальной влажности почвы приведены в табл. 1.

На основании результатов, представленных в табл. 1, определена максимальная плотность (ρ_{max}) и оптимальная влажность (W_{opt}) почвы. Эти величины составляют: $\rho_{\text{max}} = 1,35$ г/см³, $W_{\text{opt}} = 10$ %.

Результаты эксперимента по определению осадки почвы представлены в табл. 2.

Таблица 1

Результаты эксперимента по определению оптимальной влажности почвы

Величина	Номер опыта					
	1	2	3	4	5	6
$m_{\text{сух}}$, г	100	100	100	100	100	100
D , мм	50	50	50	50	50	50
H , мм	38	37	38	38	40	45
V , см ³	74,57	72,61	74,57	74,57	78,5	88,31
$m_{\text{влаж}}$, г	104,4	108,2	114,84	116,55	120,4	125,7
$\rho_{\text{влаж}}$, г/см ³	1,4	1,49	1,54	1,56	1,53	1,42
W , %	5	10	15	19	23	28
$\rho_{\text{сух}}$, г/см ³	1,33	1,35	1,34	1,31	1,24	1,11

Таблица 2

Результаты эксперимента по определению осадки почвы

Количество ударов трамбовки	h , мм						Z , мм					
	Номер опыта						Номер опыта					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
0	22	23,5	23	21	22	26,5	0	0	0	0	0	0
1	18	17,5	18	17	18	24,5	4	6	5	4	4	2
2	16	14,5	15	15	17	22,5	6	9	8	6	5	4
3	15	13,5	14	14	16	21,5	7	10	9	7	6	5
4	14	12,5	13	13	15	20,5	8	11	10	8	7	6
5	13	12	12,5	12	14,5	20,3	9	11,5	10,5	9	7,5	6,2
6	12	11,5	12	11,5	14,3	19,5	10	12	11	9,5	7,7	7
7	11,5	11	11,5	11,3	14	19,3	10,5	12,5	11,5	9,7	8	7,2
8	11	10,5	11	11,2	13,5	19	11	13	12	9,8	8,5	7,5
9	10,8	10	10,5	11	13,2	18,8	11,2	13,5	12,5	10	8,8	7,7
10	10,5	9,5	10	10,5	13	18,5	11,5	14	13	10,5	9	8
11	10,3	9	9,8	10	12,6	18	11,7	14,5	13,2	11	9,4	8,5
12	10,2	8,8	9,5	9,5	12,4	17,8	11,8	14,7	13,5	11,5	9,6	8,7
13	9,8	8,6	9,4	9	12,1	17,5	12,2	14,9	13,6	12	9,9	9

Окончание табл. 2

Количество ударов трамбовки	<i>h</i> , мм						<i>Z</i> , мм					
	Номер опыта						Номер опыта					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
14	9,5	8,4	9,2	8,8	11,8	17,1	12,5	15,1	13,8	12,2	10,2	9,4
15	9,3	8,1	9	8,5	11,6	16,8	12,7	15,4	14	12,5	10,4	9,7
16	8,7	7,8	8,8	8	11,3	16,6	13,3	15,7	14,2	13	10,7	9,9
17	8,6	7,6	8,4	7,9	11	16,3	13,4	15,9	14,6	13,1	11	10,2
18	8,5	7,3	8,2	7,9	10,5	16	13,5	16,2	14,8	13,1	11,5	10,5
19	8,3	7,1	8	7,9	10,3	15,7	13,7	16,4	15	13,1	11,7	10,8
20	8	6,8	7,8	7,8	10,1	15,3	14	16,7	15,2	13,2	11,9	11,2
21	7,8	6,6	7,5	7,7	10	15,2	14,2	16,9	15,5	13,3	12	11,3
22	7,5	6,5	7,3	7,6	9,9	15,1	14,5	17	15,7	13,4	12,1	11,4
23	7,3	6,4	7,2	7,6	9,8	15	14,7	17,1	15,8	13,4	12,2	11,5
24	7,1	6,3	7,1	7,5	9,7	14,7	14,9	17,2	15,9	13,5	12,3	11,8
25	7	6,3	7,1	7,5	9,6	14,5	15	17,2	15,9	13,5	12,4	12
26	6,9	6,2	7	7,4	9,5	14,4	15,1	17,3	16	13,6	12,5	12,1
27	6,9	6,1	7	7,3	9,3	14,2	15,1	17,4	16	13,7	12,7	12,3
28	6,8	6,1	6,9	7,2	9,2	14	15,2	17,4	16,1	13,8	12,8	12,5
29	6,8	6	6,9	7	9	14	15,2	17,5	16,1	14	13	12,5
30	6,8	6	6,9	7	9	14	15,2	17,5	16,1	14	13	12,5

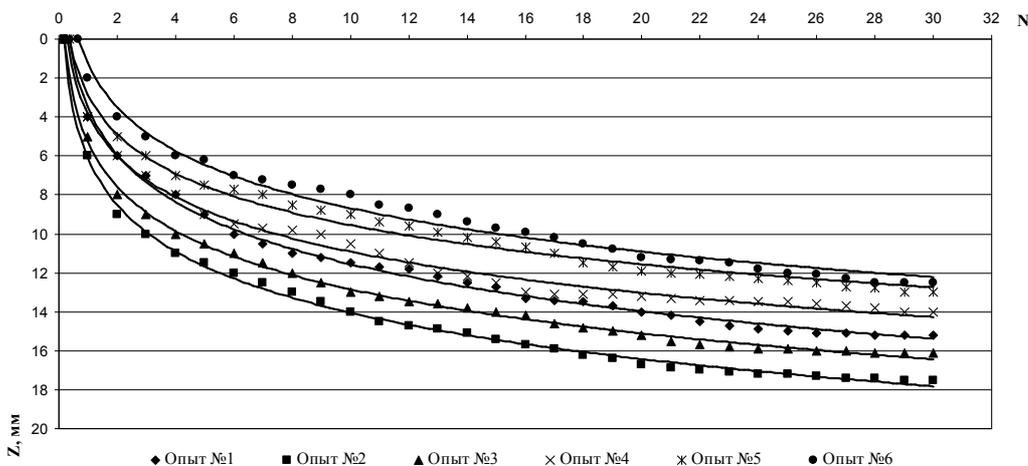
На рисунке представлены аппроксимирующие графики изменения осадки почвы (*Z*) от количества ударов трамбовки (*N*). Как видно из графиков, полученные экспериментальные данные описываются логарифмической функцией.

Таблица 3

Вид аппроксимирующего выражения

№ образца	Вид аппроксимирующего выражения	<i>R</i> ²
1	$Z = 3,4867 \cdot \ln(N) + 3,5261$	0,9965
2	$Z = 3,4367 \cdot \ln(N) + 6,1306$	0,9975
3	$Z = 3,2691 \cdot \ln(N) + 5,3145$	0,9977
4	$Z = 3,0602 \cdot \ln(N) + 3,8643$	0,9923
5	$Z = 2,9008 \cdot \ln(N) + 2,8744$	0,9852
6	$Z = 3,2172 \cdot \ln(N) + 1,2736$	0,9851

Для определения вида аппроксимирующего выражения и величины достоверности аппроксимации (*R*²) использовалась программа Excel. Результаты представлены в табл. 3.



Аппроксимирующие графики изменения осадки почвы (*Z*) от количества ударов трамбовки (*N*)

Достоверность полученных экспериментальных данных определялась с помощью критерия Фишера и критерия Кохрена. Расчётное значение критерия Фишера для шести опытов лежит в диапазоне 0,076 – 0,124, а критерия Кохрена – в диапазоне 0,12 – 0,22. При расчёте этих критериев задавались уровнем значимости 0,05, таким образом, результаты расчётов достоверны с точки зрения статистики с вероятностью 95 %.

На основании полученных экспериментальных данных были сделаны следующие **выводы**:

1) после тридцати ударов трамбовкой почва перестает уплотняться;

2) при оптимальной влажности осадка

почвы максимальна, так как почва подвержена максимальному уплотнению;

3) полученные экспериментальные данные описываются логарифмической функцией. Величина достоверности аппроксимации близка к единице, что свидетельствует о хорошей сходимости логарифмической модели с полученными во время проведения экспериментальных исследований данными;

4) полученные зависимости позволяют с большой долей вероятности прогнозировать конечную плотность почвы, а следовательно, и управлять процессом уплотнения лесной почвы для достижения ею оптимальных значений с точки зрения последующего естественного лесовозобновления.

Список литературы

1. Базаров, С.М. Влияние деформации движителей колесно-гусеничных машин на их проходимость по лесосеке / С.М. Базаров, И.В. Григорьев, Д.С. Киселев, А.И. Никифорова, А.В. Иванов // Системы. Методы. Технологии. – 2012. – № 4. – С. 36-40.

2. Анисимов, Г.М. Лесотранспортные машины: Учебное пособие / Г.М. Анисимов, А.М. Кочнев; Под ред. Г.М. Анисимова. – СПб.: Издательский дом «Лань», 2009. – 448 с.

3. Герасимов, Ю.Ю. Лесосечные машины для рубок ухода: Компьютерная система принятия решений / Ю.Ю. Герасимов. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1998. – 236 с.

4. Анисимов, Г.М. Экологическая эффективность трелёвочных тракторов / Г.М. Анисимов, И.В. Григорьев, А.И. Жукова. – СПб.: СПб ГЛТА. 2006. – 352 с.

5. Котиков, В.М. Процесс колеобразования при многократном проходе лесозаготовительных машин. / В.М. Котиков, Я.В. Слodgeвич и др. // Научные труды МГУЛ. – М.: МГУЛ, 1995. – Вып. 4. – С. 62-69.

6. Сабо, Е.Д. Виды и динамика уплотнения и разуплотнения почв на вырубках / Е.Д. Сабо // Научные труды МГУЛ. – 2012. – Вып. 3. – С. 42-45.

References

1. Bazarov S.M., Grigorev I.V., Kiselev D.S., Nikiforova A.I., Ivanov A.V. Vliyanie deformatsii dvizhiteley kolesno-gusenichnykh mashin na ikh prokhodimost po lesoseke [Deformation Power of Skidding Tractor and its Impact on Floatation Ability of Vehicles in the off the Road Conditins]. Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]. 2012. No 4. P. 36-40.

2. Anisimov G.M., Kochnev A.M. Lesotransportnye mashiny: Uchebnoe posobie, pod red. G.M. Anisimova [Forest-Transport Machines: study guide, under the editorship of G.M. Anisimov]. Saint-Petersburg: Lan Publ., 2009. 448 p.

3. Gerasimov Yu.Yu., Syuney V.S. Lesosechnye mashiny dlya rubok ukhoda: Kompyuternaya sistema prinyatiya resheniy [Stump-to-Roadside Equipment for Thinnings: Computer System for Decision-Making]. Petrozavodsk: PetrGU Publ., 1998. 236 p.

4. Anisimov G.M., Grigorev I.V., Zhukova A.I. Ekologicheskaya effektivnost trelevochnykh traktorov [Ecological Efficiency of Skidding Vehicles]. Saint-Petersburg: Saint-Petersburg GLTA, 2006. 352 p.

5. Kotikov V.M., Slodkevich Ya.V., et al. Protsess koleeobrazovaniya pri mnogokratnom prokhode lesozagotovitelnykh mashin [Process of Rutting in Multiple Pass of Harvesters]. Nauchn. tr. Vyp. 4 [Transactions. Issue 276]. Moscow: MGUL, 1995. P. 62-69.

6. Sabo E.D. Vidy i dinamika uplotneniya i razuplotneniya pochv na vyrubkakh [Types and Dynamics of Firming of Soil and Vice Versa at the Clearances]. Nauchnye trudy MGUL [Scientific Works of Moscow State Forestry University]. Moscow: MGUL, 2012. Issue 3. P. 42-45.

7. Григорьев, И.В. Математическая модель образования колеи в почвогрунтах колесными машинами с упругими шинами / И.В. Григорьев, С.М. Базаров, Д.С. Киселев и др. // Научное обозрение. – 2012. – № 5. – С. 332-341.
8. Лесные дороги. Справочник / Под ред. Э.О. Салминена. – СПб.: Издательство «Лань», 2012. – 496 с.
9. Роде, А.А. Основы учения о почвенной влаге / А.А. Роде. – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1965 – 663 с.
10. Козлова, А.А. Учебная практика по физике почв: учеб. метод. пособие / А.А. Козлова. – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2009. – 81 с.
11. ГОСТ 22733-2002. Грунты. Методы лабораторного определения максимальной плотности. – Введ. 01.07.2003. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003. – 19 с.
7. Grigorev I.V., Bazarov S.M., Kiselev D.S., et al. Matematicheskaya model obrazovaniya kolei v pochvogruntakh kolesnymi mashinami s uprugimi shinami [Mathematical Model of Tracking in Soils with Wheeled Vehicles with Springing Tyres.]. Nauchnoe obozrenie [Academic Review.]. 2012. No 5. P. 332-341.
8. Lesnye dorogi. Spravochnik, pod red. E.O. Salminena: Uchebnoe posobie [Forest Roads, reference guide under the editorship of E.O.Salminen: study guide]. Saint-Petersburg: Lan Publ., 2012. 496 p.
9. Rode A.A. Osnovy ucheniya o pochvennoy vlage [Fundamentals of Study about Soil Moisture]. Leningrad: Hydrometeorological Publishing House, 1965. 663 p.
10. Kozlova A.A. Uchebnaya praktika po fizike pochv: ucheb. – metod. posobie [Practical Training on Soil Physics: study guide]. Irkutsk: Publishing House of Irkutsk State University, 2009. 81 p.
11. GOST 22733-2002. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya maksimalnoy plotnosti. [All Union State Standard 22733-2002. Soils. Methods of Laboratory Assessment of Maximum Density]. Vved. 01.07.2003 [Put into Effect 01.07.2003]. Moscow: Gosstroy Rossii, GUP TSPP, 2003. 19 p.

Статья поступила в редакцию 19.03.13

ЛИСОВ Владимир Юрьевич – аспирант кафедры технологии лесозаготовительных производств, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова (Российская Федерация, Санкт-Петербург). Область научных интересов – теория взаимодействия лесных машин с почвогрунтами. Автор 15 публикаций.

E-mail: lisov-vladimir@yandex.ru

ЯЗОВ Владимир Николаевич – старший преподаватель кафедры сухопутного транспорта леса, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова (Российская Федерация, Санкт-Петербург). Область научных интересов – теория взаимодействия лесных машин с почвогрунтами. Автор более 20 публикаций.

E-mail: YazovVN@yandex.ru

LISOV Vladimir Yurievich – Postgraduate student at the Chair of Technologies of Timber Cutting Industries, Saint-Petersburg State Forestry Engineering University named after S.M. Kirov (Saint-Petersburg, Russian Federation). Research interests – theory of interaction of forest machines with soils. The author of 15 publications.

E-mail: lisov-vladimir@yandex.ru

YAZOV Vladimir Nikolayevich – Senior Lecturer at the Chair of Forest Surface Transport, Saint-Petersburg State Forestry Engineering University named after S.M. Kirov (Saint-Petersburg, Russian Federation). Research interests – theory of interaction of forest machines with soils. The author of more than 20 publications.

E-mail: YazovVN@yandex.ru

V. Yu. Lisov, V. N. Yazov

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF MAXIMUM DENSITY, OPTIMUM HUMIDITY AND SUBSIDENCE OF FOREST SOILS

Key words: *subsidence; optimum soil moisture; maximum density of the soil; sealing of soil.*

One of the main ways to increase efficiency of harvesting machines is to provide the tractors designed to run in specific operating conditions. The main factors affecting the performance in specific environmental and production conditions are manoeuvrability of tractor and work capacity of skid trails. In the course of development of harvest sites with low bearing capacity, necessity of stump-to-roadside equipment is rather urgent.

The aim of this study is to determine physical and mechanical properties of forest soil affecting rutting, and to get relationship for forest soil for repeated loads and soil moisture.

The study targeted to calculate maximum density, optimum moisture and subsidence of forest soil was conducted in November 2012 in laboratory conditions, as described in ISO 22733-2002.

10 soil samples from the cutting area were chosen for the tests. The samples were located in block 95 of the Morozov military forestry in Leningrad region.

To determine the maximum density and optimum moisture of forest soil, a compaction standard instrument was used.

Based on the experimental results:

1. Maximum density (ρ_{max}) and optimum moisture content (W_{opt}) of soil were defined. These values comprise: $\rho_{max} = 1,35 \text{ g/cm}^3$, $W_{opt} = 10 \%$.

2. The graphs of changes of subsidence depending on the period of ramming were made.

3. Reliability of experimental data was found with the use of Fisher's exact test and Cochran's test. Estimated value of the Fisher criterion for six runs is 0,076 – 0,124, of Cochran's test – 0,12–0,22. In calculating of these criteria the 0,05 significance level was used. Thus, the calculation results are reliable with 95 % confidence.

Based on the experimental data the following conclusions were made:

1. After thirty blows of rammer, soil ceases to thicken.

2. At an optimum moisture of soil, subsidence is maximal because the soil is exposed to the maximum compaction.

3. The experimental data are described by a logarithmic function. The magnitude-square is close to unity, indicating a good convergence of the logarithmic model with the obtained during the experimental research data.

4. The obtained dependences make it possible to predict the final density of soil with high probability, and consequently, to manage the process of forest soil compaction to achieve its optimal values in terms of further natural reforestation.

Scientific and practical significance of the results is to obtain additional evidence on the physical and mechanical properties of forest soils as bearing surfaces for forest machines.