

УДК 630*114.11:539.383

В.Я. Шапиро, И.В. Григорьев, А.И. Жукова

Григорьев Игорь Владиславович родился в 1973 г., окончил в 1996 г. С.-Петербургскую лесотехническую академию, доктор технических наук, профессор кафедры технологии лесозаготовительных производств СПбЛТА. Имеет 55 печатных трудов в области отраслевой технологии.



Жукова Антонина Ивановна родилась в 1975 г., окончила в 1998 г. С.-Петербургскую лесотехническую академию, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии лесозаготовительных производств СПбЛТА. Имеет около 15 печатных трудов по отраслевой технологии.



ОЦЕНКА ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЧВЫ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ УПЛОТНЕНИИ*

Разработана модель деформации почвы лесосеки под воздействием циклической нагрузки от лесозаготовительных машин. Приведены данные экспериментальных исследований в производственных условиях, подтверждающие адекватность разработанной модели.

Ключевые слова: плотность почвы, модель Фойгта, циклическое уплотнение.

Анализ особенностей деформирования различных почв и грунтов при вдавлении штампа [1] свидетельствует о достаточно сложных процессах, формирования уплотненного ядра даже в случае однократного воздействия (прохода) трелевочной системы. Процессы деформирования почвы при увеличении числа проходов изучены крайне слабо. Вместе с тем в работе [2] отмечается функциональная связь между показателями уплотнения почвы, ее физико-механическими свойствами и параметрами трелевочной системы, а также числом циклов N .

В общей постановке решение подобной задачи вызывает большие математические трудности в силу ее существенной нелинейности. В каждом последующем цикле начальные и граничные (краевые) условия при решении дифференциальных уравнений являются результатом реализации предыдущего цикла. Геомеханические характеристики почвы циклически изменяются, поэтому следует учитывать влияние его реологии и природы переупаковки.

* Часть материалов статьи получена при выполнении НИР по гранту Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-2068.2005.5.

Цель нашей работы заключается в создании комбинированной модели циклического уплотнения почвы, позволяющей учесть геомеханические факторы исходя из адекватных теоретических представлений механики грунтов, а технологические факторы – в виде корреляционных соотношений. В конечном счете задача состоит в конструировании работоспособных полуэмпирических соотношений с набором коэффициентов, определяемых только в процессе натурных экспериментов.

Рассмотрим схему нагружения почвы под давлением P от действия штампа (двигателя лесотранспортной системы (ЛТС) шириной b и весом Q при глубине деформирования H (рис. 1, а). Будем считать, что за время цикла $t = L/V$ (где L и V – длина опорной поверхности и скорость трелевочной системы) почва переместилась на глубину $h = h_1$ в положительном направлении оси y , и в этом слое под действием P возникают вертикальные напряжения σ . При повторном цикле нагружения почва перемещается на глубину

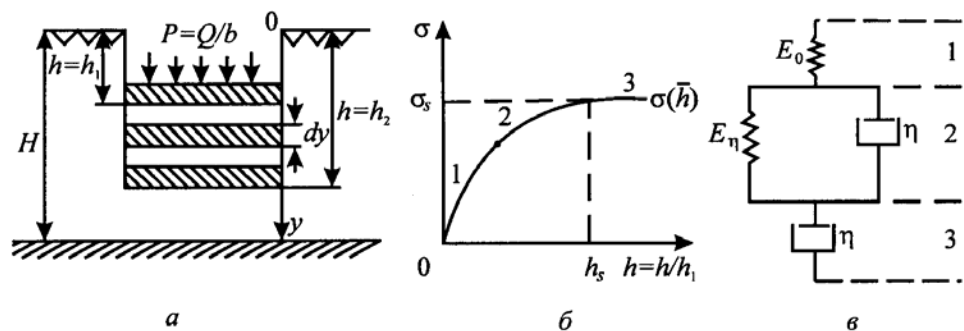


Рис. 1. К расчету нагружения почвы: а – схема нагружения; б – кривая деформации; в – четырехэлементная модель Фойгта

$h = h_2$ и т. д. Истинную деформацию ε , которую испытывает элементарный слой dy почвы на текущей глубине h , определим по формуле [5]:

$$\varepsilon = \int_{h_1}^h \frac{dy}{y} = \ln \frac{h}{h_1}. \quad (1)$$

С другой стороны, деформация и плотность почвы (ρ) связаны соотношением

$$\varepsilon = \frac{\rho - \rho_1}{\rho_1} = \bar{\rho} - 1, \quad (2)$$

где ρ – начальная плотность почвогрунта;

ρ_1 – плотность почвогрунта после уплотняющего воздействия.

Из (1) и (2) после преобразований в первом приближении получим

$$h = \ln h_1 + \bar{\rho}. \quad (3)$$

Рассмотрим общепринятую модель нагружения почвы [1]. На кривой $\sigma(\bar{h})$ выделяют три участка (рис. 1, б). Уплотненное ядро в основном формируется на стадии упругой деформации (участок 1). На участке 2 сила со-

противления уплотнению больше силы сопротивления боковому сдвигу, и уплотнение имеет асимптотически затухающий характер. Участок 3 характеризуется развитием деформаций сдвига. Начиная с глубины \bar{h}_s , грунт «течет» при постоянном $\sigma = \sigma_s$ – пределе его несущей способности. Такой схеме соответствует четырехэлементная модель Фойгта [3], представленная на рис. 1, в. Однако поскольку нас интересуют первые две фазы нагружения, два упругих элемента объединим в единый с двумя составляющими и перейдем к рассмотрению двухэлементной модели с общим модулем деформации $E = E_0 + E_\eta$. Тогда можно записать

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (4)$$

где η – вязкость грунта.

Соотношение (4) с учетом (2) и равенства производных $\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\bar{\rho}}{dt}$

примет вид

$$\sigma = E(\bar{\rho} - 1) + \eta \frac{d\bar{\rho}}{dt},$$

или

$$\eta \frac{d\bar{\rho}}{dt} + \bar{\rho}E = \sigma + E. \quad (5)$$

В многоэлементных моделях Фойгта давление приложено к каждому элементу, а истинная деформация равна сумме деформаций элементов [3]. Поэтому вначале, учитывая доминирующее уплотнение грунта на первом участке, примем в уравнении (5) $\sigma = E_0 \bar{h}$. Тогда получим дифференциальное уравнение уплотнения

$$\frac{d\bar{\rho}}{dt} + \bar{E}_\eta \bar{\rho} = \bar{E}_0 (\ln \bar{h} + 1) + \bar{E}_\eta, \quad (6)$$

где $\bar{E}_\eta = \frac{E_\eta}{\eta}$; $\bar{E}_0 = \frac{E_0}{\eta}$.

Решение (6) при начальных условиях: $t = 0 \Rightarrow \bar{\rho} = 1, \varepsilon = 0$ дает функцию уплотнения

$$\bar{\rho} = 1 + \frac{\bar{E}_0}{\bar{E}_\eta} \left(1 - e^{-\bar{E}_\eta t} \right) (\ln \bar{h} + 1). \quad (7)$$

Таким образом, при $t = 0 \Rightarrow \bar{h} = 1, \bar{\rho} = 1$.

В дальнейшем с увеличением t прирост относительного уплотнения определяется тремя множителями P_1, P_2 и P_3 , различными по сути. Рассмотрим их влияние подробнее.

Множитель $P_1 = \bar{E}_0 / \bar{E}_\eta$ отражает выбранную модель среды, т. е. перераспределение упругих элементов в общем модуле деформации. В теории линейной вязкоупругости [3] диапазон изменения P_1 достаточно широк, од-

нако в рамках нашей модели, когда податливость среды ($1/E$) на первом участке больше, чем на втором, примем $P_1 < 0,5$, примерно $0,40 \dots 0,45$.

Множитель $P_2 = 1 - e^{-E\eta t}$ характеризует чистую вязкость в процессе деформирования. Он точно совпадает с параметром вязкости μ [4, 7] и по закону затухающей экспоненты определяет прирост уплотнения. В работе [6] в опытах с плотными грунтами (лёсс, глина, суглинок и плотный песок) установлен диапазон изменения μ , равный $1000 \dots 1200 \text{ с}^{-1}$. Время релаксации напряжений $\tau = 1/\mu$ для плотных грунтов незначительно. В грунтах малой плотности, таких как рыхлые пахотные, параметр μ снижается на несколько порядков. Так, при модуле $E_\eta = (2 \dots 5) \cdot 10^5 \text{ Па}$ и вязкости $\eta = 0,35 \cdot 10^5 \text{ Па}\cdot\text{с}$ получаем параметр вязкости μ всего $5,7 \dots 14,3 \text{ с}^{-1}$, что, в свою очередь, существенно увеличивает время релаксации напряжений. Следует отметить, что степень влияния множителя P_2 нуждается в детальном моделировании как на образцах так и в натуральных экспериментах.

Третий множитель $P_3 = \ln \bar{h} + 1$ отражает влияние погружения штампа (движителя) на величину уплотнения и зависит как от параметров почвы, так и технологических характеристик машин и числа циклов проходов.

Получить сугубо теоретическую связь не представляется возможным, поэтому воспользуемся конструкцией регрессионного уравнения [2]

$$\bar{h} = 1 + Z(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n) \chi \lg N, \quad (8)$$

где Z – безразмерная многопараметрическая функция переменных ζ_i – физико-механических свойств грунта, параметров движителя, веса трелевочной системы и т. д.;

χ – коэффициент интенсивности накопления необратимых деформаций при циклическом нагружении.

При $N = 1$ получаем $\bar{h} = 1$, что позволяет перейти к оценке значений функций Z и χ .

Диапазон значений Z определяется такими параметрами, как начальная плотность ρ_1 , коэффициент Пуассона ν , модуль деформации E и глубина H ее распространения, а также коэффициент ω формы опорной поверхности ЛТС, ее ширина b и максимальное давление на грунт [2]. Произведенные расчеты позволили установить реальный диапазон изменения $Z = 0,7 \dots 1,2$.

Функцию χ при отсутствии экспериментальных данных рекомендуют принимать постоянной, равной 1 [2]. Однако переупаковка почвы и накопленные деформации требуют хотя бы в первом приближении учесть влияние цикличности на снижение величины χ . Предположим линейный характер данного влияния в виде уравнения регрессии

$$\chi = 1,02 - 0,02N. \quad (9)$$

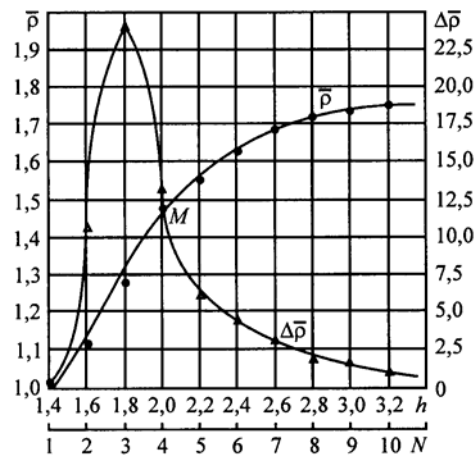
При $N = 1$ $\chi = 1$, и можно отметить особое значение экспериментального установления зависимостей типа (9) для наиболее характерных видов грунтов и ЛТС.

На рис. 2 приведены результаты расчетов по формулам (7)–(9) с оценкой влияния цикличности на процесс уплотнения почвы ($Z = 1$). Расче-

ты сделаны как для относительного уплотнения $\bar{\rho}$ (левая шкала), так и его приращения $\Delta\bar{\rho}$, % (правая шкала).

Важными результатами являются: наличие экстремума функции $\Delta\bar{\rho}(N)$ и асимптотический характер зависимости $\bar{\rho}(N)$, начало проявления которого можно определить, спрямляя кривую с помощью логарифмических координат (рис. 3). Сопряжению ветвей в точке M на рис. 2 соответствует точка M' пересечения прямых на рис. 3. Число циклов при этом $N = 4$. Именно при таком N наблюдается пересечение кривых на рис. 2, что позволяет сделать вывод о том, что основной процесс уплотнения почвы был реализован на первых четырех циклах, а дальнейшее уплотнение носит асимптотический (несущественный) характер.

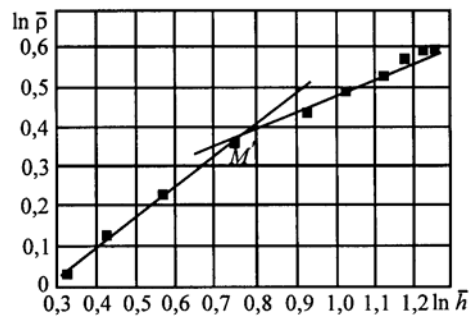
Рис. 2. Зависимость уплотнения почвы от числа циклов нагружения



Для получения фактических данных об уплотнении почвы под действием движителей лесозаготовительной техники летом и осенью 2003 и 2004 гг. проведены экспериментальные исследования в условиях Ефимовского лесхоза Ленинградской области. Для изучения были отобраны три лесосеки. Перед первым проходом трактора трассы пасечных волоков разбивали на пикеты через 1 м. На каждом из них брали пробы лесной почвы естественной плотности. Для этого использовали оригинальный прибор, который представляет собой усовершенствованную модель ручного прибора, предложенного Г.М. Анисимовым и Б.М. Большаковым [2]. Благодаря вставке кварцевых стекол с нониусом в режущий стакан можно не только получать керны почвы для определения ее плотности, но и оперативно оценивать степень перемешивания почвенных горизонтов [7]. Затем, после каждого прохода трелевочного трактора, на пикетах брали пробы почвы в следе движителя, несколько смещая место забора, чтобы исключить влияние пробы, взятой перед этой. Пробы брали на всех пикетах, где проходил трактор с пачкой, до окончания разработки пасеки.

Каждый образец (кern) помещали в герметично закрывающийся пакет и снабжали биркой с указанием номеров пикета и прохода, в

Рис. 3. Определение переходного состояния



4

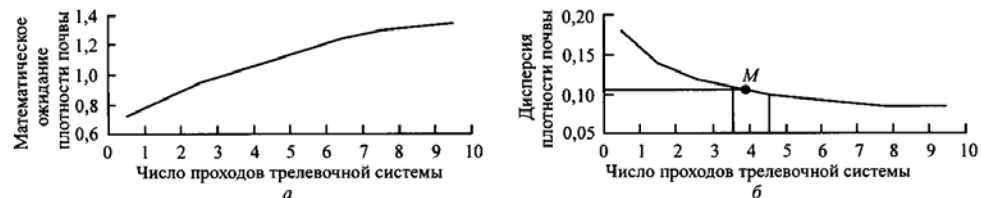


Рис. 4. Графики изменения статистик закона распределения плотности почвы от числа двойных проходов трелевочной системы: *a* – изменение математического ожидания, т/м³; *б* – изменение дисперсии

дальнейшем взвешивали в лабораторных условиях, что позволяло свести к минимуму погрешности, неизбежно возникающие в полевых условиях.

В результате обработки экспериментальных данных получены основные статистики законов распределения плотности почвы, ее естественного сложения и этих же показателей после каждого рейса трелевочной системы. Анализ показал, что за четыре двойных прохода трелевочной системы математическое ожидание плотности почвы возросло от 0,72 до 1,09 т/м³, что привело к достижению относительной плотности $\bar{\rho} = 1,55 \dots 1,60$. Сравнение экспериментальных и приведенных на рис. 2 данных свидетельствует о достаточной точности теоретических расчетов.

Изменение статистик плотности почвы от числа двойных проходов трелевочной системы представлено графически на рис. 4. Экспериментальная кривая изменения плотности почвогрунта близка к логарифмической (рис. 4, *a*). Это позволяет утверждать, что разработанные модели оценки процессов деформирования при циклическом уплотнении почвы не противоречат данным производственного эксперимента. Отмечена еще одна важная особенность деформирования лесных почвогрунтов – эффект их упаковки и формирования более жесткой структуры почвы (рис. 4, *б*). При увеличении числа двойных проходов трелевочной системы, наряду с ростом математического ожидания плотности почвогрунта, постепенно снижается дисперсия плотности, и, начиная с четвертого-пятого рейсов, формы кривых

распределения мало отличаются, что свидетельствует о переходе почвогрунта из состояния аморфной и слабосвязанной структуры к более определенной, с прогнозируемыми физико-механическими характеристиками. Эти выводы хорошо иллюстрируются данными рис. 4, б, на кривой наглядно виден переход от ниспадающей ветви к асимптотической (точка М). На стадии 4-5 рейсов дисперсия плотности почвогрунта снизилась почти в 2 раза, тогда как за последующие 4-5 рейсов всего на 25 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агейкин, А.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители [Текст] / А.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1972. – 183 с.
2. Анисимов, Г.М. Основы минимизации уплотнения почвы трелевочными системами [Текст] / Г.М. Анисимов, Б.М. Большаков. – СПб.: ЛТА, 1998. – 106 с.
3. Бленд, Д. Теория линейной вязко-упругости [Текст] / Д. Бленд. – М.: Мир, 1965. – 199 с.
4. Булычев, Н.С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах [Текст] / Н.С. Булычев. – М.: Недра, 1989. – 270 с.
5. Вялов, С.С. Реологические основы механики грунтов [Текст] / С.С. Вялов. – М.: Высш. шк., 1978. – 447 с.
6. Ляхов, Г.М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах [Текст] / Г.М. Ляхов. – М.: Недра, 1974. – 192 с.
7. Устройство для взятия проб почвы [Текст]: пат. на полезную модель № 32277 / Григорьев И.В., Жукова А.И., Григорьева О.И. – Оpubл. 10.09.03, Бюл. № 25.

С.-Петербургская государственная
лесотехническая академия

Поступила 12.12.05

V.Ya. Shapiro, I.V. Grigorjev, A.I. Zhukova

Saint-Petersburg Forest-Technical Academy

Assessment of Soil Deformation Processes under Cyclic Compaction

A model for soil deformation of the felling site affected by the cyclic load of logging machines is developed. The data of experimental research in the working environment are provided confirming the adequacy of the developed model.

Keywords: soil density, Voigt model, cyclic compaction.
