

УДК 630\*3.001

**В.Н. Коршун**

Коршун Виктор Николаевич родился в 1956 г., окончил в 1980 г. Сибирский технологический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования лесного оборудования Сибирского государственного технологического университета. Имеет более 90 печатных работ в области проектирования технологических машин, САПР.



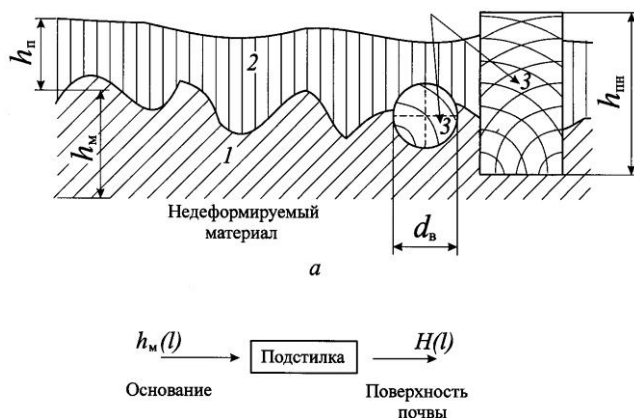
## ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ЛЕСНОЙ ПОЧВЫ

Предложена многокомпонентная модель лесной почвы как механического предмета труда и опорной поверхности движения лесных машин.

*Ключевые слова:* почва лесная, механические свойства, многокомпонентное моделирование.

Лесные почвы обладают наименее поврежденной структурой и по механическим свойствам существенно отличаются от сельскохозяйственных. При конструировании лесных машинно-тракторных агрегатов необходимо знать динамические входные воздействия от почвы на рабочие органы и движители машин.

Лесная почва как механический предмет труда и среда движения машин обладает вертикальной и горизонтальной структурой. Смоделируем вертикальную структуру лесной почвы в виде двухкомпонентной среды с единичными включениями (рис.1, а). Свойства компонент существенно различаются. Минеральное основание лесной почвы 1 является случайной поверхностью, простирается до недеформированного горизонта и оценивается



б

Рис. 1. Вертикальная структура модели лесной почвы (а) и схема динамической системы (б)

толщиной  $h_m$ . Лесная подстилка 2 толщиной  $h_n$ , состоящая из живого напочвенного покрова, опада и нижележащего слоя перегнивших растительных остатков, находящихся в различной стадии разложения, формируется также под влиянием целого ряда случайных факторов. Единичные включения 3 представлены совокупностью корней диаметром  $d_v$  и пней высотой  $h_{пн}$ . Очевидно, что поверхность лесной почвы носит случайный характер. В зимнее время к двум компонентам добавляется третья – снег. При моделировании взаимодействия опорных элементов лесных машин с почвой зимой следует использовать трехкомпонентную модель. Движение транспортных машин по заснеженной местности смоделировано в работе [5].

Взаимосвязь двух случайных функций – высоты микронеровностей минерального основания  $h_m(l)$  и толщины подстилки  $h_n(l)$  – определяет высоту микронеровностей лесной почвы  $H(l) = h_m(l) + h_n(l)$  (где  $l$  – длина пути). Функция  $H(l)$  также является случайной. Представим поверхность лесной почвы как выход динамической системы, входом которой является минеральное основание (рис. 1, б). Свойства динамической системы можно оценить по ее реакции на динамическое воздействие. Чаще всего свойства динамических систем оценивают по их реакции на входе в виде дельта-функции (функция Дирака):

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & t \neq 0 \\ \infty, & t = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $t$  – время.

Пусть  $\Delta l$  – задержка системы по  $l$  на реакцию системы на входе в виде дельта-функции, тогда для устойчивой системы  $v(\Delta l, l) = v(\Delta l)$ , где  $v(\Delta l)$  – весовая функция системы при всех  $l$ . Параметры системы примем постоянными, тогда свойства системы, преобразующей вход в выход, не зависят от характера входного воздействия. Таким образом, можно записать

$$H(l) = \int_0^{\infty} v(\Delta l) h_m(l - \Delta l) dl. \quad (2)$$

Выражение (2) справедливо при всех зависимостях  $h_m(l)$ , которые в настоящее время достаточно исследованы при описании опорных сред движения сельскохозяйственных и лесных машин. Очевидно, что при антропогенном и техногенном воздействии на почву данные зависимости претерпевают изменения. По утверждению П.М. Мазуркина, статистические законы нормального распределения для почв в данном случае изменяются [10].

Поскольку параметры динамической системы (2) постоянны, линейны и устойчивы, то поданная на вход системы стационарная функция даст на выходе также стационарную функцию. Установлено, что случайная функция микронеровностей минерального основания лесных почв, не подвергавшихся техногенному воздействию, является стационарной с нормальным распределением [9], поэтому поверхность лесной почвы будет такой же функцией.

Согласно теории вероятностей корреляционная функция поверхности лесной почвы связана с корреляционными функциями минерального основания зависимостью

$$R_{HH}(l) = R_{hMhM}(l) + R_{hPhP}(l) - R_{hMhP}(l) - R_{hPhM}(l), \quad (3)$$

где  $R_{hMhP}(l)$ ,  $R_{hPhM}(l)$  – взаимные корреляционные функции основания и высоты лесной подстилки.

Параметры распределения микронеровностей лесных почв как опорных сред движения машин приведены в работах [1, 3, 6]. В них микрорельеф лесной почвы определяли с целью получить статистические параметры опорной поверхности как входного воздействия на движители лесных машин. Исследования касались главным образом волоков как трасс движения лесозаготовительных машин. Однако лесохозяйственные машины могут функционировать на нераскорчеванных и раскорчеванных вырубках, под пологом леса, на расчищенных площадях, старопахотных, сильно задернелых почвах, торфяниках и болотах, пригородных почвах и территориях, подвергшихся интенсивному техногенному и антропогенному воздействию. Характер микронеровностей на указанных площадях различен. Входные параметры на рабочие органы почвообрабатывающих машин как динамических систем определены только для сельскохозяйственных площадей.

Для нахождения статистических характеристик минерального основания лесной почвы  $h_m(l)$  в 2000–2003 гг. проведено ее экспериментальное исследование как предмета труда и среды движения лесохозяйственных агрегатов. Профили трасс замеряли перед проходом лесохозяйственного агрегата и после обработки почвы. Параметры измеряли с помощью измерительного комплекса, выполненного на базе персонального компьютера с аналогово-цифровым преобразователем. Шаг квантования принимали равным 1 м. Данные вводили в компьютерную систему в виде структурированного файла данных.

На рис. 2 показаны микропрофили раскорчеванной трехлетней вырубki с засыпанными ямами от пней (категория грунта – 4 удара плотномер ДорНИИ, влажность 24 %, сильное задернение).

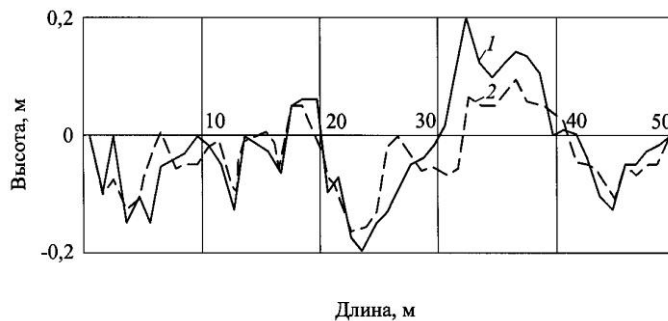


Рис. 2. Микропрофили минерального основания лесной почвы: 1 – перед проходом машинно-тракторного агрегата; 2 – после прохода фрезы

Статистическая обработка позволила получить корреляционные функции для оценки входного воздействия на формирование поверхности лесной почвы. Анализ опубликованных исследований позволяет на основе статистических моделей прогнозировать микропрофиль лесной почвы как механический предмет труда и среду движения машин. Для определения вероятностных характеристик поверхности лесной почвы как механического предмета труда необходимо определить параметры передаточных функций лесной подстилки. Если рассматривать лесную почву в системе машина – местность, то к основным параметрам подстилки следует относить: зависимость ее деформации от нормальной нагрузки от рабочих органов машин, сопротивление сдвигу, плотность, жесткость и упругость. Рабочие органы машин взаимодействуют со всеми компонентами динамической системы лесной почвы, механические свойства которых различаются. Воздействия минерального основания и подстилки на рабочие органы и опорные элементы машин носят стационарный характер, а единичные включения (корни, погребенная древесина, камни, пни) создают дискретные импульсные нагрузки. Импульсные воздействия от единичных включений (корни) аппроксимируются при компьютерном моделировании функцией Дирака, а препятствия прямоугольной формы (пни) – функцией Хевисайда.

Динамическую систему (рис. 2) моделировали на основе метода конечных элементов (МКЭ) с помощью программных средств MATLAB-6.1 (MathWorks, Inc.), приложение SIMULINK. Свойства компонента 1 (см. рис. 1, а), по механическим характеристикам аналогичного грунта, рассматривали в виде двухфазной среды. Одну фазу моделировали элементами с упругими линейными характеристиками (жесткий скелет грунта), другую – в виде несжимаемой жидкости.

Горизонтальную структуру лесной почвы моделировали в графическом редакторе AutoCAD, представленном нами в работе [8].

Механические свойства лесной подстилки, являющейся промежуточной компонентой лесной почвы, изучены слабо. Для расчета параметров подстилки может быть предложена следующая методика:

1) входными величинами являются микропрофиль минерального основания и данные о типах насаждений, время и место движения машины по лесной почве, среднегодовое количество осадков;

2) по входным данным прогнозируют среднюю толщину (математическое ожидание) подстилки  $h_n$  (см. рис. 1);

3) моделируют физико-механические параметры подстилки (при сдвиге и смятии) в зависимости от плотности при взаимодействии с опорными элементами машин;

4) на основании микропрофиля и свойств подстилки моделируют ансамбль реализаций (геометрические и физико-механические параметры) поверхности лесной почвы как среды движения машин;

5) в соответствии с полученными данными моделируют взаимодействие рабочих органов и опорных элементов с лесной почвой и определяют реализацию входного воздействия на машину.

Толщина подстилки существенно зависит от времени года, поэтому ее параметры прогнозируют на конкретную дату и место движения машины. Обработка данных А.С. Аткина, Л.И. Аткиной, Н.И. Германовой, Е.Д. Коробова, Н.Т. Спициной и других авторов [2, 4, 11] позволила выявить значения статистических характеристик толщины лесной подстилки как случайного процесса. Установлено, что на формирование поверхности лесной почвы существенно влияет частота колебаний минерального основания и толщина подстилки, причем с ростом средней толщины подстилки  $h_n$  уменьшается высота преобладающих неровностей почвы. Статистическая обработка позволила выявить модель формирования неровностей лесной почвы, рассчитать значения высот и длин неровностей поверхности лесной почвы. Было установлено колебание толщины подстилки относительно среднего значения. Применяли гармоническую корреляционную модель  $h_n = h_n(l)$  вида

$$h_n = K_0 \sin(l + K_1) + K_2, \quad (4)$$

где  $h_n$  – текущее значение толщины подстилки;  
 $l$  – длина пути реализации процесса;

$K_0, K_1, K_2$  – коэффициенты в корреляционных моделях.

Сравнение данных, прогнозируемых по корреляционным моделям (4) и полученных А.С. Аткиным [2], показало их удовлетворительную сходимость, относительная среднеквадратичная ошибка не превысила 12 %. В результате обработки данных в системе MathCAD определен спектральный состав неровностей поверхности почвы и толщины подстилки. Все это дало возможность составить математические зависимости для компьютерного моделирования микропрофиля лесной почвы.

При взаимодействии с рабочими органами и движителями лесных машин подстилка деформируется и свойства ее изменяются. Для описания поведения подстилки при сжатии применяли модель упруго-пластической среды Друккера – Прагера. Ее использовали для определения деформации почвы [12]. Расчеты, проведенные по этой модели в системе MathCAD, показали, что на начальных этапах нагружения лесной почвы ходовыми системами болотных тракторов, удельное давление на почву которых не превышает 30 кПа (ДТ-75Б), при толщине подстилки 15 см, деформации на почву не передаются и гусеницы тракторов не погружаются в ее минеральную часть (рис. 3).

При взаимодействии рабочих органов машин с лесной почвой подстилка уплотняется, для определения плотности может быть использована формула

$$\rho_i(h_i) = c_0 + c_1(\rho_{i-1})\delta^{-1} + c_2(\rho_{i-1})^2\delta^{-2} + c_3(\rho_{i-1})^3\delta^{-3}, \quad (5)$$

где  $\rho_{i-1}$  – плотность лесной подстилки до  $i$ -го этапа деформирования, на первом шаге расчетов принимается плотность недеформированной подстилки;

$\delta$  – относительная деформация подстилки, определяемая по модели Друккера – Прагера),  $\delta = h_{ni} / h_n$ ;

$h_n$  – толщина подстилки до деформирования;

$c_j$  – коэффициенты аппроксимации.

Из рис. 3 видно, что на деформирование лесной почвы существенно влияет плотность подстилки. Многие исследователи утверждают, что распределение плотности подчиняется нормальному закону. Однако плотность опада и подстилки зависит от многих факторов. Она не является стационарной функцией и имеет тенденцию к росту со временем. Случайная функция  $\rho(t)$  плотности может быть представлена как сумма случайной стационарной функции  $\rho$ , не зависящей от времени, и математического ожидания  $M_\rho(t)$ , изменяющегося по временам года:  $\rho(t) = \rho + M_\rho(t)$ . Для березняков уплотнение подстилки зависит от мощности опада и времени, прошедшего с момента максимального листопада. Проведенные эксперименты [12] позволяют составить следующее уравнение:

$$M_\rho(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3, \quad (6)$$

где  $t$  – порядковый номер дня, отсчитываемый от начала листопада;

$a_i$  – коэффициенты аппроксимации.

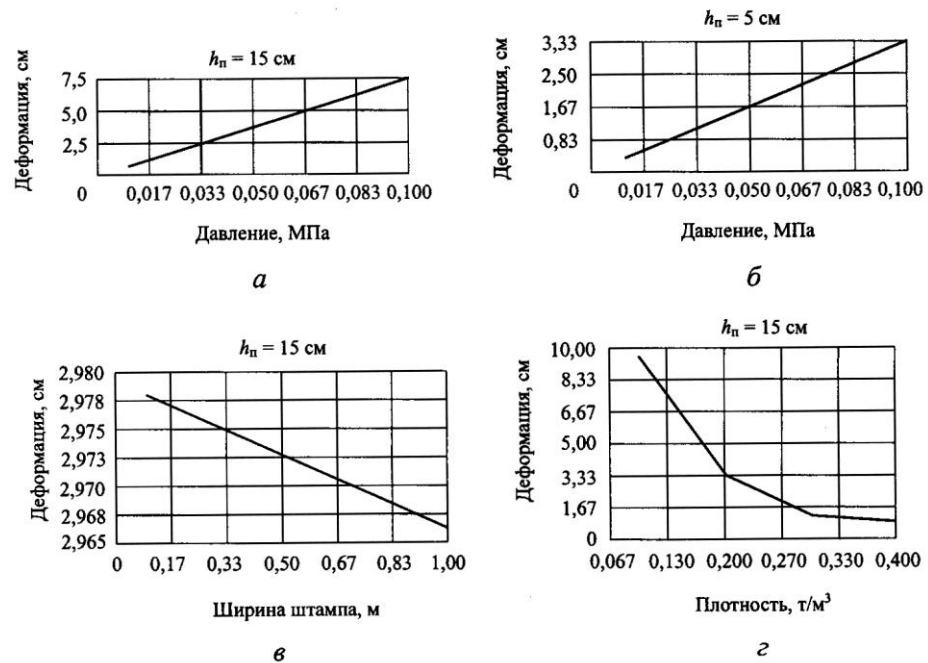


Рис. 3. Графики зависимости деформации подстилки: а, б – от давления; в – от ширины штампа, з – от плотности почвы

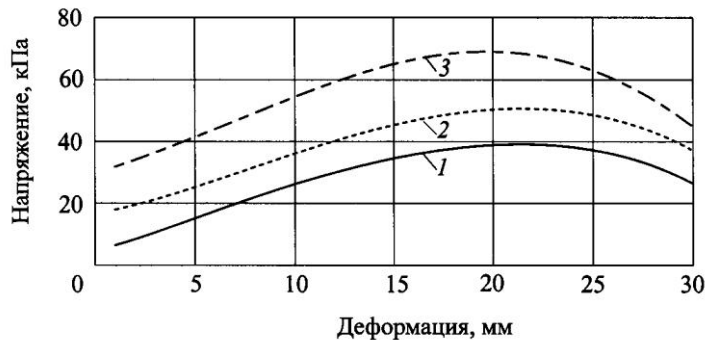


Рис. 4. Графики сопротивления подстилки при сдвиге:  
 1 – предельное сопротивление 4 кПа; 2 – 12 кПа;  
 3 – 30 кПа

Влажность подстилки моделируют как нормально распределенную величину с математическим ожиданием и средним квадратичным отклонением для конкретного района производства лесохозяйственных работ. Анализ и обработка литературных данных позволяют прогнозировать плотность подстилки в зависимости от климатических районов и типа древостоя.

В процессе взаимодействия рабочих органов машин с лесной почвой изменяется плотность подстилки не только в вертикальном, но и в горизонтальном направлении. Аналогичное явление имеет место при исследовании работы движителей лесных машин. При сдвиге грунта его деформирование часто описывается степенным уравнением

$$\tau(s) = \tau_0 + (\tau_n - \tau_0)(1 - e^{-aS_0} + bS_0^c e^{-dS_0}), \quad (7)$$

где  $\tau(s)$  – текущее значение касательных напряжений в материале, Па;

$\tau_0$  – начальное значение удельного сопротивления сдвигу;

$\tau_n$  – предельное сопротивление сдвигу;

$S_0$  – относительный сдвиг,  $S_0 = S / S_n$ ;

$S$  – абсолютный сдвиг, м;

$S_n$  – сдвиг почвы при предельном сопротивлении сдвигу;

$a, b, c$  – коэффициенты пропорциональности, рассчитываемые в результате обработки экспериментальных данных.

На рис. 4 приведены результаты исследований сопротивления лесной подстилки при сдвиге, выполненные на модели (7).

Проведенные расчеты показывают, что плотные почвы (суглинок, глина) с ненарушенной структурой при возрастании сдвига вначале уплотняются, и касательная сила увеличивается до максимума. В этот момент достигают максимума силы внутреннего сцепления. Затем происходит срыв почвы при преодолении сил внутреннего сцепления, и касательная сила снижается до значений, обусловленных силами внутреннего трения. У рыхлых, несвязных и пластичных грунтов (сухой песок, почва вспаханная) внутреннего сцепления почвы нет, поэтому с ростом деформации сдвига

касательная сила линейно возрастает до значений, обусловленных внутренним трением. Лесная подстилка по характеру аналогична структурным почвам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров, В.А. Моделирование технологических процессов лесных машин [Текст] / В.А. Александров. – М.: Экология, 1995. – 257 с.
2. Аткина, Л.И. Особенности накопления подстилок в лесных сообществах [Текст] / Л.И. Аткина, А.С. Аткин // Почвоведение. – 2000. – № 8. – С. 1004–1008.
3. Варава, В.И. Расчет и конструирование упругих систем транспортных машин [Текст] / В.И. Варава. – М.: Лесн. пром-сть, 1975. – 144 с.
4. Германова, Н.И. Разложение опада как показатель интенсивности круговорота элементов в лесных насаждениях Южной Карелии [Текст] / Н.И. Германова // Лесоведение. – 2000. – № 3. – С. 30–35.
5. Донато, И.О. Роторно-винтовые машины. Основы теории движения [Текст] / И.О. Донато [и др.] – Н. Новгород: НПК, 2000. – 451 с.
6. Гостев, Б.П. Основы динамики лесовозного подвижного состава [Текст] / Б.П. Гостев, В.И. Мельников. – М.: Лесн. пром-сть, 1967. – 220 с.
7. Коршун, В.Н. Основные физико-механические и технологические свойства опавших листьев [Текст] / В.Н. Коршун // Машины и орудия для механизации лесозаготовок и лесного хозяйства: межвуз. сб. науч. тр. – Л.: ЛТА, 1984. – С. 50–52.
8. Коршун, В.Н. Моделирование движения агрегата по вырубке [Текст] / В.Н. Коршун // Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров и систем управления лесного комплекса: межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: ВГЛТА, 2002. – Вып. 7, ч. 1. – С. 61–64.
9. Мазуркин, П.М. Биотехническое проектирование [Текст] / П.М. Мазуркин. – Йошкар-Ола: МарПИ, 1994. – 348 с.
10. Сабанцев, Ю.Н. Статистическое моделирование лесоэкономических данных [Текст] / Ю.Н. Сабанцев, П.М. Мазуркин. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2001. – 390 с.
11. Ушакова, Г.И. Влияние экологических условий на скорость и характер разложения лесной подстилки [Текст] / Г.И. Ушакова // Почвоведение. – 2000. – № 8. – С. 1009–1015.
12. Vario, J. Simulating soil deformation using a critical-state model [Text] / J. Vario // Europ. J. Soil. Sc. – 1997. – Vol. 48, N. 1. – P. 59–70.

Сибирский государственный  
технологический университет

Поступила 26.12.03

*V.N. Korshun*

#### **Principles of Forest Soil Mechanics**

Multicomponent model of forest soil as mechanical labor object and bearing surface of forest machines movement is offered.

---