

Моделирование лесной поверхности

В. Н. Коршун¹

Сибирский государственный технологический университет

АННОТАЦИЯ

Приведены методика и результаты исследований механических свойств лесной поверхности как многокомпонентной среды с единичными включениями, являющейся входным воздействием на рабочие органы и опорные элементы лесных машин.

Ключевые слова: лесная поверхность, многокомпонентная среда, подстилка, моделирование.

SUMMARY

The methodic and results of research is represented the mechanical properties of forest soil safes. The multi-solid-state model and single addition showed back reaction to power blades forest and agricultural machines.

Keywords: forest soil safes, litter, multi-solid-state simulating.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Лесные почвы обладают наименее поврежденной структурой и существенно отличаются по своим механическим свойствам от сельскохозяйственных почв. Для конструирования лесных машинотракторных агрегатов необходимо знать динамические входные воздействия от опорной поверхности на рабочие органы и двигатели машин. Эти нагрузки носят случайный характер. Лесные машины оказывают техногенное воздействие на лесную поверхность, создают в ней остаточные деформации, уплотняют и разрушают ее структуру, повреждают напочвенный покров. Исследовать механические свойства лесной поверхности можно на основе компьютерного и теоретико-экспериментального моделирования.

СТРУКТУРА ЛЕСНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Лесная поверхность как многокомпонентная среда, предмет труда и опора для движения мобильных машин обладает вертикальной и горизонтальной структурой.

ВЕРТИКАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ЛЕСНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Смоделируем вертикальную структуру лесной почвы как механического предмета труда и опорной поверхности движения машин в виде двухкомпонентной среды с единичными включениями (рис.1,а). Свойства компонент существенно разнятся. Минеральное основание 1 является случайной поверхностью,

простирается до недеформированного горизонта и оценивается толщиной h_m , а формирование лесной подстилки 2, состоящей из живого напочвенного покрова, опада и нижележащего слоя перегнивших растительных остатков, находящихся в различной стадии разложения, толщиной h_n также происходит под влиянием целого ряда случайных факторов. Единичные включения 3 представлены совокупностью корней диаметром d_n , и пней высотой h_{nn} . Очевидно, что лесная поверхность носит случайный характер. В зимнее время к двум компонентам добавляется третья компонента – снег. При моделировании взаимодействия опорных элементов лесных машин с опорной поверхностью зимой следует использовать трехкомпонентную модель. Движение транспортных машин по заснеженной местности смоделировано в работе [1]. Взаимосвязь двух случайных функций: высоты микронеровностей минерального основания $h_m(l)$ и толщины подстилки $h_n(l)$ определяет высоту микронеровностей опорной поверхности $H(l) = h_m(l) + h_n(l)$ (где l – длина пути). Функция $H(l)$ также является случайной. Представим опорную поверхность 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.

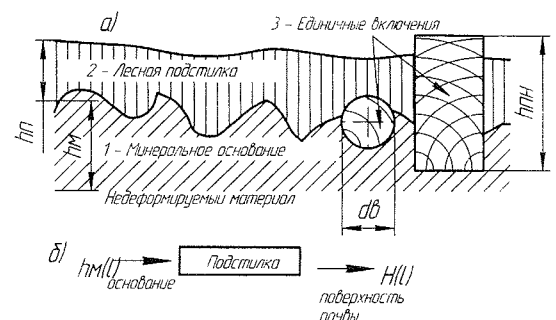


Рис. 1. Вертикальная структура модели опорной поверхности (а) и схема динамической системы (б)

Пусть Δl – 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]. Если примем параметры системы постоянными, тогда свойства системы, преобразующей вход в выход, не зависят от характера входного воздействия. Таким образом, можно записать:

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

Выражение (2) справедливо при всех зависимостях $h_m(l)$. Зависимости $h_m(l)$ в настоящее время достаточно исследованы как зависимости для описания опор-

¹ Автор – доцент кафедры проектирования лесного оборудования

ных сред движения лесных машин по волокам и вырубкам. Очевидно, что при антропогенном и техногенном воздействии на почву данные зависимости претерпевают изменения. По утверждению П. М. Мазуркина, статистические законы нормального распределения для опорных поверхностей в данном случае изменяются [2].

Поскольку параметры динамической системы (2) постоянны, линейны и устойчивы, то поданная на вход системы стационарная функция даст на выходе стационарную функцию. Установлено, что случайная функция микронеровностей минерального основания лесных почв, не подвергавшихся техногенному воздействию, является стационарной функцией с нормальным распределением [3], поэтому недеформированная лесная поверхность также будет стационарной функцией с нормальным распределением.

Согласно теории вероятностей корреляционная функция опорной поверхности связана с корреляционными функциями минерального основания зависимостью:

$$R_{hh}(l) = R_{h_{\text{мин}}h_{\text{мин}}}(l) + R_{h_{\text{тол}}h_{\text{тол}}}(l) - R_{h_{\text{тол}}h_{\text{мин}}}(l) - R_{h_{\text{мин}}h_{\text{тол}}}(l), \quad (3)$$

где $R_{h_{\text{тол}}h_{\text{тол}}}(l)$, $R_{h_{\text{тол}}h_{\text{мин}}}(l)$ – взаимные корреляционные функции основания и толщины лесной подстилки.

Параметры распределения микронеровностей лесных почв как опорных сред движения машин приведены в работах [4, 5, 6]. В опубликованных работах микро-рельеф лесной почвы определялся с целью получения статистических параметров 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, на старопахотных почвах, на сильно задернелых почвах, на торфяниках и болотах, на пригородных почвах и территориях, подвергнувшихся интенсивному техногенному и антропогенному воздействию. Характер микронеровностей на указанных площадях будет различен. Входные параметры на рабочие органы почвообрабатывающих машин как динамических систем определены только для сельскохозяйственных площадей.

Для нахождения статистических характеристик опорной поверхности $h_m(l)$ в 2000 – 2003 годах было проведено экспериментальное исследование лесной поверхности как предмета труда и среды движения лесохозяйственных агрегатов. Профили трасс замерялись перед проходом лесохозяйственного агрегата и после выполнения операции обработки почвы. Параметры измерялись разработанным измерительным комплексом, выполненным на базе персонального компьютера с аналогово-цифровым преобразователем. Шаг квантования принимался равным одному метру. Данные измерений вводились в компьютер-

ную систему в виде структурированного файла данных. На рисунке 2 показаны микропрофили раскорчеванной трехлетней вырубке с засыпанными ямами от пней (категория грунта – 4 удара плотномера ДорНИИ, влажность 24 %, сильное задернение).

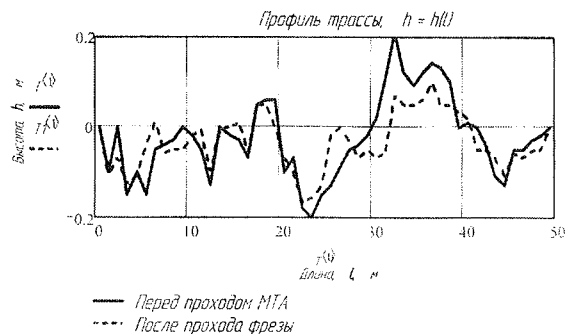


Рис. 2. Микропрофили минерального основания вырубке

Проведенная статистическая обработка позволила получить корреляционные функции для оценки входного воздействия на формирование опорной поверхности. Анализ опубликованных исследований позволяет на основе статистических моделей прогнозировать микропрофиль лесной почвы как механического предмета труда и среды движения машин. Для определения вероятностных характеристик лесной опорной поверхности как механического предмета труда необходимо определить параметры передаточных функций лесной подстилки. Если рассматривать опорную поверхность в системе «машина–местность», то к основным параметрам подстилки следует относить: зависимость деформации подстилки от нормальной нагрузки от рабочих органов и движителей машин; сопротивление подстилки сдвигу; плотность; жесткость и упругость. Даже при максимальной толщине лесной подстилки (32 см), которая наблюдается в лесах Карелии [8], рабочие органы машин взаимодействуют со всеми компонентами динамической системы опорной поверхности, механические свойства которых различаются. Воздействие 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.

Моделирование динамической системы (на основе метода конечных элементов (МКЭ) выполнялось в программном средстве MATLAB-6.1 (MathWorks, Inc.) (приложение SIMULINK). Свойства компоненты 1 (см. рис. 1), по своим механическим характеристикам аналогичной грунтам, моделировались двухфазной средой. Одна фаза представлялась элементами с

упругими линейными характеристиками и образывала жесткий скелет грунта, а другая фаза моделировалась в виде несжимаемой жидкости.

ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ СТРУКТУРА

Горизонтальная структура лесной почвы применяется главным образом для моделирования движения агрегатов и оптимизации параметров технологического процесса.

Горизонтальная структура лесных почв моделируется на основе статистических законов распределения. В работе [7] приведен способ моделирования горизонтальной структуры вырубок, учитывающий распределение пней по вырубке, их геометрические размеры и параметры корневых систем и выполненный в виде программы на языке AutoLisp, реализуемой в графическом редакторе AutoCAD (AutoDesk, Inc.). Программа позволяет оптимизировать по критерию длины пути стратегию движения агрегатов по вырубке внутри заданных технологических коридоров. Для выбора системы лесохозяйственных машин и проектирования лесовосстановительных работ необходимо определять параметры движения агрегатов по нераскорчеванной вырубке (траектории, расстояния, скорости), определяющие производительность. Трудность решения задачи в детерминированной постановке обуславливается изменчивостью природно-производственных условий и ограниченностью (недоступностью) геоинформационных данных по вырубкам. Указанные трудности могут быть преодолены путем имитационного моделирования на ЭВМ движения агрегата по вырубке. Поставленная задача может решаться двумя путями: 1. В качестве топосновы для моделирования используется геоинформационная модель лесной поверхности на вырубке, полученная с использованием материалов по выделу лесосеки либо на основе снимков и содержащая информацию о распределении пней по вырубке, диаметрах пней, бывшем породном составе древостоя, рельефе, почвенных, растительных и климатических условиях. Топооснова переводится в векторный формат способами, изложенными ранее [7]; 2. В качестве основы используется имитационная модель вырубки, полученная расчетным путем на основе данных лесохозяйственных устройств либо на основе законов распределения объектов по вырубке. Модель не хранится в памяти ЭВМ, а создается в графическом редакторе при решении конкретной оптимизационной задачи.

Компьютерное моделирование горизонтальной структуры. Моделирование движения агрегатов по нераскорчеванной вырубке реализуется в среде программного пакета AutoCAD Map (AutoDesk, Inc.) с использованием языка программирования AutoLISP. Доступ к имеющимся базам данных, представленных в приложениях Word, Excel, Access (Microsoft, Inc.), осуществляется на языке Visual Basic for Application (VBA).

Структура модели реализована по модульному принципу [9]. Входные элементы формируются в инфор-

мационном блоке и представлены модулями: *П* – программа лесовосстановительных мероприятий, размеры участка *L*, ширина технологического коридора *h*, расстояние между осями коридоров *H*, стратегия (направление) движения, параметры машин; *В* – горизонтальная структура вырубки, распределение пней по площади, их диаметры, параметры подроста и порубочных остатков, возраст и породный состав бывшего древостоя, давность рубки; *Р* – расчетный модуль, законы распределения пней по вырубке, расчет диаметров пней и расчет диаметра распространения корневой системы пня; *Д* – центральный модуль, связывающий всю информацию и моделирующий движение агрегата по вырубке. Кроме описанных ниже возможностей модель позволяет решать многие оптимизационные задачи проектирования лесохозяйственных работ на вырубке: определять количество пней на расчищаемой полосе, намечать расстояния между полосами и кулисами, рассчитывать производительность.

Алгоритм реализации горизонтальной структуры.

В среде графического редактора AutoCAD Map в реальном масштабе на основании технологической карты на производство работ формируется модель вырубки *П* (рис. 3), на которой, опираясь на данные о размещении пней на вырубке (1 способ) или на основе закона группового размещения с заданной степенью агрегатирования (2 способ) [9], генерируются точки центров пней S_i с координатами x_i, y_i (i – количество пней на вырубке).

Для моделирования распределения пней по вырубке необходимо знать вероятностный закон распределения насаждений по площади лесосеки. Пень моделируется точкой S_i и двумя концентрическими окружностями: d_i – диаметр пня на уровне почвы; D_i – диаметр корневой системы пня (в плане). Задаются стратегия движения (направление) и базовая точка вставки *В* с привязкой к местности. Агрегат *А* моделируется прямоугольником с размерами ($a \cdot b$), равными габаритам (в плане) машины (c – ширина захвата почвообрабатывающего рабочего органа). На объекте *А* задаются базовая точка *Р* и продольная ось. Движение объекта *А* по вырубке моделируется исходя из следующих условий: продольная ось агрегата всегда совпадает с траекторией движения; агрегат движется между двумя ближайшими пнями на равном расстоянии от них; если расстояние между краями пней с учетом зазора меньше габаритов машины, то движение невозможно; если расстояние между краями корневых систем соседних пней меньше ширины захвата рабочего органа, то движение невозможно; выбираются пни в заданном направлении; движение осуществляется внутри технологического коридора. Во всех случаях невозможности движения производится вычислительный шаг в обратном направлении и моделируется новая стратегия движения. Допустимо множество траекторий возможных движений. За наилучшую стратегию движения агрегата *А* по вырубке принимается движение с траекторией меньшей длины.

Вычислительный алгоритм реализован в виде программы-приложения на языке AutoLISP. Задать набор объектов $H1$ (в виде списка), попавших в прямоугольник с размерами $L \cdot h$ (рис. 3). Задать пустой список $T1$, в котором будут храниться точки P_j траектории движения агрегата A . Задать начальные условия P_0 – начальное положение агрегата (например, $P_0 = 0, h/2$). Поместить объект A в начальную точку, совместив точку P с P_0 , продольную ось агрегата установить в направлении стратегии движения (нормально h). Занести в список $T1$ точку P_0 . Организовать вычислительный цикл по поиску соседних с объектом A пней следующим образом. Вокруг точки P_0 описать окружности возрастающего радиуса до момента попадания в полуокружность, образованную кругом и нормалью, проведенной к продольной оси агрегата, совпадающую с направлением движения, двух пней S_1 и S_2 . Задать список $C1$ и поместить в него найденные точки. Соединить точки прямой линией $S_1 - S_2$ и разделить ее пополам. В полученную точку P_1 переместить объект A , причем продольную ось его установить нормально линии $S_1 - S_2$. Занести точку P_1 в список $T1$. Внутри цикла выполнить проверку по проходимости агрегата между пнями по габаритам ($a < S_2 - S_{i+1} - d_i$) и по сопротивлению перерезанию корней ($c < S_2 - S_{i+1} - D_i$). Проверить

наличие точек S_1 и S_2 в списке $H1$. Очистить набор $C1$. Конец цикла. Далее цикл повторить с выбором пней вокруг точки P_j . В набор точек $C1$ включать только новые точки. В случае непроходимости объекта между пней по вышеуказанным критериям ($S_5 - S_6$) вычислительный цикл возвратит на один шаг назад (точка P_3) и в набор включить еще одну точку S_7 , которая участвует в вычислениях.

При значении координаты точки P_j ($y_i = y_{min}$) объект A поворачивается против часовой стрелки и ищется новая ближайшая точка из набора $H1$. Окончанием вычислительного процесса являются условия, когда координата точки P_i $x_i \geq x_{max}$. Если условие $x_i \geq x_{max}$ не выполняется, а точек в наборе $H1$ нет, то движение осуществляется по прямой вдоль оси x . В результате имеем список $T1$ с точками движения агрегата P_j . Рассчитываем длину траектории. По второй стратегии в набор $C1$ включаем одну точку S_{i+1} и одну старую точку S_i из набора $C1$ на предыдущем цикле вычислений, максимально приближенную к точке P_i (на рис. 3 – случай $S_1 - S_3$). Пользователь в любой момент может на экране внести свои коррективы (например, задать новую точку P_j). Траектории могут вычерчиваться на экране. Полный текст программы приведен в работе [9].

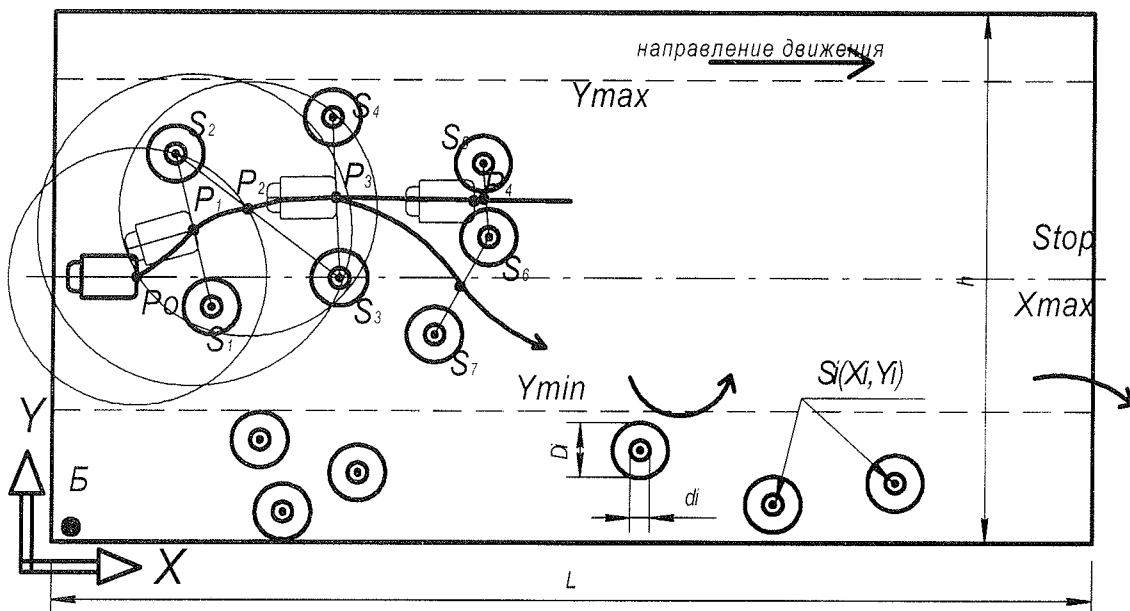


Рис. 3. Схема моделирования движения агрегата по вырубке

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЛЕСНОЙ ПОДСТИЛКИ

Механические свойства лесной подстилки, являющейся промежуточной компонентой опорной поверхности, изучены менее всего. Для прогнозирования параметров подстилки может быть предложена следующая методика:

1. Входными величинами являются микропрофиль минерального основания и данные по типам насаждений, время и место движения машины по опорной поверхности, среднегодовое количество осадков;
2. На основании входных данных прогнозируется средняя толщина (математическое ожидание) подстилки h_n (см. рис. 1);
3. Моделируются 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 моделируется ансамбль реализаций (геометрические и физико-механические параметры) лесной опорной поверхности; 5. На основании полученных данных моделируется взаимодействие рабочих органов и опорных элементов с поверхностью и определяется реализация входного воздействия на машину.

Толщина подстилки существенно зависит от времени года, поэтому параметры подстилки прогнозируются 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 [8] позволила выявить значения статистических характеристик толщины лесной подстилки как случайного процесса. Было установлено, что на формирование опорной поверхности существенную роль играют частота минерального основания и толщина подстилки, причем с ростом среднего значения толщины подстилки h_n (см. рис. 1) уменьшается высота преобладающих неровностей опорной поверхности. Статистическая обработка позволила выявить модель формирования неровностей опорной поверхности, рассчитать значения высот и длин неровностей поверхности лесной почвы. Было установлено колебание толщины подстилки относительно среднего значения. Применялась гармоническая корреляционная модель $h_n = K_0 \cdot \sin(l + K_1) + K_2$ (где h_n – текущее значение толщины подстилки, см; l – длина пути реализации процесса, м; K_0, K_1, K_2 – коэффициенты в корреляционных моделях). Сравнение прогнозируемых по корреляционным моделям данных с данными, полученными А. С. Аткиным [8], показало их удовлетворительную сходимость, причем относительная среднеквадратичная ошибка не превышала 12%. В результате обработки данных в системе MatchCAD определен спектральный состав неровностей поверхности движения машин и толщины подстилки. Все это дало возможность составить математические зависимости для компьютерного моделирования микропрофиля лесной опорной поверхности [9].

При взаимодействии с рабочими органами и движителями лесных машин подстилка деформируется и свойства ее изменяются. Для моделирования поведения подстилки при сжатии применялась модель упруго-пластической среды Друккера – Прагера [10]. Эта модель использовалась для моделирования деформации почвы в работах Ю. Ю. Герасимова и В. С. Сюнёва [11], а также J. Vario [12]. Расчеты, проведенные по модели Друккера – Прагера в системе MathCAD, показали, что на начальных этапах нагружения опорной поверхности ходовыми системами болотных тракторов, у которых удельное давление на почву составляет значения, не превышающие 30 кПа (ДТ-75Б), при толщине подстилки 15 см деформации на почву не передаются и гусеницы тракторов не погружаются в минеральную часть почвы.

По мере взаимодействия рабочих органов машин с опорной поверхностью происходит уплотнение подстилки. Для моделирования процесса уплотнения подстилки может быть предложена формула:

$$\rho_i(h_i) = c_0 + c_1(\rho_{i-1}) \cdot \delta^1 + c_2(\rho_{i-1})^2 \cdot \delta^2 + c_3(\rho_{i-1})^3 \cdot \delta^3, \quad (4)$$

где ρ_{i-1} – плотность лесной подстилки до i -этапа деформирования, на первом шаге расчетов принимается плотность недеформированной подстилки; $\delta = h_{ni} / (h_n)$ – относительная деформация подстилки, определяемая по модели Друккера – Прагера; h_n – толщина подстилки до деформирования; c_j – коэффициенты аппроксимации.

В результате расчетов было установлено, что деформирование опорной поверхности существенно зависит от плотности подстилки. Многими исследователями утверждается, что распределение плотности подчиняется нормальному закону. Однако плотность опада и подстилки зависит от ряда факторов и, не является стационарной функцией и имеет тенденцию к росту в зависимости от времени. Случайная функция $\rho(t)$ плотности может быть представлена как сумма случайной стационарной функции ρ , не зависящей от времени, и зависящего от времени года математического ожидания $M_\rho(t)$ или $[\rho(t) = \rho + M_\rho(t)]$. Уплотнение подстилки зависит от мощности опада и времени, прошедшего с момента максимального листопада. Проведенные эксперименты [9] позволяют составить уравнения, аппроксимирующие результаты измерений:

$$M_\rho(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3, \quad (5)$$

где t – порядковый номер дня, отсчитываемый от начала листопада, a_i – коэффициенты аппроксимации.

Влажность подстилки моделируется как нормально распределенная величина 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 древесности.

В процессе взаимодействия рабочих органов машин с опорной поверхностью происходит изменение плотности подстилки не только в вертикальном направлении, но и в горизонтальном. Такие процессы наблюдаются при исследовании работы движителей лесных машин. При сдвиге процессы деформирования часто описываются степенными зависимостями:

$$\tau(s) = \tau_0 + (\tau_n - \tau_0) \cdot (1 - e^{-a \cdot S_0} + b \cdot S_0^c \cdot e^{-d \cdot S_0}), \quad (6)$$

где $\tau(s)$ – текущее значение касательных напряжений в материале, Па; τ_0 – начальное значение удельного сопротивления сдвигу; τ_n – предельное сопротивление сдвигу; S – абсолютный сдвиг, м; $S_0 = S / S_n$ – относительный сдвиг; S_n – сдвиг подстилки при предельном

сопротивлении сдвигу; a , b , c – коэффициенты пропорциональности, рассчитываемые в результате обработки экспериментальных данных.

На рисунке 4 приведены результаты компьютерных исследований сопротивления лесной подстилки при сдвиге, выполненных по модели (6).

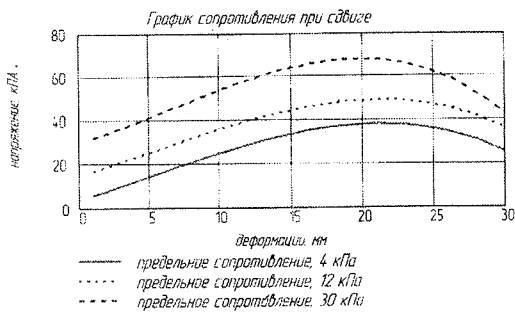


Рис. 4. Графики сопротивления подстилки при сдвиге

Расчеты, проведенные по модели (7), показывают, что для опорных поверхностей с ненарушенной структурой при возрастании сдвига подстилка вначале уплотняется и касательная сила увеличивается до максимума, соответствующего определенному сдвигу S_0 . В этот момент достигают максимума силы внутреннего сцепления. Затем происходит срыв подстилки при преодолении сил внутреннего сцепления, и касательная сила снижается до значений, обусловленных силами внутреннего трения. У рыхлой подстилки внутреннее сцепление между элементами отсутствует, поэтому с ростом деформации сдвига касательная сила линейно возрастает до значений, обусловленных внутренним трением.

ВЫВОДЫ

Предложена и реализована в соответствующих программных средствах многокомпонентная компьютерная модель, описывающая механические свойства лесной опорной поверхности движения машин. Структура поверхности моделируется двумя компонентами, представленными случайными поверхностями, и единичными включениями, создающими импульсные нагрузки на рабочие органы и движители лесных машин. Поверхность минерального основания генерируется на основе данных по микропрофилям. Параметры лесной подстилки прогнозируются на основе данных по климату, типу древостоев, скорости разложения, району использования лесных машин и учитывают деформации от сжатия и сдвига в резуль-

тате взаимодействия с машинами. Результаты моделирования используются при конструировании как входные динамические воздействия на рабочие органы и движители лесных машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Донато И. О. Роторно-винтовые машины. Основы теории движения / И. О. Донато, В. А. Жук, Б. В. Кузнецов и др. Новгород, 2000. 451 с.
2. Сабанцев Ю. Н. Статистическое моделирование лесозащитных данных / Ю. Н. Сабанцев, П. М. Мазуркин. Йошкар-Ола, 2001. 390 с.
3. Мазуркин П. М. Биотехническое проектирование / П. М. Мазуркин. Йошкар-Ола, 1994. 348 с.
4. Александров В. А. Моделирование технологических процессов лесных машин / В. А. Александров. М.: Экология, 1995. 257 с.
5. Варавва В. И. Основы динамики технологических машин / В. И. Варавва. СПб., 2002. 132 с.
6. Гостев Б. П. Основы динамики лесозащитного подвижного состава / Б. П. Гостев, В. И. Мельников. М.: Лесная промышленность, 1967, 220 с.
7. Коршун В. Н. Моделирование движения агрегата по вырубке / В. Н. Коршун // Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров и систем управления лесного комплекса: Межвуз. сб. науч. трудов. Вып. 7. Ч. 1. Воронеж, 2002. С. 61 – 64.
8. Аткина Л. И. Особенности накопления подстилок в лесных сообществах / Л. И. Аткина, А. С. Аткин // Почвоведение. 2000. № 8. С. 1004 – 1008.
9. Коршун В. Н. Роторные рабочие органы лесозащитных машин: Механика взаимодействия с предметом труда / В. Н. Коршун. Красноярск, 2005. 278 с.
10. Коршун В. Н. Роторные рабочие органы лесозащитных машин: Концепция конструирования / В. Н. Коршун. Красноярск, 2003. 228 с.
11. Герасимов Ю. Ю. Лесосечные машины для рубок ухода: Компьютерная система принятия решений / Ю. Ю. Герасимов, В. С. Сюнев. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1998. 236 с.
12. Vario J. Simulating soil deformation using a critical-state model / Vario J. // Europ. J. Soil. Sc. 1997. Vol. 48. N 1. P. 59 – 70.