

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОРЧЕВАНИЯ ДЕРЕВЬЕВ САМОХОДНОЙ МАШИНОЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ

доктор технических наук, доцент **В.И. Прядкин**
доктор технических наук, профессор **И.М. Бартнев**
кандидат физико-математических наук **В.В. Посметьев**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, Российская Федерация

В статье приведен анализ способов корчевания деревьев. За рубежом наибольшее распространение получил способ, при котором происходит одновременное удаление надземной и подземной частей деревьев в процессе одной технологической операции путем приложения нагрузки к стволу на некотором расстоянии от поверхности земли. Основными техническими средствами реализации технологии прямого корчевания являются самоходные высокопроизводительные корчеватели различной мощности, а процесс корчевания деревьев осуществляется, в основном, при вертикально приложенном усилии, когда создается опрокидывающий момент. Цель исследования – разработка математической модели процесса корчевания деревьев при вертикально приложенном усилии на основе метода динамики частиц. Разработанная математическая модель позволяет моделировать почву и корневую систему деревьев, находящуюся в ней, а также процесс выемки корневой системы дерева, определить вертикальное усилие, приложенное к стволу дерева, при котором происходит обрыв питающих корней и выход основных корней из почвы. В ходе проведения численного эксперимента установлено, что при корчевании деревьев диаметром 300 мм максимальное вертикальное усилие достигает 74 кН. Благодаря высокой физической адекватности и пространственным разрешением модель позволяет исследовать влияние параметров корчевателя и корневой системы на эффективность процесса корчевания.

Ключевые слова: самоходный корчеватель пней, машинные технологии корчевания, способ корчевания, метод динамики частиц

MODELING THE PROCESS OF REDUCING TREE STUMPS USING SELF-PROPELLED MACHINE BASED ON THE PARTICLE DYNAMICS METHOD

DSc (Engineering), Associate Professor **V.I. Pryadkin**
DSc (Engineering), Professor **I.M. Bartenev**
PhD (Physics and Mathematics) **I.V. Posmetyev**

FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",
Voronezh, Russian Federation

Abstract

The article presents an analysis of the tree dozer technologies. It is established that a separate method of grubbing out is most widespread due to the possibility of aggregation of various mounted and trailed tree dozer with wheeled and tracked tractors. Abroad, the most widespread method is simultaneous removal of the aboveground and underground parts of trees in the course of one technological operation. The main technical means of implementing direct stumping technology are self-propelled high-performance tree dozers of various capacities, and the process of

tree stumping is carried out mainly with a vertically applied force. The purpose of the study was to develop a mathematical model of the process of tree stumping at a vertically applied effort based on the particle dynamics. The developed mathematical model enables to simulate soil and tree root system located in it, as well as the process of removing the tree root system, determine the vertical force applied to the tree trunk, at which feeding roots break and the main roots leave the soil. In the course of a numerical experiment, it has been found that when stumping garden trees with a diameter of 300 mm, the maximum vertical force reaches 74 kN. Due to the high physical adequacy and spatial resolution, the model enables to study the influence of the uprooting mechanism and the root system on the efficiency of stumping process.

Keywords: self-propelled tree dozer, machine technology of stumping, method of stumping, particle dynamics method

Введение

В настоящее время в отечественном промышленном садоводстве и придорожных лесополосах при корчевании пней используются две технологии [1, 2, 3, 5, 6]. Первая основана на принципе раздельной корчевки и предусматривает выполнение двух технологических операций: срезание надземной части и удаление оставшихся в почве пней. В России данная технология получила наибольшее применение [7, 8, 9, 10, 11]. Навесные и прицепные специализированные корчеватели пней деревьев агрегируются в основном с энергонасыщенными гусеничными и колесными тракторами лесного, сельскохозяйственного и промышленного назначения.

Вторая технология предусматривает одновременное удаление надземной и подземной частей деревьев в процессе одной технологической операции. Технология прямого корчевания применяется преимущественно за рубежом, основными техническими средствами её реализации являются самоходные высокопроизводительные корчеватели, оборудованные как гусеничным, так и колесным двигателем. Эта технология позволяет производить удаление деревьев вместе с корневой системой за один проход, что обеспечивает увеличение производительности и экономичности применения специализированной техники.

При корчевании деревьев пней с использованием машинных технологий в зависимости от конструктивных особенностей оборудования применяется два способа приложения усилия – горизонтальное или вертикальное, или одновременно то и другое.

Проведенными многочисленными исследованиями установлено, что корчевание деревьев в горизонтальном направлении сопротивление корней меньше, чем при вертикальном направлении приложения усилия [12, 13]. Это объясняется тем, что при горизонтальном приложении усилия дерево наклоняется и корни обрываются не одновременно, а постепенно, по мере увеличения наклона. Однако основными недостатками корчевания при горизонтальном приложении усилий являются: недостаточность тягового усилия трактора, высокая частота воздействия на органы управления и вследствие рывков возрастает износ муфты сцепления и деталей трансмиссии.

Корчевание деревьев с приложением силы в вертикальном направлении более рационально [12-15], так как позволяет снизить динамическую нагруженность ходового аппарата мобильного средства, колеса и гусеницы находятся в не нагруженном состоянии, а усилие, прикладываемое к удаляемому дереву, распределяется между гидравлическими опорами корчевателя.

Самоходные корчеватели с вертикально приложенным усилием при выемке дерева с корнями из почвы позволяют реализовать оба способа приложения усилий со стороны корчевальной машины, то есть одновременно в вертикальном и горизонтальном направлениях. Однако теоретические исследования процесса корчевания деревьев с вертикально приложенным усилием при выемке деревьев вместе с корнями рассмотрены недостаточно и требуют самостоятельного рассмотрения на основе метода динамики частиц и применения современных вычислительных комплексов [16, 17, 18].

Целью исследования является разработка математической модели процесса корчевания деревьев при вертикально приложенном усилии на основе метода динамики частиц.

Материалы и методы

При разработке модели процесса корчевания деревьев необходимо воспроизвести в модели геометрическую конфигурацию и физические свойства ствола дерева и корневой системы, а также физические и геометрические особенности процесса движения корневой системы в почвенной среде.

Задачей данной работы является разработка математической модели процесса корчевания деревьев путем приложения вертикального усилия к челюстному захвату технологического оборудования самоходного средства на широкопрофильных шинах низкого давления.

Разработка модели базируется на использовании возможностей современной вычислительной техники, позволяющей добиться высокого пространственного разрешения и высокой детализации дерева и почвы [19, 20]. Одним из наилучших методов моделирования данных процессов является метод динамики частиц [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25]. Перечисленные среды представляются совокупностью большого количества шарообразных элементов (порядка 50000) малого размера (диаметром порядка 3 см), способных взаимодействовать между собой (рис. 1). Рассматриваемые элементы имеют возможность двигаться в трехмерном пространстве XYZ. Все шарообразные элементы имеют одинаковый диаметр d_3 . В данной модели элементы могут быть двух типов (древесина, почва). В зависимости от типа элементы обладают соответствующими физическими свойствами. При вытягивании модельного дерева (либо пня) в процессе корчевания челюстным захватом на элементы ствола действуют силы, вынуждающие элементы двигаться по законам классической динамики. В макроскопическом плане это приводит к изменению формы корневой системы и ее фрагментации, а также к изменению конфигурации окружающей почвы.

Состояние каждого шарообразного элемента задается координатами его центра (x_i, y_i, z_i) и

компонентами скорости (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}) . Элементы взаимодействуют между собой линейными упруго-вязкими силами. Это позволяет передать в модели базовые механические свойства почвы и древесины.

Отталкивание элементов осуществляется благодаря упругой составляющей взаимодействия при расстоянии r_{ij} между центрами элементов i и j менее диаметра элемента d_3 . В более узком диапазоне расстояний ($d_3 > r_{ij} > r_k$, где $r_k = \alpha d_3$ – критическое расстояние, до которого элементы взаимодействуют друг с другом, α – коэффициент выражения критического расстояния через диаметр элемента) осуществляется притяжение элементов, обеспечивающее связность почвы.

Дифференциальные уравнения механического движения совокупности элементов получены на основе II закона Ньютона:

$$\left\{ \begin{aligned} m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} &= \sum_{j=1}^{N_3} \left\{ \begin{aligned} & c_{ij} (d_3 - r_{ij}) \frac{(x_i - x_j)}{r_{ij}} + k_{ij} (r_{ij} - d_3) (v_{xi} - v_{xj}), \quad r_{ij} < d_3 \frac{\alpha_i + \alpha_j}{2}; \\ & 0, \quad r_{ij} \geq d_3 \frac{\alpha_i + \alpha_j}{2}; \end{aligned} \right. \\ m_i \frac{d^2 y_i}{dt^2} &= \sum_{j=1}^{N_3} \left\{ \begin{aligned} & c_{ij} (d_3 - r_{ij}) \frac{(y_i - y_j)}{r_{ij}} + k_{ij} (r_{ij} - d_3) (v_{yi} - v_{yj}), \quad r_{ij} < d_3 \frac{\alpha_i + \alpha_j}{2}; \\ & 0, \quad r_{ij} \geq d_3 \frac{\alpha_i + \alpha_j}{2}; \end{aligned} \right. \\ m_i \frac{d^2 z_i}{dt^2} &= -m_i g + \sum_{j=1}^{N_3} \left\{ \begin{aligned} & c_{ij} (d_3 - r_{ij}) \frac{(z_i - z_j)}{r_{ij}} + k_{ij} (r_{ij} - d_3) (v_{zi} - v_{zj}), \quad r_{ij} < d_3 \frac{\alpha_i + \alpha_j}{2}; \\ & 0, \quad r_{ij} \geq d_3 \frac{\alpha_i + \alpha_j}{2}; \end{aligned} \right. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где i – номер элемента; m_i – масса i -го элемента; x_i, y_i, z_i – декартовы координаты элемента; t – время; N_3 – количество элементов; j – номер элемента, возможно контактирующего с i -м элементом; c_{ij} и k_{ij} – коэффициенты жесткости и вязкости взаимодействия элементов i и j ; r_{ij} – расстояние между центрами элементов i и j ; v_{xi}, v_{zi} – декартовы составляющие скорости i -го элемента; α_i – относительное расстояние ограничения взаимодействия между элементами; g – ускорение свободного падения.

Расчет расстояния r_{ij} между элементами производится по формуле

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}.$$

Геометрическая конфигурация корневой системы в модели представляет цилиндр (ствол дерева или верх пня), постепенно преобразующийся в нижней части в шесть отдельных корней изогнуто-конической формы (рис. 2).

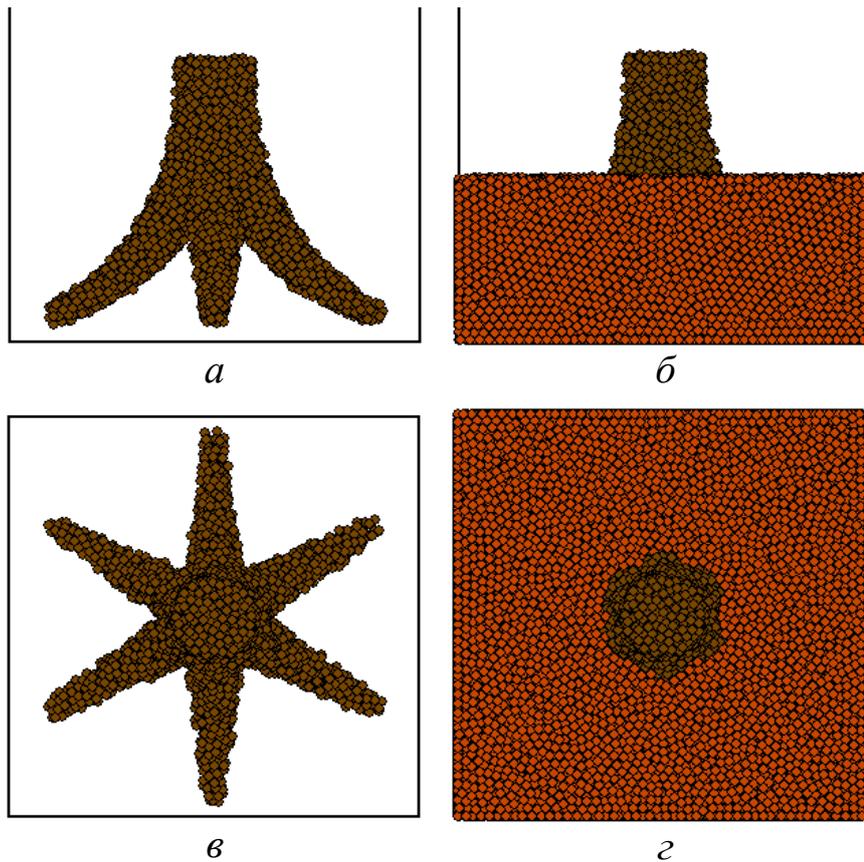


Рис. 1. Представление в модели дерева с корневой системой отдельно от почвы (а, в) и в почве (б, г):
а, б – вид сбоку; в, г – вид сверху

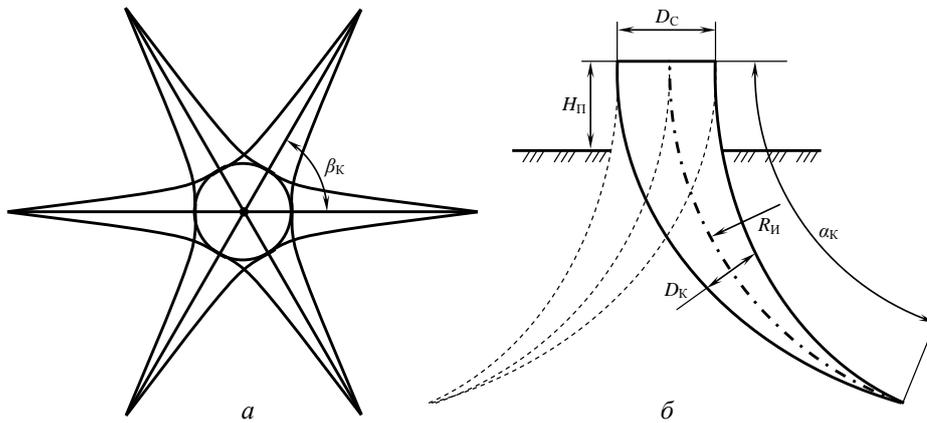


Рис. 2. Геометрическая конфигурация корневой системы:
а – вид сверху; б – вид сбоку

Для начального размещения элементов древесины внутри корневой системы используется следующий алгоритм. Сначала вдоль осевых линий корней размещаются по 100 базовых точек на каждый корень с равным расстоянием между ними. Координаты базовых точек корней задаются следующим образом:

$$x_{бтi} = \frac{L_x}{2} + R_{иi} \cos \alpha_{кi} \cos (\beta_{кi} (n_{кi} - 1))(1 - \cos \alpha_{бтi}); \quad (2)$$

$$y_{бтi} = \frac{L_y}{2} + R_{иi} \cos \alpha_{кi} \sin (\beta_{кi} (n_{кi} - 1))(1 - \cos \alpha_{бтi}); \quad (3)$$

$$z_{бтi} = z_{упi} + H_{пi} - R_{иi} \cos \alpha_{кi} \sin \alpha_{бтi}, \quad (4)$$

$$\alpha_{бтi} = \alpha_{кi} \left(\frac{i}{100} - n_{кi} + 1 \right), \quad \beta_{кi} = \frac{2\pi}{6}, \quad (5)$$

где $x_{бтi}$, $y_{бтi}$, $z_{бтi}$ – координаты базовой точки i ; L_x , L_y – размеры модельного пространства; $R_{иi}$ – радиус изгиба корня; $\alpha_{кi}$ – задающий длину корня угол, при этом длина корня $L_{кi} = R_{иi} \cdot \alpha_{кi}$; $\alpha_{бтi}$ – угловое положение i -й базовой точки; $z_{упi}$ – вертикальная координата уровня почвы; $H_{пi}$ – высота верхней части корневой системы над уровнем почвы; где $\beta_{кi}$ – угловое расстояние между осями корней в горизонтальной плоскости; $n_{кi}$ – номер корня (1, 2, ... $N_{кi}$).

На втором этапе алгоритма создания корневой системы для заданного количества предварительно однотипных элементов, расположенных в нижней части пространства моделирования, производится определение принадлежности элементов корневой системе. Элемент i считается принадлежащим корневой системе, если хотя бы для одной базовой точки корней j выполняется условие

$$\sqrt{(x_i - x_{бтj})^2 + (y_i - y_{бтj})^2 + (z_i - z_{бтj})^2} < \frac{D_c}{2} (\alpha_{кi} - \alpha_{бтj}), \quad (6)$$

где D_c – диаметр ствола в нижней части. Правая часть последнего неравенства является диаметром корня вокруг j -й базовой точки.

При генерации методом Монте-Карло множества положений элементов в пространстве элемент считается принадлежащим корневой системе, если расстояние от его центра до любой из базовых точек корневой системы будет меньше радиуса корня $R_{бтi}$.

Остальные элементы, находящиеся в случайной плотной упаковке в нижней части

пространства моделирования, не принадлежащие геометрической области корневой системы, считаются элементами почвы.

Действие челюстного захвата на ствол дерева воспроизводится в модели движением вверх с заданной скоростью $v_{под}$ элементов ствола, изначально расположенных в узкой области, ограниченной плоскостями $z = z_{чз} + z_{уп}$ и $z = z_{чз} + z_{уп} + \Delta z_{чз}$, где $z_{чз}$ – высота расположения челюстного захвата над уровнем почвы; $\Delta z_{чз}$ – высота челюстного захвата.

Дифференциальные уравнения второго порядка, описывающие движение системы элементов решаются численным методом (Рунге-Кутта второго порядка) [1].

$$x_i^{\tau+1} = x_i^{\tau} + v_{xi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{xi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2;$$

$$v_{xi}^{\tau+1} = v_{xi}^{\tau} + a_{xi}^{\tau} \cdot \Delta t;$$

$$y_i^{\tau+1} = y_i^{\tau} + v_{yi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{yi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2;$$

$$v_{yi}^{\tau+1} = v_{yi}^{\tau} + a_{yi}^{\tau} \cdot \Delta t, \quad (7)$$

$$z_i^{\tau+1} = z_i^{\tau} + v_{zi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{zi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2;$$

$$v_{zi}^{\tau+1} = v_{zi}^{\tau} + a_{zi}^{\tau} \cdot \Delta t,$$

где τ и $\tau+1$ – индексы текущего и последующего шага по времени; Δt – шаг интегрирования; x_i^{τ} , y_i^{τ} , z_i^{τ} – координаты элемента; v_{xi}^{τ} , v_{yi}^{τ} , v_{zi}^{τ} – компоненты скорости элемента; a_{xi}^{τ} , a_{yi}^{τ} , a_{zi}^{τ} – компоненты ускорения элемента.

Для данного метода характерен порядок 2 точности по координате и порядок 1 точности по скорости. Преимущества данного метода перед другими методами решения дифференциальных уравнений заключаются в универсальности, надежной работе и простоте и скорости программной реализации. Шаг интегрирования составлял $\Delta t = 0,0015$ с.

Для реализации изложенного выше математического аппарата разработана компьютерная программа «Программа для моделирования корчевания деревьев машиной на широкопрофильных шинах низкого давления с навесным механизмом корчевания». Программа написана на языке программирования Object Pascal в интегрированной среде визуального программирования Borland Delphi 7.

Программа позволяет проводить компьютерные эксперименты, перед которыми необходимо задать геометрические и механические параметры корневой системы и ствола дерева, почвы, а также челюстного захвата. При своей работе программа с заданной периодичностью выводит на экран изображение корневой системы и почвы в трех проекциях и показатели эффективности процесса корчевания (числа и графики).

Назначением программы является многократное проведение компьютерных экспериментов по корчеванию деревьев или пней диаметром до 300 мм машиной на широкопрофильных шинах низкого давления с навесным механизмом корчевания.

Характеристики и ограничения программы:

- количество элементов древесины: не более 10^3 ; почвы: не более 10^3 .
- машинное время проведения одного компьютерного эксперимента: порядка 10 минут.

Начальные условия. Координаты элементов древесины в начальный момент времени задаются описанным выше алгоритмом начального размещения. Элементы почвы, изначально случайно расположенные по объему пространства моделирования, оседают под действием сил тяжести и образуют случайную плотную упаковку под действием межэлементных сил. После подготовки почвы и корневой системы, перед основным моделированием процесса корчевания скорости механического движения элементов обнуляются:

$$v_{xi}^0 = 0, v_{yi}^0 = 0, v_{zi}^0 = 0.$$

Граничные условия. Для ограничения ухода элементов из пространства моделирования, их возможность перемещения в пространстве ограничена габаритами модельного пространства $L_x \times L_y \times L_z$. В случае попытки выхода элемента за границу модельного пространства, элемент принудительно возвращается обратно. В частности, если координата x_i элемента будет больше L_x , элемент возвращается в модельный параллелепипед путем изменения его кинематических характе-

ристик (при $x_i > L_x$, выполнить $x_i = L_x$; $v_{xi} = -v_{xi}$).

Допущения модели: по всему объему одного элемента вещество (древесина или почва) считается однородной сплошной средой; движение элементов описывается законами классической механики; элементы механически взаимодействуют между собой и с челюстным захватом; механическое взаимодействие описывается линейным упруго-вязким законом; физические свойства древесины и почвы задаются пятью параметрами: диаметром, массой, коэффициентами жесткости, вязкости, ограничения взаимодействия.

Результаты и обсуждение

При моделировании процесса корчевания ствол дерева (или верхняя часть пня) движется в модели с постоянной вертикальной скоростью (рис. 3). При этом деформируются нижние части корней и вытягиваются из почвы.

В ходе моделирования определяется зависимость от времени t силы сопротивления корчеванию $F_z(t)$. Расчет силы сопротивления корчеванию производится по формуле

$$F_z = \sum_{i=1}^{N_3} \begin{cases} \left[i - \text{элемент почвы} ; \right. \\ \left. 0, \begin{cases} z_i^{t=0} < z_{q3} + z_{y1} ; \\ z_i^{t=0} > z_{q3} + z_{y1} + \Delta z_{q3} ; \end{cases} \right. \\ \left. F_i^z, \begin{cases} i - \text{элемент древесины} ; \\ \begin{cases} z_i^{t=0} \geq z_{q3} + z_{y1} ; \\ z_i^{t=0} \leq z_{q3} + z_{y1} + \Delta z_{q3} , \end{cases} \end{cases} \right. \end{cases} \quad (8)$$

где $z_i^{t=0}$ – вертикальная координата центра элемента в начальный момент времени корчевания; F_z – вертикальная декартова составляющая силы, действующей на элемент i со стороны других элементов с добавлением силы тяжести, рассчитываемая по формуле (1).

С началом процесса корчевания сила на челюстном захвате быстро возрастает до 74 кН (рис. 4).

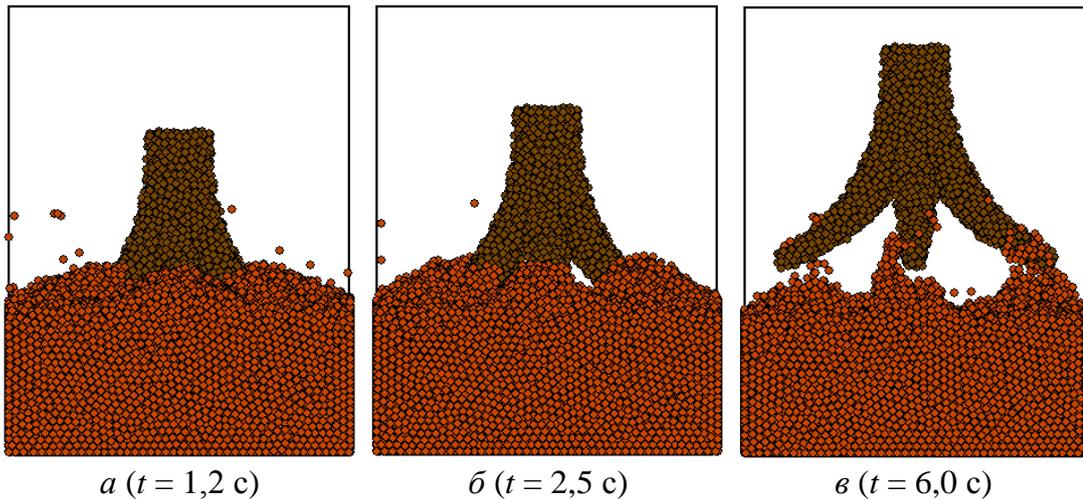


Рис. 3. Последовательность состояний пня и почвы в процессе корчевания

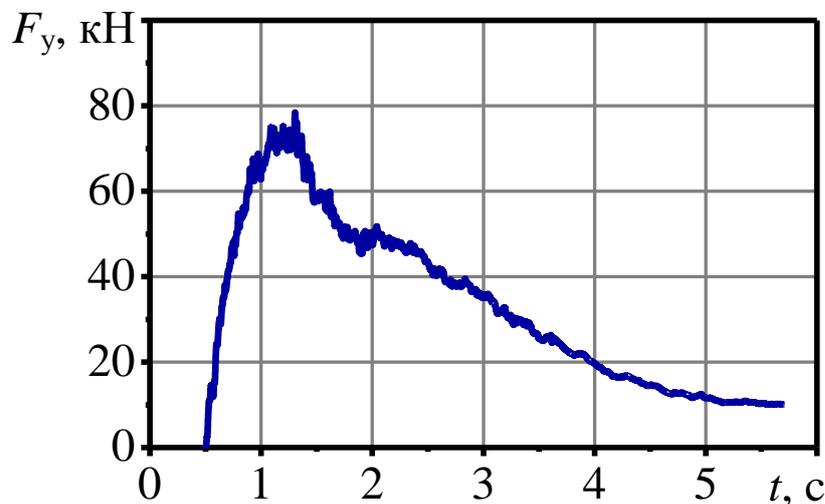


Рис. 4. Изменение с течением времени t вертикальной составляющей силы на захвате F_y

Моделирование производится для ствола яблони с диаметром ствола в прикорневой части 30 см. После вырывания корней из устойчивых положений в почве и разрушения связей корней с почвой сила F_z снижается по мере дальнейшего вытягивания дерева (или пня) из почвы. Через ориентировочно 5 секунд корневая система оказывается полностью выглубленной, и вертикальная сила на челюстном захвате снижается до веса дерева (или пня с корневой системой).

Полученную зависимость $F_z(t)$ целесообразно использовать на следующем этапе моделирования как возмущающую функцию в двумерной или трехмерной механической модели машины для корчевания деревьев (или пней) на платформе авто-

мобиля с широкопрофильными шинами низкого давления с навесным механизмом корчевания.

Вывод

Разработана математическая модель процесса прямого корчевания деревьев или пней диаметром до 300 мм при вертикально приложенном усилии технологическим оборудованием, установленным на платформе мобильного средства, оборудованного широкопрофильными шинами низкого давления. Модель позволяет исследовать влияние влажности и плотности почвы, диаметра ствола дерева и характеристик корневой системы на энергозатраты, обладает высокими физической адекватностью, детализацией и пространственным разрешением.

Библиографический список

1. Винокуров, В. Н. Машины и механизмы лесного хозяйства и садово-паркового строительства / В. Н. Винокуров, Г. В. Силаев, А. А. Золотаревский. – Москва, 2004.
2. Laitila, J. Comparison of two harvesting methods for complete tree removal on tree stands on drained peatlands / J. Laitila, K. Väättäinen, A. Asikainen // *Suoseura*. – 2013. – No. 64(2-3). – P. 77–95.
3. Конструкции и параметры машин для расчистки лесных площадей: монография / И. М. Бартенев, М. В. Драпалюк, П. И. Попиков, Л. Д. Бухтояров. – Москва : Флинта : Наука, 2007. – 208 с.
4. Criteria and guidance considerations for sustainable tree stump harvesting in British Columbia / S. M. Berch, M. Curran, C. Dymond [et al.] // *Scandinavian Journal of Forest Research*. – 2012. – No. 27(8). – P. 709–723.
5. Stump removal to control root disease in Canada and Scandinavia: A synthesis of results from longterm trials / M. R. Cleary, N. Arhipova, D. J. Morrison [et al.] // *Forest Ecology and Management*. – 2013. – No. 290. – P. 5–14.
6. Czereyski, K. Rationalization of stump extraction (FO-FAO/ECE/LOG, 158) / K. Czereyski, I. Galinska, H. Robel. Geneva: Joint FAO/ECE/ILO Committee on Forest Working Techniques and Training of Forest Workers, 1965.
7. Гуцелюк, Н. А. Технология машин в лесном и садово-парковом хозяйствах / Н. А. Гуцелюк, С. В. Спиридонов. – Санкт-Петербург : ПрофиКС, 2008. – 696 с.
8. Машины и механизмы лесного и лесопаркового хозяйства / А. Ф. Алябьев, В. Н. Винокуров, В. И. Казаков, А. А. Котов, В. Г. Шаталов ; под ред. В. Н. Винокурова. – Москва : ГОУ ВПО МГУЛ, 2009. – 468 с.
9. Бычков, В. В. Ресурсосберегающие технологии и технические средства для механизации садоводства / В. В. Бычков, Г. И. Кадыкало, И. А. Успенский // *Садоводство и виноградарство*. – 2009. – № 6. – С. 38–42.
10. Ресурсосберегающие технологии восстановления придорожных лесополос / А. В. Артёмов, А. В. Федянин, С. А. Ермоленко, В. И. Прядкин // Матер. III Междунар. науч.-практ. конференции, в рамках 3-го Международного Научного форума Донецкой Народной Республики ; Донецкая академия транспорта; ГУ "Институт Экономических Исследований", 2017. – С. 159–61.
11. Тенденции развития перспективных технических средств для корчевания деревьев / А. В. Артёмов, А. В. Федянин, С. А. Ермоленко, В. И. Прядкин // *Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования*. – Т. 4. – № 1 (7). – Воронеж, 2017. – С. 343–348.
12. Египко, С. В. Совершенствование технологии корчевания одиночных пней рычажным корчевателем / С. В. Египко // *Лесное хозяйство*. – 2006. – № 5. – С. 46–47.
13. Czupy, I. Vertical force requirement for stump lifting / I. Czupy, E. Horvath-Szovati // *Journal of Forest Science*. – 2013. No. 59(7). – P. 267–271.
14. Golob, T. B. Analysis of forces required to pull out stumps of varying age and different species (Information Report FMR-X-92) / T. B. Golob, T. B. Tsay, D. A. MacLeod. – Ottawa, Ontario, Canada: Forest Management Institute, Canadian Forestry Service, 1976.
15. Forces required to vertically uproot tree stumps / O. Lindroos, M. Henningsson, D. Athanassiadis, T. Nordfjell // *Silva Fennica*. – 2010. – No. 44(4). – P. 681–694.
16. Завражнов, А. А. Теоретическое определение усилия разрушения корней в почве рабочим органом корчевателя / А. А. Завражнов, В. Ю. Ланцев, Д. А. Егоров // *Достижения науки и техники АПК*. – 2013. – № 4. – С. 49–51.
17. Дручинин, Д. Ю. Математическая модель взаимодействия рабочего органа выкопчной машины с почвой и корнями растений / Д. Ю. Дручинин, О. Р. Дорняк, М. В. Драпалюк // *Научный журнал КубГАУ*. – 2011. – № 68(04).

18. Разработка концептуальной модели корчевателя пней плодовых деревьев / А. И. Завражнов, А. А. Завражнов, В. Ю. Ланцев, Д. А. Егоров // Технологии и средства механизации в АПК. Вестник МичГАУ. – 2012. – № 1, Ч. 1. – С. 154–162.
19. Jakob, C. Particle Methods. An Overview / C. Jakob, H. Konietzky. – Freiberg, 2012. – 24 p.
20. Хокни, Р. Численное моделирование методом частиц / Р. Хокни, Дж. Иствуд. – Москва : Мир, 1987. – 638 с.
21. Hoover, W. G. Atomistic Nonequilibrium Computer Simulations / W. G. Hoover // Physica A. – 1983. – Vol. 118. – P. 111–122.
22. Кривцов, А. М. Деформирование и разрушение тел с микроструктурой / А. М. Кривцов. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 304 с.
23. Белоцерковский, О. М. Метод крупных частиц в газовой динамике / О.М. Белоцерковский, Ю. М. Давыдов. – Москва : Наука, 1982. – 392 с.
24. Григорьев, Ю. Н. Численное моделирование методами частиц-в-ячейках / Ю. Н. Григорьев, В. А. Вшивков, М. П. Федорук. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2004. – 360 с.
25. Зализняк, В. Е. Основы вычислительной физики. Ч. 2. Введение в методы частиц / В. Е. Зализняк. – Москва – Ижевск : НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика” ; Институт компьютерных исследований, 2006. – 156 с.

References

1. Vinokurov V.N., Silaev G.V., Zolotarevsky A.A. *Mashiny i mekhanizmy lesnogo khozyaystva i sadovoparkovogo stroitel'stva* [Machines and mechanisms of forestry and landscape construction]. Moscow, 2004 (in Russian).
2. Laitila J., Väättäinen K., Asikainen, A. (2013). Comparison of two harvesting methods for complete tree removal on tree stands on drained peatlands. *Suoseura* 64 (2-3), pp. 77-95.
3. Bartenev I.M., Drapalyuk M.V., Popikov P.I., Bukhtoyarov L.D. *Konstruktсии i parametry mashin dlya raschistki lesnykh ploshchadey* [Designs and parameters of machines for clearing forest areas]: monograph. Moscow: Flinta: Nauka, 2007. 208 p. (in Russian).
4. Berch S.M., Curran M., Dymond C. et al. (2012). Criteria and guidance considerations for sustainable tree stump harvesting in British Columbia. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 27 (8), pp. 709-723.
5. Cleary M.R., Arhipova N., Morrison D.J. et al. (2013). Stump removal to control root disease in Canada and Scandinavia: A synthesis of results from longterm trials. *Forest Ecology and Management*, 290, pp. 5-14.
6. Czereyski K., Galinska I., Robel H. (1965). Rationalization of stump extraction. (FO-FAO / ECE / LOG, 158). Geneva: Joint FAO / ECE / ILO Committee on Forest Working Techniques and Training of Forest Workers.
7. Gutselyuk N.A., Spiridonov S.V. *Tekhnologiya mashin v lesnom i sadovoparkovom khozyaystvakh* [Technology of machines in forestry and landscape gardening]. St. Petersburg: ProfiKS, 2008. 696 p. (in Russian)
8. Alyabyev A.F., Vinokurov V.N., Cossacks V.I., Kotov A.A., Shatalov V.G. ; ed. By V.N. Vinokurov. *Mashiny i mekhanizmy lesnogo i lesoparkovogo khozyaystva* [Machines and mechanisms of forestry and forestry] Moscow: MGUL, 2009. 468 p. (in Russian).
9. Bychkov V.V. (2009) *Resursosberegayushchie tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlya mekhanizatsii sadovodstva* [Resource-saving technologies and technical means for gardening mechanization]. *Horticulture and Viticulture*, N 6. P. 38-42 (in Russian).
10. Artyomov A.V., Fedyanin A.V., Ermolenko S.A., Pryadkin V.I. *Resursosberegayushchie tekhnologii vosstanovleniya pridorozhnykh lesopolos* [Resource-saving technologies for the restoration of roadside forest belts] / Materials of the III International Scientific and Practical Conference, as part of the 3rd International Scientific Forum of the Donetsk People's Republic. Donetsk Academy of Transport; State Institution "Institute of Economic Research". 2017.S. 159-161 (in Ukrainian).

11. Artyomov A.V., Fedyanin A.V., Ermolenko S.A., Pryadkin V.I. *Tendentsii razvitiya perspektivnykh tekhnicheskikh sredstv dlya korchevaniya derev'yev* [Trends in the development of promising technical means for uprooting trees] / Alternative energy sources in automobile transport: problems and prospects of rational use. Volume 4. No. 1 (7). Voronezh, 2017. P. 343-348 (in Russian).
12. Egiptko S. V. (2006) *Sovershenstvovanie tekhnologii korchevaniya odinochnykh pney rychazhnym korchevatelem* [Improvement of the technology of uprooting of single stumps by a lifted uprooter]. *Forest household*. No. 5, p. 46-47 (in Russian).
13. Czupy I., Horvath-Szovati E. (2013). Vertical force requirement for stump lifting. *Journal of Forest Science*, 59 (7), pp. 267-271.
14. Golob T.B., Tsay T.B., MacLeod, D.A. (1976). Analysis of forces required to pull out stumps of varying age and different species. (Information Report FMR-X-92). Ottawa, Ontario, Canada: Forest Management Institute, Canadian Forestry Service.
15. Lindroos O., Henningsson M., Athanassiadis D., Nordfjell T. (2010). Forces required to vertically uproot tree stumps. *Silva Fennica*, 44 (4), pp. 681-694.
16. Egorov D.A. (2013) *Teoreticheskoe opredelenie usiliya razrusheniya korney v pochve rabochim organom korchevatel'ya* [Theoretical definition of the effort of destruction of roots in the soil by the working body of the uprooter]. *Achievements of science and technology of the agroindustrial complex*, No. 4. P. 49-51 (in Russian).
17. Druchinin D.Yu., Dorniyak O.R., Drapalyuk M.V. (2011) *Matematicheskaya model' vzaimodeystviya rabocheho organa vykopochnoy mashiny s pochvoy i kornyami rasteniy* [A mathematical model of the interaction of the working body of a digging machine with soil and plant roots]. *Scientific journal KubSAU*, No. 68 (04) (in Russian).
18. Zavrzhnov A.I., Zavrzhnov A.A., Lantsev V.Yu., Egorov D.A. (2012) *Razrabotka kotseptual'noy modeli korchevatel'ya pney plodovykh derev'yev* [Development of a conceptual model of the uprooter of fruit tree stumps] / *Technologies and means of mechanization in the agricultural sector*. *Vestnik MichGAU*, No. 1, Part 1, pp. 154-162 (in Russian).
19. Jakob C., Konietzky H. Particle Methods. An Overview. Freiberg, 2012. 24 p.
20. Hockney R., Eastwood J. *Chislennoe modelirovanie metodom chastits* [Particle Numerical Modeling]. Moscow: Mir, 1987. 638 p. (in Russian).
21. Hoover W.G. (1983) Atomistic Nonequilibrium Computer Simulations. *Physica A*. Vol. 118. P. 111-122.
22. Krivtsov A.M. *Deformirovanie i razrushenie tel s mikrostrukturoy* [Deformation and fracture of bodies with a microstructure]. Moscow: FIZMATLIT, 2007. 304 p. (in Russian).
23. Belotserkovsky O.M., Davydov Yu.M. *Metod krupnykh chastits v gazovoy dinamike* [The method of large particles in gas dynamics]. Moscow: Nauka, 1982. 392 p. (in Russian).
24. Grigoryev Yu.N., Vshivkov V.A., Fedoruk M.P. *Chislennoe modelirovanie metodami chastits v yacheykakh* [Numerical simulation by particle in cell methods]. Novosibirsk: Publishing House of the SB RAS, 2004. 360 p. (in Russian).
25. Zaliznyak V.E. *Osnovy vychislitel'noy fiziki. Chast' 2. Vvedenie v metody chastits* [Fundamentals of Computational Physics. Part 2. Introduction to particle methods]. Moscow – Izhevsk: Research Center “Regular and chaotic dynamics”; Institute for Computer Research, 2006. 156 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Прядкин Владимир Ильич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой автомобилей и сервиса ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: vip16.vgltu@mail.ru.

Бартенев Иван Михайлович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: kafedramehaniza@mail.ru.

Посметьев Виктор Валерьевич – кандидат физико-математических наук, директор ИП Посметьев, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: viktorvpo@mail.ru.

Information about authors

Pryadkin Vladimir Ilyich – DSc (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Cars and Service, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: vip16.vglu@mail.ru.

Bartenev Ivan Mikhailovich – DSc (Engineering), Professor, Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: kafedramehaniza@mail.ru.

Posmetiev Victor Valerievich – PhD (Physics and Mathematics), Director of IE Posmetiev, Voronezh, Russian Federation; e-mail: viktorvpo@mail.ru.