

Клубничкин Евгений Евгеньевич – доцент кафедры колесных машин Мытищинского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», кандидат технических наук, доцент, г. Мытищи, Российская Федерация; e-mail: klubnichkin@mgul.ac.ru

Кондратюк Дмитрий Владимирович – главный конструктор АО «Государственный научный центр лесопромышленного комплекса», кандидат технических наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: gnc1pk@mail.ru

Бекетов Сергей Анатольевич – профессор кафедры многоцелевых гусеничных машин и мобильных роботов ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», доктор технических наук, профессор, г. Москва, Российская Федерация. e-mail: bekprof@mail.ru

Information about authors

Klubnichkin Vladislav Evgenyevich – Associate Professor of Wheeled and Tracked Vehicles department, Mytishi branch Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University», Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Mytishi, Russian Federation; e-mail: vklubnichkin@gmail.ru.

Klubnichkin Evgeny Evgenyevich – Associate Professor of Wheeled and Tracked Vehicles department, Mytishi branch Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University», Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Mytishi, Russian Federation; e-mail: klubnichkin@mgul.ac.ru.

Kondratyuk Dmitry Vladimirovich - Chief Designer «State Scientific Center of the Timber Industry Complex», Ph.D. in Engineering, Moscow, Russian Federation; e-mail: gnc1pk@mail.ru

Beketov Sergey Anatolievich – Professor of multipurpose tracked vehicles and mobile robots Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University», DSc in Engineering, Professor, Moscow, Russian Federation; e-mail: bekprof@mail.ru

DOI: 10.12737/article_5a3d097ac621c3.55675220

УДК 630*4

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЛЕСНОГО ПОЖАРНОГО ГРУНТОМЕТА С ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИМ ГИДРОПРИВОДОМ

доктор технических наук, профессор **П.И. Попиков**¹
кандидат технических наук, доцент **П.Э. Гончаров**¹
аспирант **А.В. Шаров**¹

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

В статье представлена принципиальная гидравлическая схема грунтомета с подключением пневмогидравлического аккумулятора, который аккумулирует энергию при перегрузках в момент встречи рабочих органов с препятствиями, при этом исключается срабатывание предохранительных клапанов и превращение гидравлической энергии в тепловую. Разработана математическая модель, которая всесторонне описывает происходящие явления: вращение и движение ротора грунтомета, взаимодействие ротора с грунтом и препятствиями, движение грунта в пространстве. В рамках метода грунт и препятствия представляются совокупностью большого количества (порядка 2000...10000) шарообразных элементов малого размера, способных взаимодействовать как между собой, так и с лопатками грунтомета. Моделирование производится в трехмерном пространстве

XYZ, при этом элементы имеют одинаковую шарообразную форму с одинаковым диаметром. В рамках разрабатываемой модели рабочие поверхности представляются в виде совокупности элементарных треугольников. Ротор грунтомета в модели с некоторой степенью закругления представлен в виде четырех лопастей прямоугольной формы, каждая из которых состоит из двух треугольников. В процессе моделирования воспроизводилось вращение ротора и расчет взаимодействия треугольных поверхностей с элементами грунта и препятствиями. Для решения системы дифференциальных и алгебраических уравнений, которая заложена в основу модели, разработана компьютерная программа "Программа для моделирования работы лесного пожарного грунтомета с энергосберегающим гидроприводом". Программа разработана в среде BorlandDelphi 7.0 на языке программирования ObjectPascal. Изучены стадии взаимодействия грунтомета с непреодолимым препятствием. Использование энергосберегающей гидросистемы позволяет повысить равномерность вращения ротора, снизить энергетические затраты на вращение ротора на 12 %.

Ключевые слова: грунтомет, лесной пожар, почва, гидропривод, гидроаккумулятор.

MODELLING WORK FLOW FOREST FIRE SOIL – THROWER WITH ENERGY-SAVING HYDRAULIC DRIVE

Doctor of Technical Sciences, Professor **P.I. Popikov**¹
PhD in Technical, Associate Professor **P. E. Goncharov**¹
postgraduate **A. V. Sharov**¹

1- Federal State Budget Education Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation

Abstract

The article is a schematic diagram of the hydraulic soil-thrower with connection air-charged accumulator which stores energy during overload when working bodies meeting with obstacles, while avoiding the operation of safety valves and conversion hydraulic energy into heat. Mathematical model that comprehensively describes the events taking place: the rotation and movement of the rotor soil-thrower rotor interaction with the ground and obstacles, the drive ground in space. In the method of the soil and the obstacles presented a collection of a large number (about 2000 ... 10000) spherical elements of small size, enabled communicate both among themselves and with the blades soil-thrower. The simulation is performed in three-dimensional space XYZ, where in the same elements have a spherical shape with the same diameter. With in the framework of the model developed by the working surfaces are represented as a set of elementary triangles. Rotor soil-thrower model with some degree of desensitization is represented by four rectangular blades, each of which consists of two triangles. In the process of simulation reproduced rotation of the rotor and the calculation of the interaction with the elements of triangular surfaces ground and obstacles. To solve the system of differential-social and algebraic equations, which laid the basis for the model, time-operated computer program "Program for modeling the work of forest fire soil-thrower with energy saving action hydraulic drive" program time to work in Borland Delphi environment 7.0 language Object Programming Pascal. Изучены soil-thrower stage of interaction with the irresistible preption. Using the powering hydraulic system improves the uniformity of rotation of the rotor, to reduce energy costs for rotor rotation by 12%.

Keywords: soil-thrower, wildfire, soil, hydraulic drive, air-charged accumulator.

Для профилактики и тушения лесных пожаров применяются полосопрокладователи и грунто-

меты с фрезерными рабочими органами [1]. Привод фрезерных рабочих органов грунтомета предлага-

ется осуществлять от гидромотора, так как при механическом приводе через редуктор и карданную передачу возникают большие динамические нагрузки и снижается маневренность агрегата. На рис. 1 представлена принципиальная гидравлическая схема грунтомета с подключением пневмогидравлического аккумулятора, который аккумулирует энергию при перегрузках в момент встречи рабочих органов с препятствиями, при этом исключается срабатывание предохранительных клапанов и превращение гидравлической энергии в тепловую.

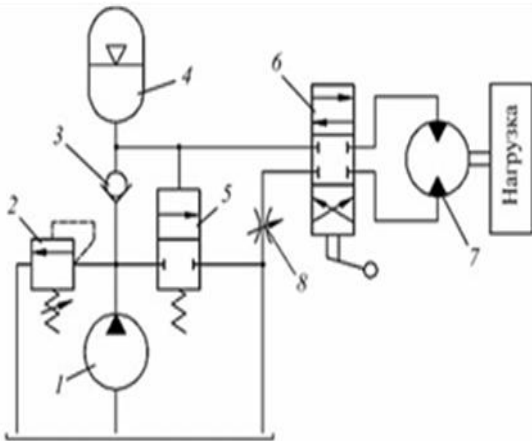


Рис. 1. Гидропривод с пневмогидравлическим аккумулятором: 1 – гидронасос; 2 – предохранительный клапан; 3 – обратный клапан; 4 – пневмогидравлический аккумулятор; 5 и 6 – гидрораспределители; 7 – гидродвигатель; 8 – дроссель;

При полностью заряженном гидроаккумуляторе насос 1 полностью разгружается, и питание гидросистемы осуществляется от пневмогидравлического аккумулятора 4, который при необходимости будет оперативно подзаряжаться гидронасосом 1 [7]. Для обоснования параметров гидропривода рабочих органов грунтомета необходимо проведение дополнительных теоретических исследований. Современные методы моделирования, основанные на возможностях высокопроизводительной вычислительной техники, позволяют разработать математическую модель грунтомета, обладающую высокой физической адекватностью и высоким пространственным разрешением [3, 4].

Разработанная модель всесторонне описывает механические процессы: вращение и движение ротора грунтомета, взаимодействие ротора с грунтом и препятствиями, движение грунта в простран-

стве. Основное уравнение разработанной модели связывает гидравлическую и механическую подсистемы модели:

$$J \frac{d^2 \varphi_P}{dt^2} = M_M - M_{CT} - M_{СП} - M_{ТР}, \quad (1)$$

где J – момент инерции ротора и гидромотора, кинематически связанных между собой; φ_P – угловое положение ротора; t – время; M_M – вращающий момент, оказываемый гидромотором; M_{CT} – момент сил сопротивления грунта; $M_{СП}$ – момент сил сопротивления препятствия; $M_{ТР}$ – момент сил трения в механизме.

Расписывая более подробно уравнение (1), получим

$$(J_M + J_P + J_{П}) \frac{d^2 \varphi_P}{dt^2} = \frac{Q_M(t)(P_M - P_0)}{\frac{d\varphi_P}{dt}} - \sum_{i=1}^{N_{ЭГ}} r_i F_{Г}^{\tau} - \sum_{i=1}^{N_{ЭП}} r_i F_{П}^{\tau} - \left(M_{CT} + k_{ВТ} \frac{d\varphi_P}{dt} \right), \quad (2)$$

где $J_M, J_P, J_{П}$ – моменты инерции гидромотора, ротора, передачи, приведенные к оси вращения ротора; Q_M – расход рабочей жидкости гидромотора; P_M и P_0 – давление на входе и выходе гидромотора; $N_{ЭГ}$ и $N_{ЭП}$ – количество элементов грунта и препятствия (корни, пни, камни), взаимодействующих с лопатками ротора; r_i – расстояние от оси ротора до взаимодействующего с ротором i -го элемента грунта или препятствия; $F_{Г}^{\tau}$ и $F_{П}^{\tau}$ – касательная составляющая силы воздействия i -го элемента грунта и препятствия на ротор; M_{CT} – момент сил сухого трения при вращении ротора; $k_{ВТ}$ – коэффициент вязкого трения.

Дифференциальное уравнение второго порядка (2) является довольно сложным в решении: даже в явном виде уравнения (2) искомая функция $\varphi_P(t)$ находится как в числителе, так и в знаменателе правой части. Однако дополнительную сложность уравнению придает зависимость от t и φ_P входящих в него переменных $J_P, Q_M, P_M, N_{ЭГ}, N_{ЭП}, F_{Г}^{\tau}$ и $F_{П}^{\tau}$. Для выявления аналитических выражений для данных зависимостей рассмотрим подроб-

но гидравлическую и механическую подсистему модели.

Гидравлическая система в модели состоит из гидронасоса, гидромотора и пневмогидравлического аккумулятора, эффективного трубопровода, обратного клапана и сливной магистрали. В процессе моделирования гидравлической подсистемы анализируется перетекание рабочей жидкости от одного элемента гидросистемы к другому. Если различаются давления в двух элементах гидросистемы i и j , гидравлически соединенных между собой, в модели рассчитывается расход рабочей жидкости Q_{ij} по формуле [10]:

$$Q_{ij} = k_{ij} \operatorname{sign} (P_i - P_j) \sqrt{|P_i - P_j|}, \quad (3)$$

где i и j – индексы элементов («H», «T», «A», «M», «C» – соответственно перечисленным выше элементам гидросистемы); k_{ij} – коэффициент дросселирования; sign – функция, выделяющая знак переменной.

В модели считается, что дросселирование между элементами происходит через эффективное круглое сечение. Тогда коэффициент дросселирования определяется через эффективный диаметр d_{ij} отверстия по формуле [10]

$$k_{ij} = \mu \frac{\pi d_{ij}^2}{4} \sqrt{\frac{2g}{\gamma}}, \quad (4)$$

где μ и γ – коэффициент расхода и удельный вес рабочей жидкости; g – ускорение свободного падения.

Трубопровод «T» в модели считается отдельной полостью, обладающей гидравлической упругостью. Тогда давление P_T в трубопроводе изменяется в соответствии с зависимостью [10]:

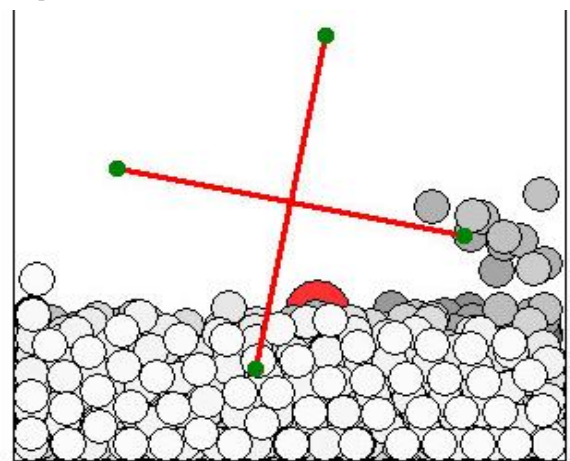
$$\frac{dP_T}{dV_T} = - \frac{E}{V_T}, \quad (5)$$

где E и V_T – объемный модуль упругости и объем рабочей жидкости в трубопроводе.

Высокую сложность представляет моделирование лесного грунта, так как грунт описывается большим количеством типологических и физических параметров (тип грунта, твердость, влажность, плотность, рельеф поверхности) [1, 2].

Для моделирования грунта и препятствий используется метод динамики частиц [3, 4]. В предлагаемой модели грунт и препятствия (корни, камни) представлены совокупностью 2000...10000 шарообразных элементов диаметром d_s , взаимодействующих между собой и с лопатками грунтомета (рис. 2, а). Элементы разделены на два типа: «грунт» и «препятствие», и соответственно имеют различный набор физических свойств. Под действием возникающих сил элементы движутся в трехмерном пространстве XYZ по законам классической механики, что вызывает деформацию, фрагментацию и метание грунта.

Элементы в модели взаимодействуют между собой упруго-вязкими силами. Это позволяет перенести в модель механические свойства сред: объемную плотность, модуль упругости, коэффициент внутреннего трения, предел прочности на разрыв [8, 9].



а

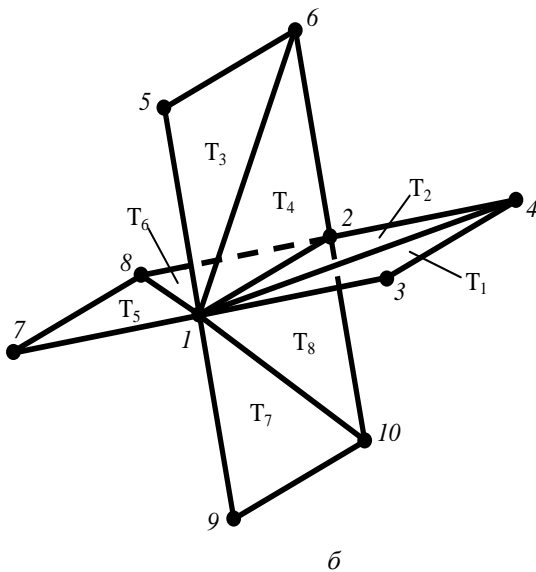


Рис. 2. Воспроизведение в модели процесса метания грунта ротором грунтмета (а) и представление в модели ротора грунтмета в виде набора элементарных треугольных поверхностей (б)

При внедрении элементов друг в друга возникают силы отталкивания, при отдалении сцепленных элементов друг от друга возникают силы притяжения.

Эволюция системы элементов описывается следующими уравнениями движения:

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

где i – порядковый номер элемента; x_i, y_i, z_i – декартовы координаты элемента; m_i – масса элемента; t – время; N_3 – общее количество элементов; j – номер элемента, для которого проверяется условие контакта с i -м элементом; c_{ij} и d_{ij} – коэффициенты жесткости взаимодействия и линейной вязкости элементов; r_{ij} – расстояние между центрами элементов i и j ; v_{xi}, v_{yi}, v_{zi} – компоненты скорости элемента; d_B – расстояние ограничения взаимодействия; g – ускорение свободного падения; k – номер

элементарной треугольной поверхности механизма, действующей на грунт или препятствие; N_{Π} – количество элементарных треугольных поверхностей; $F_{xik}^{\Pi}, F_{yik}^{\Pi}, F_{zik}^{\Pi}$ – декартовы составляющие силы, действующей со стороны k -й элементарной треугольной поверхности на i -й элемент.

Движение элементов в пространстве ограничено стенками прямоугольного параллелепипеда, имеющего размеры $L_x \times L_y \times L_z$. В начале каждого компьютерного эксперимента необходимо сформировать из элементов грунт в нижней части базового параллелепипеда из нескольких слоев элементов. Для этого используется алгоритм встряски, который позволяет сформировать случайную плотную упаковку шарообразных элементов. Ротор грунтмета помимо вращения движется в направлении OY , захватывает элементы грунта и придает им движение по баллистической траектории. Для возможности вылета элементов грунта одна из стенок базового параллелепипеда является открытой. При касании элементами остальных стенок – элемент возвращается обратно в базовый параллелепипед в результате механического удара о стенку.

Ротор грунтмета приближенно представлен четырьмя лопастями прямоугольной формы (рисунок 2, б). Каждая лопасть ротора состоит из двух треугольных элементарных поверхностей. Треугольная форма элементарных поверхностей выбрана по причине легкости стыковки поверхностей между собой и возможности воспроизводить поверхность сложной формы: в более сложной модификации модели рабочими поверхностями являются также кожух с окном выброса почвы и сошник в нижней части грунтмета. Изменяя координаты вершин треугольников, можно варьировать геометрические параметры ротора, в частности, диаметр, ширину лопаток.

Таким образом, ротор состоит из восьми треугольников: $T_1(P_1, P_3, P_4)$; $T_2(P_1, P_2, P_4)$; $T_3(P_1, P_5, P_6)$; $T_4(P_1, P_2, P_6)$; $T_5(P_1, P_7, P_8)$; $T_6(P_1, P_2, P_8)$; $T_7(P_1, P_9, P_{10})$; $T_8(P_1, P_2, P_{10})$. Символом P_i – обозначены базовые точки, на которых построены треугольники. Так как соединенные треугольные поверхности не являются замкнутыми, остаются свободные ребра, имитирующие острые кромки ротора.

Имитация вращения ротора производится путем перемещения базовых точек P_3 – P_{10} по круговым траекториям:

$$x_1 = x_{цр}; \quad y_1 = y_{цр} + \frac{B_{л}}{2}; \quad z_1 = z_{цр};$$

$$x_2 = x_{цр}; \quad y_2 = y_{цр} - \frac{B_{л}}{2}; \quad z_2 = z_{цр};$$

$$x_{3+2i} = x_{цр} + R_p \cos \left(\omega_p t + i \frac{\pi}{2} \right);$$

$$y_{3+2i} = y_{цр} + \frac{B_{л}}{2};$$

$$z_{3+2i} = z_{цр} + R_p \sin \left(\omega_p t + i \frac{\pi}{2} \right);$$

$$x_{4+2i} = x_{цр} + R_p \cos \left(\omega_p t + i \frac{\pi}{2} \right);$$

$$y_{4+2i} = y_{цр} - \frac{B_{л}}{2};$$

$$z_{4+2i} = z_{цр} + R_p \sin \left(\omega_p t + i \frac{\pi}{2} \right);$$

где $x_{цр}$, $y_{цр}$, $z_{цр}$ – координаты центра ротора; $B_{л}$ и R_p – ширина лопатки и радиус ротора.

Точка центр ротора ($x_{цр}$, $y_{цр}$, $z_{цр}$) движется в пространстве по прямой, заданной параметрическими уравнениями:

$$x_{цр} = \frac{L_x}{2}; \quad y_{цр} = y_0 + v_{г} t;$$

$$z_{цр} = R_p - a_3,$$

где $v_{г}$ – скорость поступательного движения грунтомета; t – время, прошедшее с начала моделирования; y_0 – условная координата грунтомета вдоль оси модельного грунтового канала; R_p – ради-

ус ротора; a_3 – величина заглубления ротора в грунт [5,6].

Движение в пространстве рабочих поверхностей грунтомета вызывает их контакт с элементами грунта или препятствия, что приводит к появлению сил, оказывающих сопротивление движению поверхностей, а также противоположных сил, изменяющих конфигурацию грунта. При расчете сил между поверхностями и элементами основная сложность заключается в проверке контакта элемента с данным треугольником, которая производится в два этапа. На первом этапе определяется проекция центра элемента на плоскость, содержащую треугольник. На втором этапе производится проверка попадания точки проекции внутрь треугольника. Если установлен контакт элемента и поверхности, далее рассчитывается величина внедрения $r_{вн}$ элемента в плоскость и направление взаимодействия, необходимые для расчета сил взаимодействия.

Для реализации предлагаемой модели разработана компьютерная программа "Программа для моделирования работы лесного пожарного грунтомета с энергосберегающим гидроприводом" в среде BorlandDelphi 7.0 на языке программирования Object Pascal.

Программа предназначена для многократного проведения компьютерных экспериментов по метанию грунта, остановке и пуску ротора при контакте с непреодолимыми препятствиями, и определения на этой основе оптимальных параметров энергосберегающей гидросистемы. В окнах интерфейсной формы программы, перед началом компьютерного эксперимента, есть возможность задать или изменить геометрические параметры грунтомета, скорость поступательного движения и частоту вращения ротора, параметры гидросистемы, физико-механические параметры грунта и препятствия. В процессе своей работы программа периодически выводит на экран изображение проекций грунтомета, грунта и препятствий, а также графики временных зависимостей момента сопротивления вращению ротора и частоты вращения ротора. Приблизительное время проведения компьютерного экспе-

римента составляет около 5 мин (персональный компьютер, 2017 г.).

Таким образом нами разработана математическая модель работы лесного пожарного грунтомета с энергосберегающей гидросистемой, позволяющая изучить влияние параметров гидросистемы, грунтомета, грунта, препятствий на эффективность рабочего процесса и защиты ротора. Изучены стадии взаимодействия грунтомета с непреодолимым препятствием. Использование энергосберегающей гидросистемы позволяет повысить равно-

мерность вращения ротора, снизить энергетические затраты на вращение ротора на 12 %.

Новый грунтомет с предварительным рыхлением почвы и гидроприводом грунтометательных рабочих органов, позволит повысить рабочую скорость в 1,5-2 раза по сравнению с тракторными аналогами, которые фрезеруют необработанную почву, обеспечить поток грунта, выбрасываемый на расстояние до 20...30 метров для тушения лесного пожара.

Библиографический список

1. Бартнев, И.М. Комбинированный лесопожарный грунтомет и рекомендации по его применению [Электронный ресурс] / И. М. Бартнев, М. В. Драпалюк, П. Э. Гончаров, М. А. Гнусов, А. А. Тамби, В. Е. Клубничкин // Политематический сетевой электронный научный журнал КубГАУ. – 2012. – № 84 (10). – С. 327-336. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2012/10/pdf/26.pdf>.
2. Гончаров П.Э., Лесопатрульный автомобиль на базе тяжелого грузового автомобиля повышенной проходимости [Текст] / П.Э. Гончаров, П.И. Попиков, М.А. Гнусов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2. № 2-2 (7-2). С. 64-69.
3. Мышкис А. Д. Элементы теории математических моделей. — 3-е изд., испр. — М.: КомКнига, 2007. — 192 с.
4. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем: учебное пособие – М.: Высш. шк., 1998. – 319 с.
5. Синеоков, Г. Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Г. Н. Синеоков, И. М. Панов – М. : Машиностроение, 1977. – 328 с.
6. Моделирование сельскохозяйственных агрегатов и их систем управления: учеб. для вузов / под ред. А. Б. Лурье. – Л.: Колос. Ленингр. отд-ние, 1979. – 312 с.
7. Щербаков, В.Ф. Энергосберегающие гидроприводы строительных и дорожных машин [Текст] / В.Ф. Щербаков // Строительные и дорожные машины журнал. – 2011. – №.11. – С. 1-3.
8. Fomin A.A., Gusev V.G., Yudin R.V., Timerbaev N.F. and Retyunskiy O.Yu. 2016 Mechanical treatment of raw waste lumber an effective way to preserve the ecology and resources *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **142**(1), 012091. DOI:10.1088/1757-899X/142/1/012091
9. Fomin A.A., Gusev V.G., Safin R.G. and Safin R.R. 2015 Dispersion of the margin removed in complex milling *Russian Engineering Research* **35**(6): 417-420. DOI:10.3103/S1068798X15060040
10. Drapalyuk M.V., Popikov P.I., Yudin R.V., Fomin A.A. and Chernukhin R.V. 2016 Modeling the digging process of tree root system by the mechanism with hydropulse drive *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **142**(1), 012090. DOI:10.1088/1757-899X/142/1/012090

References

1. I.M.Bartenev,. Combined forest fire grunto met and advice on how to use [electronic resource] /M.V.Drapalyuk,Goncharov P.E, GnosovM.A , A. Tambi, Klubnichkin V.E // multidisciplinary network KubGAU electronic scientific journal. - 2012. - № 84 (10). - S. 327-336. - Access: <http://ej.kubagro.ru/2012/10/pdf/26.pdf>.

2. Goncharov P.E., forest patrol car based on the heavy truck-terrain vehicle [Text] / Goncharov P.E., Popikov P.I., Gnusov M.A // Aktual-WIDE research trends of the XXI century: Theory and Practice. 2014. Т. 2. № 2-2 (7-2). S. 64-69.
3. Myshkis A.D. Elements of the theory of mathematical models. - 3rd ed.. - М.: KomKniga, 2007. - 192 p.
4. Sovetov B.J., Yakovlev S.A. Simulation Systems: Tutorial - М.: Higher. wk, 1998. -. 319.
5. The Sineokov, G.N. Theory and calculation of tillers / G.N.Sineokov, IM Panov - М: Mechanical engineering, 1977. - 328 p.
6. Modeling of agricultural units and their control systems: Proc. for universities / ed. AB Lurie. - L.: Kolos. Leningrad. Dep-tion, 1979. - 312 p.
7. Shcherbakov, V.F. Energy-saving hydraulic drives of building and road-tire ma [Text] / V.F.Shcherbakov // Construction and Road Machines magazine. - 2011. - №11. - P. 1-3.
8. Fomin A.A., Gusev V.G., Yudin R.V., Timerbaev N.F. and Retyunskiy O.Yu. 2016 Mechanical treatment of raw waste lumber an effective way to preserve the ecology and resources *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **142**(1), 012091. DOI:10.1088/1757-899X/142/1/012091
9. Fomin A.A., Gusev V.G., Safin R.G. and Safin R.R. 2015 Dispersion of the margin removed in complex milling *Russian Engineering Research***35**(6): 417-420. DOI:10.3103/S1068798X15060040
10. Drapalyuk M.V., Popikov P.I., Yudin R.V., Fomin A.A. and Chernukhin R.V. 2016 Modeling the digging process of tree root system by the mechanism with hydropulse drive *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **142**(1), 012090. DOI:10.1088/1757-899X/142/1/012090

Сведения об авторах

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

Гончаров Павел Эдуардович – доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кандидат технических наук, доцент, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: kafedramehaniza@mail.ru

Шаров Андрей Викторович – аспирант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: androsharo2014@.yandex.ru.

Information about author

Popikov Petr Ivanovich – Professor of Forestry Mechanization and Machine Design department, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», DSc in Technical, Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: popikovpetr@yandex.ru.

Goncharov Pavel Eduardovich - Associate Professor of Forestry Mechanization and Machine Design department, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», PhD in Technical Sciences, Voronezh, Russian Federation; e-mail: kafedramehaniza@mail.ru.;

Sharov Andrey Victorovich – postgraduate student of Forestry Mechanization and Machine Design department, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation; e-mail: androsharo2014@.yandex.ru.