

DOI: 10.15393/j2.art.2026.9503

УДК 630.377.44

Статья

Математическое моделирование движения корчевальных клыков корчевателя лесохозяйственной машины

Платонов Алексей Александрович

кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (Воронеж, Российская Федерация), raa7@rambler.ru

Коротких Владимир Николаевич

кандидат технических наук, исполнительный директор, ООО УК «Продимекс Агро» (Воронеж, Российская Федерация), korotkihvlad@mail.ru

Получена: 5 февраля 2026 / Принята: 29 июня 2026 / Опубликовано: 7 августа 2026

Аннотация: Одним из наиболее результативных способов расчистки полязащитных лесных полос и иных территорий от нежелательной древесно-кустарниковой растительности продолжает оставаться такой комплексный агротехнический и лесохозяйственный процесс, как выкорчёвывание. Актуальность исследования определяется необходимостью создания новых конструкций лесохозяйственных корчевателей, а также отсутствием современных отечественных и зарубежных научных работ, оценивающих степень воздействия окружающего пространства (почвенного слоя и корней растительности) на такую конструкцию. Целью исследования является разработка математической модели влияния моментов сил сопротивления движению корчевателя лесохозяйственной машины в процессе выполнения корчевания нежелательных деревьев и кустарников. Объект исследования представлял собой новый корчеватель с корчующими клыками и подрезающими пластинами, которые обеспечивают удаление нежелательных деревьев и кустарников с корневой системой и комом почвы. Установлены параметры корчующего клыка, критичные для эффективного удаления древесно-кустарниковой растительности. Представлены допущения, принятые для математического моделирования работы корчевателя. Показано, что момент сопротивления внедрению корчующих клыков корчевателя в почвенный слой зависит от свойств почвы, фактической глубины погружения рабочего органа (корчевателя) и его размеров. Определено, что момент сопротивления резанию почвы и корней подрезающими пластинами корчевателя зависит от

свойств почвенного слоя и корней удаляемой растительности (в т. ч. их количества), а также характеристик затупления режущей кромки подрезающего почвенно-растительную среду элемента. Выявлено, что момент сопротивления формированию кома почвы обусловлен прочностью почвенного слоя (в т. ч. его поверхности), усилием разрыва, излома и вытаскивания корней растительности. Получен закон движения корчевателя лесохозяйственной машины в зависимости от непрерывно изменяющихся условий его взаимодействия с почвенной средой и корнями удаляемой нежелательной древесно-кустарниковой растительности при любом положении корчевателя относительно уровня почвенного слоя. Представленная математическая модель позволит усовершенствовать конструктивные элементы корчевателя, а также выбрать наиболее энергоэффективные режимы его работы.

Ключевые слова: нежелательная растительность; выкорчёвывание; корчеватель; моделирование

DOI: 10.15393/j2.art.2026.9503

Article

Mathematical modeling of the rooter bit movement of a forestry machine uprooter

Aleksey Platonov

Ph. D. in engineering, associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Voronezh, Russian Federation), paa7@rambler.ru

Vladimir Korotkikh

Ph. D. in engineering, Executive Director, LLC UK Prodimex Agro (Voronezh, Russian Federation), korotkihvlad@mail.ru

Received: 5 February 2026 / Accepted: 29 Jun 2026 / Published: 7 August 2026

Abstract: One of the most effective methods of clearing shelterbelts and other areas of unwanted tree and shrub vegetation such as uprooting remains a complex agricultural and forestry process. The relevance of the study is determined by the need to create new designs of a forestry uprooter, as well as the lack of modern domestic and foreign scientific works assessing the degree of impact of the surrounding area (soil layer and vegetation roots) on such a design. The aim of the study was to develop a mathematical model of the influence of resistance forces moments to the movement of a forestry uprooter in the process of uprooting unwanted trees and shrubs. The object of the study was a new uprooter design with rooter bits and pruning plates that ensure the removal of unwanted trees and shrubs with a root system and a root ball. The authors have established the parameters of the uprooting bit that are critical for the effective removal of woody and shrubby vegetation. The assumptions adopted for mathematical modeling of the operation of the uprooter are presented. It is shown that the moment of resistance to the penetration of the uprooting fangs of the uprooter into the soil layer depended on the properties of the soil, the depth of immersion of the working element (uprooter) and its dimensions. It has been determined that the moment of resistance to cutting of the soil and roots by the cutting plates of the uprooter depended on the properties of the soil layer and the roots of the vegetation being removed (including their quantity), as well as on the characteristics of the cutting edge blunting of the element cutting the soil-plant environment. It was found that the moment of resistance to the formation of a soil crumb was determined by the strength of the soil layer (including its surface), the force of rupture, fracture and pulling out of vegetation roots. The law of motion of a forestry machine's uprooter was obtained depending on the continuously changing conditions of

its interaction with the soil environment and the roots of the removed unwanted tree and shrub vegetation at any position of the uprooter relative to the soil layer level. The presented mathematical model will allow us to improve the design elements of the rooting machine, as well as select the most energy-efficient modes of its operation.

Keywords: unwanted vegetation; uprooting; uprooter; modeling

1. Введение

В настоящее время для лесного хозяйства страны немаловажным направлением развития продолжает оставаться совершенствование агролесных систем, призванных обеспечить бесперебойное и рациональное управление различными отраслями промышленного и сельскохозяйственного производства нашей страны. К таким агролесным системам относятся, в частности, полезащитные лесополосы, выполняющие защиту сельхозугодий от ветровой эрозии, обеспечивающие снижение испарения влаги, улучшение микроклимата, удержание снега и, как следствие, повышение урожайности. Полезащитные лесополосы, различаемые по своей структуре, видовому составу деревьев и кустарников, а также особенностям размещения, требуют периодического ухода (в частности, обрезки, удаления больных или поваленных деревьев), при этом обязанность по содержанию указанных лесополос лежит на землепользователях. При несоблюдении сроков ухода за лесополосами они (а также прилегающая территория) в силу естественных причин зарастают нежелательной древесно-кустарниковой растительностью, требующей в конечном итоге своего удаления.

Несмотря на широкий арсенал технологий и механизированных решений для удаления нежелательной древесно-кустарниковой растительности (НДКР) [1], по-прежнему сохраняет свои позиции такой результативный способ расчистки территорий от нежелательной поросли, как выкорчёвывание — это комплексный агротехнический и лесохозяйственный процесс, направленный на полное удаление пней и корневых систем деревьев и кустарников после их вырубki, либо одновременное удаление надземных частей и корневых систем нежелательной растительности (фото 1).



Фото 1. Расчистка полезащитной лесополосы методом выкорчёвывания [фото авторов]

Photo 1. Clearing a forest shelterbelt by uprooting

Принимая во внимание восстановление структуры полезащитных лесополос с обеспечением возможности проведения пересадки молодых саженцев в уплотнённые ряды, общего улучшения доступа к указанным лесополосам для лесохозяйственной и аграрной техники, а также расширения полезных площадей для их удобрения, посева трав или иных культур, актуальным представляется вопрос совершенствования конструкций лесохозяйственных корчевателей.

Выполненным анализом работ российских и зарубежных авторов на рассматриваемую тему было установлено, что российские учёные уделяют основное внимание разработке и совершенствованию конструкций как новых, так и модернизированных корчевальных агрегатов [2], [3]. Цель этих исследований — минимизировать динамическое воздействие на базовый трактор и его манипулятор в процессе удаления нежелательной растительности, а также повысить эффективность систем управления и общую надёжность оборудования [4—6]. Создаваемые отечественной наукой корчеватели относятся преимущественно к позиционным. Их принцип действия заключается в однократном воздействии на ствол дерева или кустарника за один цикл работы трактора, что обеспечивает удаление единичных экземпляров нежелательной растительности. Созданные целым рядом исследователей математические модели позволяют осуществлять симуляцию взаимодействия почвы и корневой системы нежелательных деревьев [7], [8], анализировать процесс извлечения корневой системы [9], а также определять критические вертикальные усилия, прикладываемые к стволу (стволам) нежелательной растительности, в т. ч. с учётом вибрационной нагрузки [10], [11], которая приводит к разрыву питающих корней и отрыву основных корней от грунта. Кроме того, ключевым аспектом исследований отечественной науки является всесторонняя оценка экономической эффективности целесообразности внедрения рекомендованных технологий корчевания [12—14].

Международная практика преимущественно ориентирована на целостное удаление нежелательных деревьев и кустарника, при котором надземная и корневая системы извлекаются одновременно. Данный метод реализуется в рамках единого технологического цикла путём приложения усилия на некотором удалении от ствола для оптимизации технологического процесса [15]. При этом отметим, что научная мысль современных зарубежных исследователей направлена, в основном, на оценку производительности созданных корчевателей (например, [16]), в т. ч. выявление экономической целесообразности их использования [1], [18] и качества выполняемых работ [19].

Обзор литературы в целом продемонстрировал перспективность создания нового типа корчевателя лесохозяйственной машины, характеризующегося максимально возможной шириной захвата. При этом установлено, что теоретические аспекты функционирования и проектирования таких устройств изучены неполно, что диктует потребность в их углублённом исследовании, в частности, с использованием аппарата математического моделирования.

Целью исследования является разработка математической модели влияния моментов сил сопротивления движению корчевателя лесохозяйственной машины в процессе выполнения корчевания нежелательной древесно-кустарниковой растительности.

2. Материалы и методы

При создании математической модели процесса удаления нежелательной растительности требовалось учесть геометрические параметры нового корчевателя, физико-механические характеристики древесных стволов и их корневых систем, а также динамику взаимодействия корчевателя с грунтом.

Объект исследования представлял собой корчеватель ККВ-5 (фото 2), разработанный и созданный по чертежам и под руководством В. Н. Коротких, обеспечивающий удаление (выкорчёвывание) экземпляров нежелательной растительности (как взрослых деревьев, так и кустарника, мелкокося, подлеска или поросли) с корневой системой и комом (или без кома) почвы [20]. Корчеватель характеризуется определённым количеством корчующих клыков (а именно шесть) и наличием подрезающих пластин, обеспечивающих перерезание корней нежелательной растительности.



Фото 2. Корчеватель нежелательной растительности ККВ-5 [фото авторов]

Photo 2. Uprooter of unwanted vegetation KKV-5

Предметом исследования являлась математическая модель воздействия корчующих клыков и подрезающих пластин корчевателя ККВ-5 на почвенный слой и корни удаляемой растительности с учётом параметров корчевателя, почвенной среды и указанной растительности.

Для достижения поставленной цели использовались методы математического моделирования, а именно кинематический (для учёта траектории движения корчующих клыков корчевателя), динамический (для учёта устойчивости почвенных слоёв и корней удаляемой растительности).

3. Результаты

В ходе работ по удалению нежелательной древесно-кустарниковой растительности методом корчевания производится извлечение одновременно нескольких экземпляров нежелательной растительности (включая взрослые деревья и кустарники) вместе с их корневой системой и прилегающим комом почвы. Основным элементом созданного корчевателя является его корчующий клык, расчётная схема которого представлена на рисунке 1.

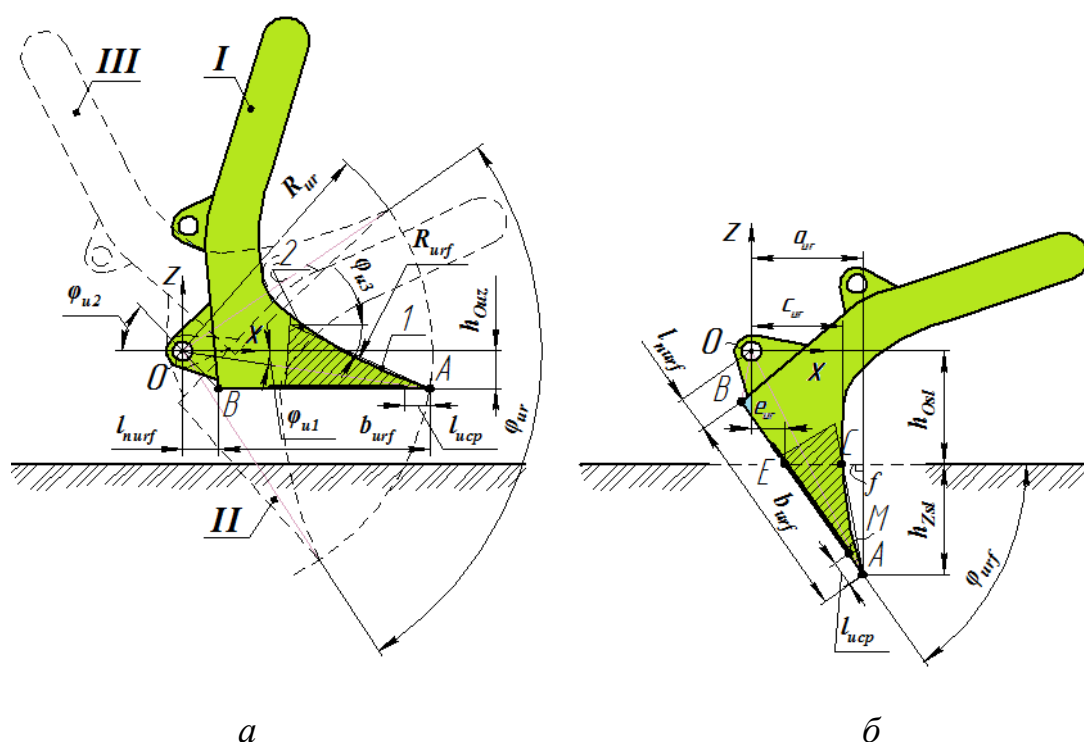


Рисунок 1. Расчётная схема корчующего клыка корчевателя [рисунок авторов]

Figure 1. Calculation scheme of the uprooting fang of the uprooter

Конструктивными параметрами корчующего клыка корчевателя, оказывающими непосредственное влияние на эффективность выполнения корчевателем работы по удалению нежелательной древесно-кустарниковой растительности, являются: b_{urf} — длина подошвы корчевателя, мм; t_{urf} — толщина корчующего клыка, мм; l_{nurf} — расстояние от точки поворота корчевателя до подошвы корчевателя, мм; h_{Ouz} — высота расположения подошвы корчевателя относительно точки его поворота, мм; R_{urf} — радиус скругления корчующего клыка, мм; R_{ur} — радиус поворота крайней точки корчующего клыка, мм; l_{ucp} — расстояние до режущей кромки подрезающей пластины, мм; t_{ucp} — толщина подрезающей пластины, мм; B_{ucp} — ширина подрезающей пластины между корчующими клыками, мм; φ_{ur} — максимальный угол поворота крайней точки корчующего клыка, град.;

φ_{u1} — угол начального расположения радиус-вектора крайней точки корчующего клыка, град.; φ_{u2} — угол начального расположения радиус-вектора начальной точки корчующего клыка, град.; φ_{u3} — угол начального расположения стороны площади погружения корчующего клыка в почву, град. Технологическими параметрами работы корчевателя при выкорчёвывании нежелательной растительности являются: h_{Osl} — высота расположения точки поворота корчевателя, мм; h_{Zsl} — глубина внедрения корчующего клыка в почвенный слой, мм; φ_{urf} — угол поворота корчевателя, град.

В ходе выполнения математического моделирования работы корчевателя были приняты следующие допущения:

- физико-механические характеристики почвенного слоя одинаковы во всём объёме корчевания нежелательной растительности;
- скорость движения трактора в момент внедрения корчующих клыков корчевателя в почву равна нулю ($v_{mp} = 0$ м/с);
- в момент внедрения корчующих клыков в почву профиль указанных клыков испытывает преимущественное сопротивление сжатия от почвенных слоёв;
- в момент выкорчёвывания нежелательной растительности профиль корчующих клыков испытывает преимущественное сжатие от сопротивления корневой системы указанной растительности;
- опорные точки подошвы корчевателя (точки A и B) лежат на одной прямой;
- подрезающие пластины корчевателя представляют собой в продольном и поперечном сечениях прямоугольник.

Движение основных элементов корчевателя (а именно корчевальных клыков) во время выполнения ими корчевальной работы представляет собой вращательное движение вокруг неподвижной оси Oy системы координат $Oxyz$. При этом уравнение движения корчевателя можно записать в следующем виде [21]:

$$I_{Oy}\ddot{\varphi}_{urf} = M_{Oy}(\vec{P}_{zu}) + M_{Oy}(\vec{G}_k) + \tilde{M}_{Oy}, \quad (1)$$

где I_{Oy} — момент инерции корчевального клыка относительно оси Oy ; φ_{urf} — угол поворота корчевателя; $M_{Oy}(\vec{P}_{zu})$ — движущий момент относительно оси Oy от силы давления $\vec{P}_{zu}$, создаваемой в гидроцилиндре привода поворота корчевателя; $M_{Oy}(\vec{G}_k)$ — момент сопротивления относительно оси Oy от веса $\vec{G}_k$ корчевателя; $\tilde{M}_{Oy}$ — главный момент сил сопротивления движению корчевателя, являющийся нелинейной функцией угла поворота φ_{urf} .

Для определения величин вышеприведённого момента $\tilde{M}_{Oy}$, значения которого динамически изменяются в процессе выполнения корчевальной работы, выполним исследование отдельных моментов сопротивления движению корчевальных клыков.

3.1. Определение момента сопротивления внедрения корчующих клыков корчевателя в почвенный слой

При выполнении корчевальной работы корчующие клыки совершают возвратно-вращательное движение в плоскости OYZ (см. рисунок 1, *a*), поворачиваясь из начального (транспортного) положения I в положения II (выкорчёвывания нежелательной растительности) или III (перемещения выкорчёванной растительности). Положение корчующего клыка определяется его радиус-вектором OA , совершающим поворот на угол φ_{ur} при величине радиуса поворота характерной точки A , равным R_{ur} .

Момент $M_{oy}(\vec{P}_{urw})$ (Н·м) действия силы $\vec{P}_{urw}$ относительно оси Oy определим, учитывая поворот корчующего клыка корчевателя на угол φ_{urf} и плечо действия данной силы R_{Purw} :

$$M_{oy}(\vec{P}_{urw}) = P_{urw} \cdot R_{Purw}. \quad (2)$$

Результирующая сила давления $\vec{P}_{urw}$ (Н), приложенная от почвы к середине рабочей поверхности AC корчующего клыка (см. рисунок 1, *b*), определится как:

$$P_{urw} = S_{urfw} \cdot \sigma_n = h_{Zsl} \cdot t_{urf} \cdot \sigma_n / \sin(\varphi_{u3} + \varphi_{urf}), \quad (3)$$

где S_{urfw} — рабочая площадь корчующего клыка, воздействующая на почвенный слой, мм²; σ_n — удельное сопротивление почвы вдавливанию корчующего клыка, МПа.

Плечо R_{Purw} действия силы $\vec{P}_{urw}$ определится с учётом углов φ_{u1} и φ_{u3} (рисунок 2, *a*) и длины L_{AC} отрезка AC :

$$R_{Purw} = OA - \varsigma_1 = \sqrt{(l_{nurf} + b_{urf})^2 + h_{Ouz}^2} - \frac{L_{AC} \cdot \sin(\varphi_{u3} + \varphi_{urf})}{2 \cdot \sin(\varphi_{u1} + \varphi_{urf})}. \quad (4)$$

Окончательно, момент $M_{oy}(\vec{P}_{urw})$ (Н·м) действия силы $\vec{P}_{urw}$ относительно оси Oy для одного корчевального клыка определится как:

$$M_{oy}(\vec{P}_{urw}) = \frac{h_{Zsl} \cdot t_{urf} \cdot \sigma_n}{\sin(\varphi_{u3} + \varphi_{urf}) \cdot 10^3} \cdot \left(\sqrt{(l_{nurf} + b_{urf})^2 + h_{Ouz}^2} - \frac{h_{Zsl}}{2 \cdot \sin(\varphi_{u1} + \varphi_{urf})} \right). \quad (5)$$

Таким образом, величина момента $M_{oy}(\vec{P}_{urw})$ от действия силы давления $\vec{P}_{urw}$ (Н), приложенной от почвы к середине рабочей поверхности корчующего клыка, может быть определена при любом положении корчевателя относительно уровня почвенного слоя. При этом выявлено, что величина указанного момента сопротивления выкорчёвыванию нежелательной растительности зависит от свойств почвенного слоя, глубины погружения рабочего органа (корчевателя) и его размеров.

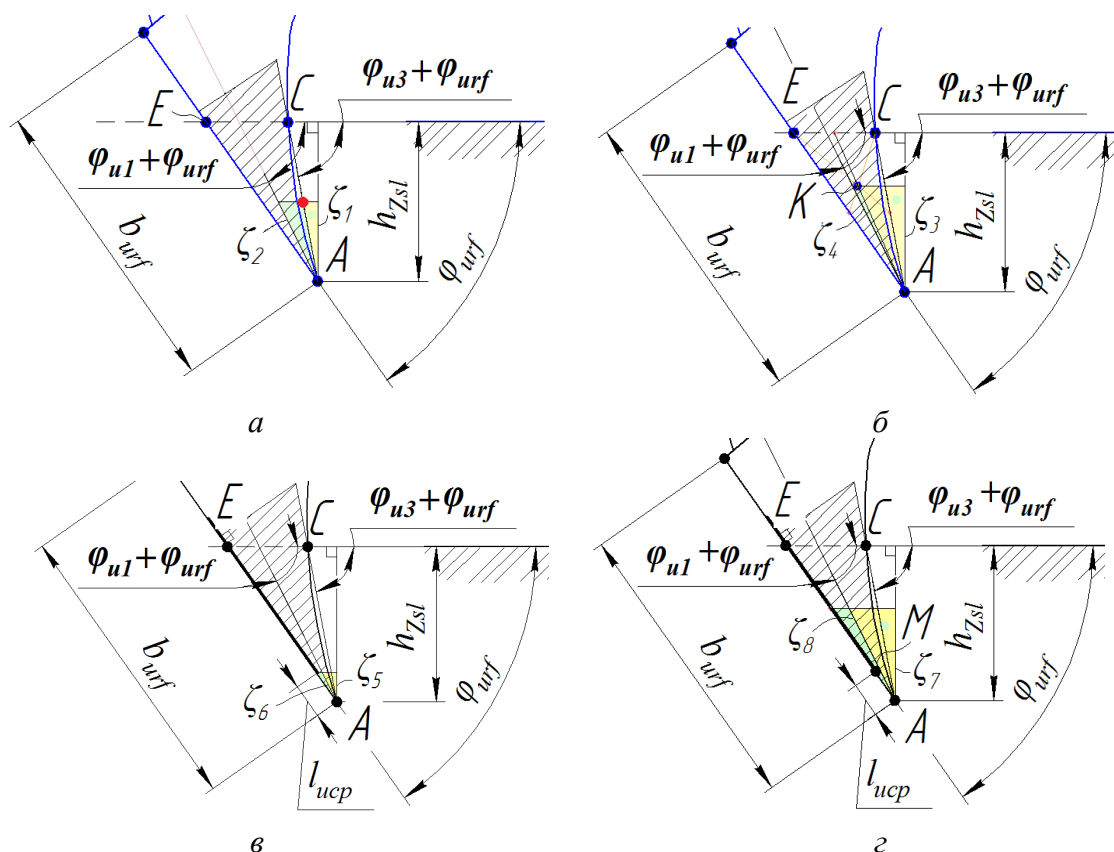


Рисунок 2. Расчётные схемы к определению плеч от действия сил давления:
 $a — \vec{P}_{urw}$; $б — \vec{P}_{urt}$; $в — \vec{P}_{ursr}$; $г — \vec{P}_{ursd}$ [рисунок авторов]

Figure 2. Calculation schemes for determining the shoulders from the action of pressure forces: $a — \vec{P}_{urw}$; $б — \vec{P}_{urt}$; $в — \vec{P}_{ursr}$; $г — \vec{P}_{ursd}$

Момент $M_{oy}(\vec{P}_{urt})$ (Н·м) действия силы $\vec{P}_{urt}$ относительно оси Oy определим, учитывая поворот корчующего клыка корчевателя на угол φ_{urf} и плечо действия данной силы R_{Purt} :

$$M_{oy}(\vec{P}_{urt}) = P_{urt} \cdot R_{Purt}. \quad (6)$$

Результирующая сила давления $\vec{P}_{urt}$ (Н) от почвы, приложенная к двум боковым поверхностям AEC одного корчующего клыка (см. рисунок 1, б), определится как:

$$P_{urt} = f \cdot S_{urf} \cdot \tau_n = 2 \cdot f \cdot \tau_n \cdot \left(\int_{e_{ur}}^{a_{ur}} z_{AB} dx - \int_{c_{ur}}^{a_{ur}} z_{AC} dx \right), \quad (7)$$

где S_{urf} — боковая площадь погружения корчующего клыка в почву (мм^2), определяемая уравнениями прямых $z_{AB} = f(x)$ и $z_{AC} = f(x)$ для подошвы и поверхности корчующего

клыка; τ_n — удельное сопротивление почвы перемещению корчующего клыка, МПа, f — коэффициент трения скольжения пары «почва — металл».

Плечо R_{Purt} действия силы $\vec{P}_{urt}$ определится с учётом углов φ_{u1} и φ_{u3} (рисунок 2, б) и длины L_{AK} отрезка AK :

$$R_{Purt} = OA - \zeta_4 = \sqrt{(l_{nurf} + b_{urf})^2 + h_{Ouz}^2} - \frac{L_{AK} \cdot \sin(\varphi_{u3} + \varphi_{urf})}{\sin(\varphi_{u1} + \varphi_{urf})}. \quad (8)$$

Окончательно момент $M_{oy}(\vec{P}_{urt})$ (Н·м) действия силы давления $\vec{P}_{urt}$, приложенной от почвы к боковым поверхностям корчующего клыка, относительно оси Oy для одного корчевального клыка определится как:

$$M_{oy}(\vec{P}_{urt}) = \frac{2 \cdot f \cdot \tau_n \cdot S_{urf t}}{10^3} \cdot \left(\sqrt{(l_{nurf} + b_{urf})^2 + h_{Ouz}^2} - \frac{\sqrt{\left(\sqrt{(l_{nurf} + b_{urf})^2 + h_{Ouz}^2} \cdot \cos(\varphi_{u1} + \varphi_{urf}) - X_K \right)^2 - \frac{4}{9} h_{Zsl}^2 \cdot \sin(\varphi_{u3} + \varphi_{urf})}}{\sin(\varphi_{u1} + \varphi_{urf})} \right). \quad (9)$$

Таким образом, величина момента $M_{oy}(\vec{P}_{urt})$ от действия силы давления $\vec{P}_{urt}$ (Н), приложенной от почвы к боковым поверхностям корчующего клыка, может быть определена при любом положении корчевателя относительно уровня почвенного слоя. При этом выявлено, что величина указанного момента сопротивления выкорчёвыванию нежелательной растительности зависит от свойств почвенного слоя (в т. ч. коэффициента трения скольжения пары «почва — металл»), глубины погружения рабочего органа (корчевателя) и его размеров.

3.2. Определение момента сопротивления резанию подрезающими пластинами корчевателя почвы

При выполнении корчевальной работы осуществляется резание почвенных слоёв (с находящимися в ней корневыми системами удаляемой растительности) предусмотренными для этих целей в корчевателе подрезающими пластинами.

Момент $M_{oy}(\vec{P}_{ur sr})$ (Н·м) действия силы $\vec{P}_{ur sr}$ относительно оси Oy определим, учитывая поворот корчующего клыка на угол φ_{urf} и плечо действия данной силы $R_{Pur sr}$:

$$M_{oy}(\vec{P}_{ur sr}) = P_{ur sr} \cdot R_{Pur sr}. \quad (10)$$

Величина силы $P_{ur sr}$ (Н) сопротивления резанию почвенных слоёв и корней удаляемой растительности определится как:

$$P_{ur sr} = \sigma_{ps} \cdot \left(B_{ucp} - \sum_{i=1}^{n_k} d_{\kappa_i} \right) \cdot t_{ucp}(t) + \sigma_{pr} \cdot \sum_{i=1}^{n_k} d_{\kappa_i} \cdot t_{ucp}(t), \quad (11)$$

где σ_{ps} и σ_{pr} — соответственно удельные сопротивления резанию почвенного слоя и корней удаляемой растительности, Н/мм²; $t_{ucp}(t)$ — функция изменения во времени толщины (мм) подрезающей пластины.

Плечо $R_{Pur sr}$ действия силы $\vec{P}_{ur sr}$ определится с учётом углов φ_{u1} и φ_{urf} (рисунок 2, в) и расстояния l_{ucp} до режущей кромки подрезающей пластины:

$$R_{Pur sr} = OA - \varsigma_6 = \sqrt{(l_{nurf} + b_{urf})^2 + h_{Ouz}^2} - \frac{l_{ucp} \cdot \sin \varphi_{urf}}{\sin(\varphi_{u1} + \varphi_{urf})}. \quad (12)$$

Окончательно момент $M_{oy}(\vec{P}_{ur sr})$ (Н·м) действия силы $\vec{P}_{ur sr}$ сопротивления резанию почвенных слоёв и корней удаляемой растительности относительно оси Oy для одной подрезающей пластины определится как:

$$M_{oy}(\vec{P}_{ur sr}) = \left(\sigma_{ps} \cdot \left(B_{ucp} - \sum_{i=1}^{n_k} d_{\kappa_i} \right) \cdot t_{ucp}(t) + \sigma_{pr} \cdot \sum_{i=1}^{n_k} d_{\kappa_i} \cdot t_{ucp}(t) \right) \times \\ \times \left(\sqrt{(l_{nurf} + b_{urf})^2 + h_{Ouz}^2} - \frac{l_{ucp} \cdot \sin \varphi_{urf}}{\sin(\varphi_{u1} + \varphi_{urf})} \right) / 10^3. \quad (13)$$

Момент $M_{oy}(\vec{P}_{ur sd})$ (Н·м) действия силы $\vec{P}_{ur sd}$ относительно оси Oy определим, учитывая поворот корчующего клыка на угол φ_{urf} и плечо действия данной силы $R_{Pur sd}$:

$$M_{oy}(\vec{P}_{ur sd}) = P_{ur sd} \cdot R_{Pur sd}. \quad (14)$$

Величина силы $P_{ur sd}$ (Н) сопротивления сдвигу почвенно-растительных слоёв подрезающей пластиной корчевателя может быть определена по формуле

$$P_{ur sd} = K_{cut} \cdot B_{ucp} \cdot h_{Zsl} \cdot (1 + \mu \cdot \rho_{cut}), \quad (15)$$

где K_{cut} — удельное сопротивление перемещению почвенных слоёв блокированному резанию; μ — коэффициент трения почвенных слоёв по стали; ρ_{cut} — соотношение вертикальной и горизонтальной составляющих сопротивления резанию.

Плечо $R_{Pur sd}$ действия силы $\vec{P}_{ur sd}$ определится с учётом углов φ_{u1} и φ_{urf} (рисунок 2, з) и длины L_{ME} отрезка ME . Окончательно момент $M_{oy}(\vec{P}_{ur sd})$ (Н·м) действия силы $\vec{P}_{ur sd}$ сопротивления сдвигу почвенных слоёв с остатками корневых систем растительности относительно оси Oy для одной подрезающей пластины определится как:

$$M_{oy}(\vec{P}_{ur sd}) = \frac{K_{cut} \cdot B_{ucp} \cdot h_{Zsl} \cdot (1 + \mu \cdot \rho_{cut})}{10^3} \cdot \left(\sqrt{(l_{nurf} + b_{urf})^2 + h_{Ouz}^2} - \right. \\ \left. - \frac{\left(l_{ucp} + \sqrt{\left(\sqrt{(l_{nurf} + b_{urf})^2 + h_{Ouz}^2} \cdot \cos(\varphi_{u1} + \varphi_{urf}) - X_E \right)^2 - h_{Zsl}^2} \right) \cdot \sin \varphi_{urf}}{\sin(\varphi_{u1} + \varphi_{urf})} \right) \cdot \quad (16)$$

Таким образом, величины моментов $M_{oy}(\vec{P}_{ur sr})$ (Н·м) действия силы $\vec{P}_{ur sr}$ сопротивления резанию почвенных слоёв и корней удаляемой растительности и $M_{oy}(\vec{P}_{ur sd})$ (Н·м) действия силы $\vec{P}_{ur sd}$ сопротивления сдвигу почвенных слоёв с остатками корневых систем растительности могут быть определены при любом положении корчевателя относительно уровня почвенного слоя. При этом выявлено, что величины указанных моментов сопротивления выкорчёвыванию нежелательной растительности зависят от свойств почвенного слоя и корней удаляемой растительности (в т. ч. их количества), глубины погружения рабочего органа (корчевателя) и его размеров.

3.3. Определение момента сопротивления формированию кома почвы с выкорчёванной нежелательной растительностью

Момент $M_{oy}(\vec{P}_{ur vg})$ (Н·м) действия силы $\vec{P}_{ur vg}$ относительно оси Oy определим, учитывая поворот корчующего клыка на угол φ_{urf} и плечо действия данной силы R_{Purvg} :

$$M_{oy}(\vec{P}_{ur vg}) = P_{ur vg} \cdot R_{Purvg} \cdot \quad (17)$$

В общем случае сила $\vec{P}_{ur vg}$ (Н) сопротивления формированию кома почвы (с выкорчёванной нежелательной растительностью) обусловлена такими источниками, как прочность почвенного слоя (разрушение которого силой $P_{ur str}$ (Н) по некоторой границе влечёт за собой формирование оболочки (кома) почвы с находящейся внутри корневой системой выкорчёванной растительности), усилие F_{ppk} (Н) разрыва и излома корней нежелательной древесно-кустарниковой растительности, усилие F_{gmk} вытаскивания неразорвавшихся корней нежелательной растительности, суммарный вес G_{lsv} (Н) указанного кома почвы с весом ствола (сучьев, веток, листьев, хвои) данной растительности и усилие F_{nov} сопротивления поверхности почвенного слоя разрушению:

$$P_{ur vg} = P_{ur str} + F_{ppk} + F_{gmk} + G_{lsv} + F_{nov} \cdot \quad (18)$$

При этом ввиду своей обширности сведения об определении вышеуказанных усилий в данном исследовании не приводятся.

Плечо $R_{P_{ur\,vg}}$ действия силы $\vec{P}_{ur\,vg}$, определяемое с учётом углов φ_{u1} и φ_{u3} (см. рисунок 1, а) и длины L_{AC} отрезка AC (см. рисунок 1, б; на середине которого приложена данная сила), численно равно плечу $R_{P_{ur\,w}}$ действия силы давления $\vec{P}_{ur\,w}$ (4).

4. Обсуждение и заключение

Принимая во внимание выполненные теоретические исследования корчевателя лесохозяйственной машины, движение основных элементов корчевателя (а именно корчевальных клыков) во время выполнения ими корчевальной работы определится следующим образом:

$$\sum_{j_{rf}}^n I_{oy} \ddot{\varphi}_{urf} = M_{oy}(\vec{P}_{z\varphi}) + M_{oy}(\vec{G}_k) + \sum_{j_{rf}}^n M_{oy}(\vec{P}_{ur\,w}) + \\ + \sum_{j_{rf}}^n M_{oy}(\vec{P}_{ur\,t}) + \sum_{i_{rf}}^{n-1} M_{oy}(\vec{P}_{ur\,sr}) + \sum_{i_{rf}}^{n-1} M_{oy}(\vec{P}_{ur\,sd}) + \sum_{j_{rf}}^n M_{oy}(\vec{P}_{ur\,vg}), \quad (19)$$

где $\sum I_{oy}$ — суммарный момент инерции корчевальных клыков относительно оси Oy ; φ_{urf} — угол поворота корчевателя; $M_{oy}(\vec{P}_{z\varphi})$ — движущий момент относительно оси Oy от силы давления $\vec{P}_{z\varphi}$, создаваемой в гидроцилиндре привода поворота корчевателя; $M_{oy}(\vec{G}_k)$ — момент сопротивления относительно оси Oy от веса $\vec{G}_k$ корчевателя; $M_{oy}(\vec{P}_{ur\,w})$ — момент сопротивления от действия силы давления $\vec{P}_{ur\,w}$ (Н), приложенной от почвы к середине рабочей поверхности корчующего клыка; $M_{oy}(\vec{P}_{ur\,t})$ — момент сопротивления от действия силы давления $\vec{P}_{ur\,t}$, приложенной от почвы к боковым поверхностям корчующего клыка; $M_{oy}(\vec{P}_{ur\,sr})$ — момент сопротивления от действия силы $\vec{P}_{ur\,sr}$ резания почвенных слоёв и корней удаляемой растительности; $M_{oy}(\vec{P}_{ur\,sd})$ — момент сопротивления от действия силы $\vec{P}_{ur\,sd}$ сдвига почвенных слоёв с остатками корневых систем растительности; $M_{oy}(\vec{P}_{ur\,vg})$ — момент сопротивления от действия силы $\vec{P}_{ur\,vg}$ формирования кома почвы с выкорчёванной нежелательной растительностью; j_{rf} — текущий номер корчевального клыка при общем их количестве, равным n ; i_{rf} — текущий номер подрезающей пластины корчевателя.

По результатам проведённых исследований можно сделать следующие выводы:

1. Предложенная математическая модель позволяет получить закон движения корчевателя лесохозяйственной машины в зависимости от непрерывно изменяющихся условий его взаимодействия с почвенной средой и корнями удаляемой нежелательной древесно-

кустарниковой растительности при любом положении корчевателя относительно уровня почвенного слоя.

2. Выявленные моменты сил сопротивления движению корчевателя учитывают физико-механические характеристики почвенного слоя (удельное сопротивление почвы, в т. ч. перемещение её слоёв при воздействии корчевальных клыков) и корней удаляемой растительности (в т. ч. их вида и количества), стохастичность образования кома почвы, нестационарное и случайное распределение величин удельного сопротивления резанию вдоль режущих кромок подрезающих корни и почву пластин корчевателя, массу надземной и подземной частей выкорчёванной растительности.

3. Полученное нелинейное дифференциальное уравнение (19) может быть решено с использованием численных методов. Анализ решения позволит усовершенствовать конструктивные элементы корчевателя, а также выбрать наиболее энергоэффективные режимы его работы.

Список литературы

1. Платонов А. А. Технологические процессы удаления нежелательной растительности различными средствами механизации // Resources and Technology. 2017. Т. 14, № 2. С. 33—48. DOI: 10.15393/j2.art.2017.3761.
2. Египко С. В. Клык корчевателя с зубчатой передней кромкой // Лесное хозяйство. 2008. № 6. С. 40—41.
3. Метод расчёта напряжений клыков корчевателя пней / С. Н. Орловский, А. И. Карнаухов, В. А. Соколова [и др.] // Лесозэксплуатация и комплексное использование древесины: Сб. ст. Всерос. научно-практич. конф. Красноярск: Сибир. гос. ун-т науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнева, 2023. С. 97—102.
4. Шегельман И. Р., Васильев А. С., Лукашевич В. М. Модернизация навесного корчевателя для ухода за лесом // Перспективы науки. 2020. № 7 (130). С. 63—65.
5. Оптимизация компоновочных параметров несущей системы корчевателя / Н. А. Фоменко, О. В. Бурлаченко, С. А. Чебанова [и др.] // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. № 3 (88). С. 176—185.
6. Совершенствование механизма управления режущего аппарата корчевателя / Н. А. Фоменко, О. В. Бурлаченко, А. А. Ляшенко [и др.] // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. № 5 (93). С. 82—89.
7. Драпалюк М. В., Афоничев Д. Н., Раецкая Е. В. Математическое моделирование взаимодействия рычажного корчевателя с пнём и почвой // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 77. С. 202—213.
8. Прядкин В. И., Бартнев И. М., Посметьев В. В. Моделирование процесса корчевания деревьев самоходной машиной на основе метода динамики частиц // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9, № 4 (36). С. 151—161. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.4/17.
9. Савич В. Л., Хегай В. К. Определение силы корчевания пня в зависимости от породы дерева // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2010. № 193. С. 163—171.

10. Михитаров А. Р., Савич В. Л., Хегай В. К. К вопросу оптимизации динамических характеристик виброкорчевальной машины // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018. Т. 45, № 2. С. 149—157. DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-149-157.
11. Михитаров А. Р., Добрынин Ю. А. Совершенствование технологического оборудования лесохозяйственной машины с манипулятором для корчевания с применением вибрации // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. № 247. С. 252—263. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.247.252-263.
12. Египко С. В., Долматов Н. П. Экономическая эффективность применения технологии корчевания одиночных пней комбинированным способом // Вестник Южно-Российского государственного технического университета (НПИ). Серия: Социально-экономические науки. 2020. Т. 13, № 2. С. 40—46. DOI: 10.17213/2075-2067-2020-2-40-46.
13. Египко С. В., Долматов Н. П. Сравнительный анализ корчевания одиночных пней рабочим оборудованием на базе экскаватора одноковшового // Инженерный вестник Дона. 2023. № 12 (108). С. 573—580.
14. Хегай В. К., Михитаров А. Р. Сравнение экономической эффективности способов валки деревьев — без корневой системы и с корневой системой // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2021. № 59. С. 274—276.
15. On the Uprooting Stability of Trees: Combined Loading Effect on Tree Stability Assessment / M. Andreozzi, G. Marrazzo, A. Marsiglia [et al.] // Forests. 2025. Vol. 16. P. 1780. DOI: 10.3390/f16121780.
16. Srinidhi G., Sushilendra S. S., Vijayakumar P. Performance Evaluation of Tractor Operated Cotton Stalk Shredder Cum Uprooter // International Journal of Environment and Climate Change. 2023. Vol. 13 (11). P. 3266—3279. DOI: 10.9734/ijecc/2023/v13i113499.
17. Hallongren H., Rantala J. A search for better competitiveness in mechanized early cleaning through product development: evaluation of two Naarva uprooters // International Journal of Forest Engineering. 2013. Vol. 24. P. 91—100. DOI: 10.1080/14942119.2013.841930.
18. Cost Economics of Cotton Uprooter cum Shredder / K. Yadav, A. Kumar, K. Reddy [et al.] // Ecology, Environment and Conservation. 2023. Vol. 29. P. 60—64. DOI: 10.53550/EEC.2023.v29i02s.012.
19. Saksa T., Miina J., Luukkonen O. Uprooting as a pre-commercial thinning operation in young Norway spruce stands // Silva Fennica. 2023. Vol. 57. DOI: 10.14214/sf.22027.
20. Патент № 2850883 С1 Российская Федерация, МПК А01G 23/06. Корчеватель: заявл. 05.07.2025; опубл. 17.11.2025 / Коротких В. Н., Драпалюк М. В., Платонов А. А. [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова».
21. Дручинин Д. Ю., Дорняк О. Р., Драпалюк М. В. Математическая модель взаимодействия рабочего органа выкопчной машины с почвой и корнями растений // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2011. № 68. С. 51—67.

References

1. Platonov A. A. Technological processes for removing unwanted vegetation using various mechanization means. *Resources and Technology*, 2017, vol. 14, no. 2, pp. 33—48. doi: 10.15393/j2.art.2017.3761. (In Russ.)
2. Egipko S. V. Stump puller fang with a serrated front edge. *Forestry*, 2008, no. 6, pp. 40—41. (In Russ.)

3. Orlovsky S. N., Karnaukhov A. I., Sokolova V. A., Teppoev A. V., Mirzoeva M. R. Method for calculating the stresses of the stump extractor fangs. *Forest exploitation and complex use of wood: Collection of articles from the All-Russian scientific and practical conference*. Krasnoyarsk, Siberian State University of Science and Technology named after Academician M. F. Reshetnev, 2023, pp. 97—102. (In Russ.)
4. Shegelman I. R., Vasiliev A. S., Lukashevich V. M. Modernization of a mounted stump puller for forest maintenance. *Prospects of Science*, 2020, no. 7 (130), pp. 63—65. (In Russ.)
5. Fomenko N. A., Burlachenko O. V., Chebanova S. A., Medvedeva V. V. Optimization of the Layout Parameters of the Load-Bearing System of a Stump Puller. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*, 2022, no. 3 (88), pp. 176—185. (In Russ.)
6. Fomenko N. A., Burlachenko O. V., Lyashenko A. A., Chebanova S. A., Rastiapina O. A. Improving the Control Mechanism of the Cutting Bar of a Stump Puller. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*, 2023, no. 5 (93), pp. 82—89. (In Russ.)
7. Drapalyuk M. V., Afonichev D. N., Raetskaya E. V. Mathematical Modeling of the Interaction of a Lever Stump Puller with a Stump and Soil. *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*, 2012, no. 77, pp. 202—213. (In Russ.)
8. Pryadkin V. I., Bartenev I. M., Posmetyev V. V. Modeling the process of tree uprooting by a self-propelled machine based on the particle dynamics method. *Forest Engineering Journal*, 2019, vol. 9, no. 4, pp. 151—161. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2019.4/17. (In Russ.)
9. Savich V. L., Khegay V. K. Determining the Stump Uprooting Force Depending on the Tree Species. *Bulletin of the Saint Petersburg Forest Engineering Academy*, 2010, no. 193, pp. 163—171. (In Russ.)
10. Mikhitarov A. R., Savich V. L., Khegay V. K. On the Optimization of the Dynamic Characteristics of a Vibratory Stump-Removing Machine. *Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical Sciences*, 2018, vol. 45, no. 2, pp. 149—157. doi: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-149-157. (In Russ.)
11. Mikhitarov A. R., Dobrynin Yu. A. Improving the Technological Equipment of a Forestry Machine with a Manipulator for Uprooting Using Vibration. *Bulletin of the Saint Petersburg Forest Engineering Academy*, 2024, no. 247, pp. 252—263. doi: 10.21266/2079-4304.2024.247.252-263. (In Russ.)
12. Egipko S. V., Dolmatov N. P. Economic Efficiency of Using a Combined Method of Single Stump Pulling. *Bulletin of the South-Russian State Technical University (NPI). Series: Social and Economic Sciences*, 2020, vol. 13, no. 2, pp. 40—46. doi: 10.17213/2075-2067-2020-2-40-46. (In Russ.)
13. Egipko S. V., Dolmatov N. P. Comparative Analysis of Single Stump Removal with Working Equipment Based on a Single-Bucket Excavator. *Engineering Bulletin of the Don*, 2023, no. 12 (108), pp. 573—580. (In Russ.)
14. Khegay V. K., Mikhitarov A. R. Comparison of the economic efficiency of tree felling methods — without the root system and with the root system. *Actual problems of the forest complex*, 2021, no. 59, pp. 274—276. (In Russ.)
15. Andreozzi M., Marrazzo G., Marsiglia A. [et al.]. On the Uprooting Stability of Trees: Combined Loading Effect on Tree Stability Assessment. *Forests*, 2025, vol. 16, p. 1780. doi: 10.3390/f16121780.
16. Srinidhi G., Sushilendra S. S., Vijayakumar P. Performance Evaluation of Tractor Operated Cotton Stalk Shredder Cum Uprooter. *International Journal of Environment and Climate Change*, 2023, vol. 13 (11), pp. 3266—3279. doi: 10.9734/ijec/2023/v13i113499.

17. Hallongren H., Rantala J. A search for better competitiveness in mechanized early cleaning through product development: evaluation of two Naarva uprooters. *International Journal of Forest Engineering*, 2013, vol. 24, pp. 91—100. doi: 10.1080/14942119.2013.841930.
18. Yadav K., Kumar A., Reddy K. [et al.]. Cost Economics of Cotton Uprooter cum Shredder. *Ecology, Environment and Conservation*, 2023, vol. 29, pp. 60—64. doi: 10.53550/EEC.2023.v29i02s.012.
19. Saksa T., Miina J., Luukkonen O. Uprooting as a pre-commercial thinning operation in young Norway spruce stands. *Silva Fennica*, 2023, vol. 57. doi: 10.14214/sf.22027.
20. Korotkikh V. N., Drapalyuk M. V., Platonov A. A. [et al.]. Patent no. 2850883 C1 Russian Federation, IPC A01G 23/06. Uprooter: declared 05.07.2025: published 17.11.2025; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forest Engineering University named after G. F. Morozov». (In Russ.)
21. Druchinin D. Yu., Dorniyak O. R., Drapalyuk M. V. Mathematical model of interaction of the working element of a digging machine with soil and plant roots. *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*, 2011, no. 68, pp. 51—67. (In Russ.)