



Научная статья

УДК 630*24:004.94

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-3-132-144

Инженерная модель ножевого катка для осветления лесных культур

Л.Д. Бухтояров[✉], канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAO-5129-2020](https://orcid.org/0000-0002-7428-0821),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7428-0821>

С.В. Малюков, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [N-2656-2016](https://orcid.org/0000-0003-2098-154X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2098-154X>

М.Н. Лысыч, канд. техн. наук; ResearcherID: [N-3089-2016](https://orcid.org/0000-0002-3764-3873),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова,
ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; vglt-a-mlx@yandex.ru,
malyukovsergey@yandex.ru, miklynea@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.11.24 / Одобрена после рецензирования 18.01.25 / Принята к печати 23.01.25

Аннотация. Для выполнения осветления лесных культур необходимо применять механизированные средства, такие как ножевые катки. Обзор научной литературы показал, что отсутствие отечественных ножевых катков – значительная проблема при искусственном лесовосстановлении. Цель данного исследования заключается в обосновании технологических параметров ножевых катков с учетом их положения относительно поверхности почвы, а также уровня жесткости предохранительных пружин. Для разработки параметров новых типов орудий требуется использование современных программных средств, позволяющих учитывать все действующие на конструкцию факторы. С помощью систем автоматизированного проектирования создана 3-мерная твердотельная модель ножевого катка, которая стала объектом изучения. Обзор методов моделирования показал, что наиболее широко сегодня применяются подходы, базирующиеся на численных расчетах. Для осуществления расчетов применялся комплекс «Универсальный механизм 9.1», предназначенный для моделирования динамических и кинематических процессов в механических системах. С помощью названного программного комплекса была создана виртуальная модель ножевого катка, учитывающая взаимодействие звеньев машины и силы трения катка при контакте с грунтом. Проведен вычислительный эксперимент по установлению кинематических и динамических характеристик катка при разных уровнях жесткости предохранительных пружин и изменении высоты установки навески относительно поверхности почвы. Определены такие параметры, как траектория движения навески, тяговое усилие трактора и силы, возникающие в процессе взаимодействия катка с грунтом. На основе разработанных параметров был изготовлен опытный образец ножевого катка, который прошел лабораторные испытания в почвенном канале. В ходе экспериментов с использованием тензометрического оборудования измерены тяговые усилия, необходимые для работы орудия. Полученные данные подтвердили



точность предлагаемой имитационной модели, ее эффективность для дальнейшего проектирования и применения на практике.

Ключевые слова: ножевой каток, кинематика, динамика, имитационное моделирование, UMLab, САПР

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010/>.

Для цитирования: Бухтояров Л.Д., Малюков С.В., Лысыч М.Н. Инженерная модель ножевого катка для осветления лесных культур // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 3. С. 132–144. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-132-144>

Original article

An Engineering Model of a Knife Roller for Thinning Forest Crops

Leonid D. Bukhtoyarov[✉], Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAO-5129-2020](https://orcid.org/0000-0002-7428-0821), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7428-0821>

Sergey V. Malyukov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [N-2656-2016](https://orcid.org/0000-0003-2098-154X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2098-154X>

Mikhail N. Lysych, Candidate of Engineering; ResearcherID: [N-3089-2016](https://orcid.org/0000-0002-3764-3873),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; vgltla-mlx@yandex.ru[✉], malyukovsergey@yandex.ru, miklynea@yandex.ru

Received on November 27, 2024 / Approved after reviewing on January 18, 2025 / Accepted on January 23, 2025

Abstract. To carry out the thinning of forest crops, it is necessary to use mechanized means, such as knife rollers. The review of scientific literature has shown that the lack of domestic knife rollers is a significant problem in artificial reforestation. The aim of this study has been to substantiate the technological parameters of knife rollers, considering their position relative to the soil surface, as well as the level of rigidity of the safety springs. To develop the parameters of new types of tools, it is necessary to use modern software that allows taking into account all the factors affecting the design. Using computer-aided design systems, a 3-dimensional solid model of a knife roller has been created, which has become the object of study. A review of modeling methods has shown that the most widely used approaches today are those based on numerical calculations. To perform the calculations, the Universal Mechanism 9.1 complex has been used, designed for modeling dynamic and kinematic processes in mechanical systems. Using the named software package, a virtual model of a knife roller has been created, taking into account the interaction of the machine links and the friction force of the roller upon contact with the ground. A computational experiment has been conducted to establish the kinematic and dynamic characteristics of the roller at different levels of rigidity of the safety springs and a change in the height of the hitch installation relative to the soil surface. Parameters such as the trajectory of the hitch movement, the tractor traction force, and the forces arising during the interaction of the roller with the soil have been determined. Based on the developed parameters, a prototype of a knife roller has been manufactured, which has passed laboratory tests in a soil channel. In the course of experiments using strain gauge equipment, the traction forces required for the operation of the tool have been measured.

The data obtained have confirmed the accuracy of the proposed simulation model and its efficiency for further design and practical application.

Keywords: knife roller, kinematics, dynamics, simulation modeling, Umlab, CAD

Acknowledgements: The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation no. 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010/>.

For citation: Bukhtoyarov L.D., Malyukov S.V., Lysych M.N. An Engineering Model of a Knife Roller for Thinning Forest Crops. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 3, pp. 132–144. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-132-144>

Введение

Учитывая значительные темпы сокращения лесных площадей необходимо проводить искусственное лесовосстановление. Одним из этапов лесовосстановления является осветление лесных культур. Ручная вырубка заглушающих основные культуры насаждений обладает низкой производительностью, поэтому предпочтительно использовать механизированные орудия, в т. ч. ножевые катки, для разработки которых требуется обосновать их кинематические и динамические параметры [1].

Задача, рассмотренная в данной статье, заключается в том, чтобы предложить имитационную модель орудия – ножевого катка с предохранительными пружинами, предназначенного для проведения осветлений лесных культур. Для реализации этой задачи использованы методы имитационного моделирования.

Исследованиями опытного образца плуга и ножевого ротора как в почвенном канале, так и в полевых условиях занимались Ucgul Mustafa et al. [16–19]. Ими было установлено, что дискретно-элементное моделирование (DEM) имеет потенциал для прогнозирования сил обработки и движения почвы орудием. Получены тяговые усилия, вертикальная сила и движение почвы в поперечном направлении и в продольных плоскостях. Теоретическое и экспериментальное изучение ножевого катка выполнено Musabbir Abdullah et al., Ye S et al. [15, 20]. Обоснованы конструктивные параметры лезвий на катках для эффективного резания соломы с учетом веса катка. Тяговые характеристики тракторов по модели прогнозирования Brixius путем снятия показаний тензодатчиками с навески орудия описаны в работах Kim Wan-Soo et al., Kim Yeon-Soo et al. [11–13], по данным как экспериментов, так и теоретических изысканий. Установлено, что нагрузка на заднюю ось и расход топлива больше всего зависят от комбинации глубины обработки отвальными плугами и выбора передачи. Вопросам взаимодействия рабочих органов с гранулированной почвенной средой посвящено исследование V. Bivainis et al. [8]. В работах Hui Ma et al. изучена модель ротора [14]. Используя Umlab, Е.Е. Клубничкин рассмотрел взаимодействия колеса с почвой [5]. В.И. Посметьев с помощью компьютерного моделирования исследовал лесовоз [6]. В.Е. Клубничкин имитационно смоделировал рулевое управление погрузочно-транспортной машины [4]. В работах И.М. Бартенева, Е.Г. Хитрова, И.В. Григорьева [1, 3, 7] рассмотрены современные системы машин, технологии лесовосстановления и методы их расчета.

В наших исследованиях ранее мы использовали Matlab Simulink, Solidworks Motion, SimInTech, Umlab [2, 9–11]. За счет применения данного программного обеспечения возможно быстро разработать модель и провести

вычислительный эксперимент, поэтому в представляемом исследовании также решено было использовать Umlab (Универсальный механизм 9.1). На основании обзора сформулированы предпосылки для постановки задачи исследования и выбора методов его проведения, которые подробно рассмотрены далее.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является ножевой каток. Сначала мы создали его 3D-модель в системе автоматизированного проектирования, далее исключили избыточные степени свободы и экспортировали модель в Umlab. С помощью Umlab добавили контактные взаимодействия звеньев и параметры исследуемых пружин, после чего провели вычислительные эксперименты.

На высоте от почвы $l H_{почв} = 0,75$ м расположим пластину крепления навески к трактору в виде параллелепипеда 2 со сторонами размером $0,1 \times 0,2 \times 0,2$ м, весом 31,2 кг, находящегося на расстоянии $-0,5$ м по оси OX от базовой системы координат. Зададим ей возможность поступательно перемещаться по оси OX со скоростью $V_{pod} = -0,5$ м/с. Для измерения тягового усилия по 3 осям расположим рядом с пластиной навески еще один параллелепипед 3 таких же размера и массы, как 2. Кинематическую пару A между звеньями 2 и 3 представим как обобщенный шарнир, обладающий поступательными степенями свободы по осям OX , OY , OZ , на каждой из которых зададим фиктивную силу трения равную $14e10$ Н. Измерение силы трения в кинематической паре звеньев 2 и 3 позволит оценить затраты тягового усилия трактора на движение. Начальная система координат всех импортируемых из CAD программы звеньев совпадает с начальной системой координат имитационной модели. Добавим сдвиги по осям OX , OY , OZ и расположим звенья друг относительно друга так, как это показано на рис. 1. Цвет оси OX примем красным, оси OY зеленым, оси OZ синим, аналогичную палитру используем для графиков, показывающих результаты исследования.

Навеска – 3-точечная, для расчета кинематической схемы механизма в соответствии с теорией машин и механизмов необходимо исключить избыточные связи, поэтому оставим только верхний палец 4. Навеска при работе трактора находится в плавающем режиме и движется поступательно относительно грунта (кинематическая пара H). Для реализации перемещения пальца навески 4 относительно звена 3 (места крепления навески к трактору) между этими звеньями применим поступательную кинематическую пару B вдоль оси OZ (люфтом звена 4 относительно звена 3 вдоль OX , OY пренебрежем).

Для ограничения хода навески по вертикали примем упорные пластины 5, предотвращающие перемещение при возникновении 3D-контакта между звеньями 4 и 5. Рама навески 6 жестко закреплена на пальце 4 (вращением в пальце пренебрегаем). К раме навески 6 жестко присоединен фланец продольной балки 7, расположенный по центру навески. Продольная балка 9 зафиксирована шарниром C относительно фланца 7. На фланце 7 и балке 9 установлены проушины 8, 11, на шарнирах которых D установлены 2 пружины сжатия 10. Для обеспечения угла поворота α катка вокруг оси OZ используем шарнир E , который позволяет вращать раму катка 13 в прорезях фланца 12. Для обеспечения установки угла поворота катка вокруг его оси OX применим шарнир F , он позволит вращать раму катка 13 в проушинах 15.

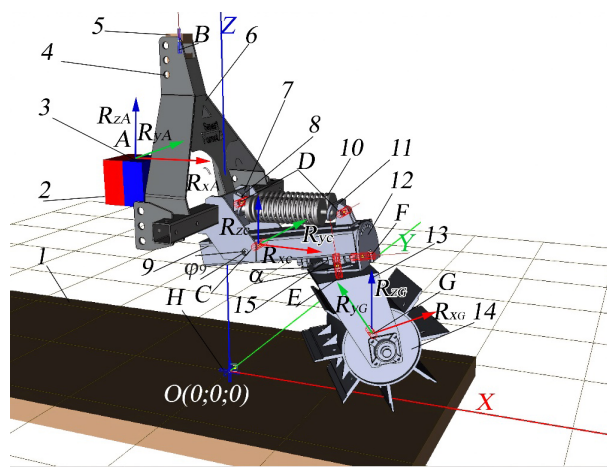


Рис. 1. Компонентно-кинематическая схема ножевого катка

Fig. 1. The layout and kinematic diagram of a knife roller

Воздействие массы орудия на опору навески 2 зависит от нахождения навески в верхнем или нижнем участке ее плавающего хода, ограничиваемом стопорами 5, а также от сил на пружинах. Массу орудия рассчитаем по формуле:

$$m_{rsum} = \sum_{i=3}^{15} m_i,$$

где m_{3-15} – масса крепления навески; пальцев навески; стопоров; навески; фланца навески; проушин фланца; балки; пружин; верхней проушины балки; фланца катка; рамы катка; катка; нижних проушин балки соответственно ($m_3 = 31,2$ кг; $m_4 = 4$ кг; $m_5 = 1,5$ кг; $m_6 = 38,5$ кг; $m_7 = 11,6$ кг; $m_8 = 1,2$ кг; $m_9 = 19,5$ кг; $m_{10} = 8$ кг; $m_{11} = 1,5$ кг; $m_{12} = 7$ кг; $m_{13} = 25$ кг; $m_{14} = 89$ кг; $m_{15} = 1,5$ кг).

Таким образом, когда каток не касается опоры, орудие максимально свешивается вниз и опирается на навеску (на верхний стопор) всей своей массой. Если каток опирается на грунт или другую поверхность, у орудия возникает 2 точки опоры – нижний упор 5 и сам каток 14. При значительной силе на пружинах они могут переводить навеску к верхнему стопору, после чего добавлять свою силу, передавая ее к навеске трактора и трактору, вплоть до вывешивания его задних колес, поэтому крайне важно правильно подобрать предохранительные пружины 10, которые позволяли бы удерживать каток, но не оказывали бы избыточное давление на грунт.

Соппротивление на ножевом катке складывается из 3 компонентов: силы трения скольжения вдоль оси OX , боковой силы трения по оси OY , силы от сопротивления почвы на ножевом катке вдоль оси OZ . Примем допущение, что в шарнире G действует фиктивный момент трения $M_{rk} = 1000$ Н·м, фактически запретив вращения катка. В этом случае при снятии показаний в имитационном эксперименте мы увидим затраты момента от действия сил трения между грунтом и катком с учетом масс орудия и сил на пружинах, возникающие в этом шарнире.

Реакция в месте крепления навески к трактору между звеньями 2 и 3 R_z , компенсирующая вес орудия (без учета действия пружин), равна:

$$R_z = \sum_{i=3}^{15} m_i g.$$

Силу трения, возникающую между грунтом и катком, рассчитаем по формуле:

$$F_{trG} = F_{XtrG} + F_{YtrG} = \sqrt{\left(f_{tr} R_{zG} \cos(\alpha)\right)^2 + \left(f_{tr} R_{zG} \sin(\alpha)\right)^2},$$

где F_{trG} – результирующая сила трения, Н; F_{XtrG} , F_{YtrG} – проекция силы трения на оси OX и OY соответственно, Н; f_{tr} – коэффициент трения; α – угол поворота катка относительно оси OX , ...°.

Для расчета коэффициента трения используем формулу [3]:

$$f_{tr} = f + (f_0 - f)e^{-\left(\frac{V_s}{v_{str}}\right)^\delta} + v V_s,$$

где f , f_0 – коэффициент трения в режиме скольжения и сцепления соответственно; v_{str} – скорость Штрибека, определяющая интервал скорости проскальзывания, м/с; v – коэффициент вязкого трения.

Внедрение ножей в почву значительно увеличивает коэффициенты трения, поэтому сделаем допущение, что $f = 0,8$, $f_0 = 0,9$.

Момент от действия сил трения между грунтом и катком с учетом масс орудия и сил на пружинах рассчитаем по формуле:

$$M_{tr} = F_{trG} R_{kat},$$

где R_{kat} – радиус катка, м.

Выполним имитационное моделирование работы ножевого катка в UMLab. Входные параметры модели следующие. Параметры скольжения: коэффициент трения $f = 0,8$; коэффициент трения $f_0 = 0,9$; скорости $v_s = 0,5$ м/с, $v_{str} = 0,5$ м/с; коэффициент кривой $\delta = 1$; коэффициент вязкого трения $v = 0,3$. Параметры нормального контакта: коэффициенты жесткости $C_k = 1e6$, демпфирования $D_k = 1e4$. Параметры качения: коэффициенты трения $K_{roll} = 0$ м, $K_{spin} = 0$ м (имеют размерность длины). Радиус катка $R_{kat} = 0,16$ м, нормаль $(0;1;0)$, точка на плоскости $X_p = 0$ м, $Y_p = 0$ м, $Z_p = 0$ м, внешняя нормаль точки $(0;0;1)$. Массы звеньев, вычисленные на основании геометрии звеньев и плотности стали, были приведены выше. Параметры предохранительных пружин сжатия сведены в таблицу.

Параметры предохранительных пружин сжатия
The parameters of safety compression springs

Параметр	Значения для пружин		
	№ 1	№ 2	№ 3
Диаметр наружный, D_1 , мм	100	100	100
Диаметр проволоки, D , мм	12	14	15
Жесткость пружины, c , Н/м	18661	39510	53926
Свободная длина, L_0 , мм	400	400	400
Рабочий ход пружины, L_{1-2} , мм	110	110	110
Число рабочих витков	16	15	15
Усилие предварительной деформации, F_1 , Н	933	1976	2669
Рабочая максимальная нагрузка, F_2 , Н	3658	6954	8089

Силу на пружине рассчитаем по формуле:

$$F_{pr} = F_1 - c\Delta x_{pr},$$

где Δx_{pr} – изменение длины пружины, м.

Параметры ядра расчета имитационного моделирования установим по умолчанию. Выполним лабораторный эксперимент. Для фиксирования сил тяги катка использовалась тензометрическая навеска, позволяющая проводить исследования в 3 плоскостях по X , Y , Z . Применена тензометрическая лаборатория ZetLab, включающая тензостанцию ZET 058 и набор тензодатчиков сил растяжения и сжатия UU-500 кгс, данные с которых поступали в специализированное программное обеспечение ZETLAB TENZO.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведем имитационный эксперимент I. Выключим пружины (установим предварительное усилие деформации $F_1 = 0$, жесткость пружины, $c = 0$, физически удалим сами пружины массой m_{10}). Момент сопротивления вращения катка от почвы $M_{rk} = 1000$, $f_{tr} = 0,8$, $f = 0,9$. Для достижения равновесия системы в опыте I и последующих расположим орудие так, чтобы до нижнего упора навески оставалось 6 см.

Выполним имитационный эксперимент II. Повторим те же условия, что и в эксперименте I, но отключим взаимодействие с почвой (обнулим жесткость контакта колесо–почва $C_k = 0$ и демпфирование $D_k = 0$). Уберем ограничитель, который препятствует опусканию балки 9 на угол меньше 0° . В этом случае каток опустится вниз, как если бы он висел в воздухе, и его рама придет в колебательное движение (как у маятника). В шарнир C добавим момент трения $M_{trC} = 120$ Нм, чтобы быстрее погасить движение «маятника».

При работе на вырубках возможны режимы движения, когда начинают действовать пружины сжатия. При наезде на препятствие каток будет подниматься, увеличивая угол φ_9 и сжимая пружины. Аналогичный режим работы возникнет при опускании навески, когда она коснется верхнего стопора 5, передавая давление от трактора на каток. В этом случае излишняя жесткость пружин может привести к значительным нагрузкам в шарнирах, вывешиванию задних колес трактора и разрушению узлов сочленения.

Для моделирования работы пружин сжатия проведем имитационные эксперименты III, IV, V с одинаковыми входными параметрами, но для 3 разных пружин (см. таблицу). Для имитации режима, при котором пружины сжатия начнут работать, уменьшим высоту навески над уровнем почвы с $H_{pochvI-II} = 0,75$ м до $H_{pochvIII-V} = 0,45$ м.

Вертикальное перемещение шарнира C и изменения угла наклона балки φ_9 , полученные по результатам имитационных экспериментов I–V, покажем на рис. 2.

Для имитационного эксперимента I орудие опускается вниз $Z_C = 0,54$ м, опирается на упор 5 у навески и катком 14 – на грунт, в результате чего балка 9 из горизонтального положения отклоняется на угол $\varphi_9 = 5,2^\circ$ (против часовой стрелки относительно шарнира C).

Для имитационного эксперимента II орудие также опускается вниз $Z_C = 0,54$ м, опирается на упор 5 у навески, но поскольку опора на грунт отсут-

стствует, то рама с катком приходит в колебательное движение как «маятник» относительно шарнира C . За счет Г-образной рамы угол балки φ_9 будет колебаться вблизи -55° , после чего вследствие трения установится на этом угле. Угол равен -55° , а не -90° (вертикально вниз), т. к. центр тяжести Г-образной балки находится внутри, а не на самой балке 9.

Для имитационного эксперимента III орудие начнет опускаться вниз, но после упора катком 14 на грунт за счет действия сил на пружинах 10 придет в плавающее положение (не опирается на упоры 5), затем установится на уровне $Z_C = 0,28$ м, угол балки $\varphi_9 = 47^\circ$.

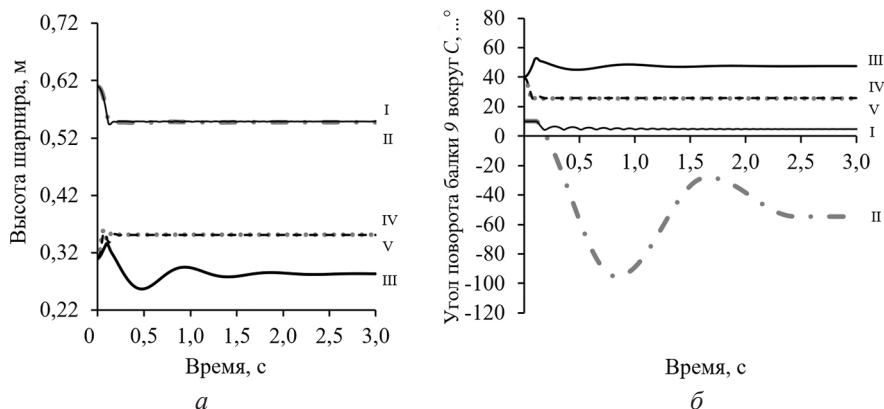


Рис. 2. Траектория движения балки 9 для имитационных экспериментов I–V:

a – перемещение шарнира C вдоль оси OZ ; b – угол φ_9

Fig. 2. The trajectory of beam 9 for simulation experiments I–V:

a – movement of the hinge C along the OZ axis; b – angle φ_9

Для имитационных экспериментов IV–V орудие начнет опускаться вниз, но после упора катком 14 на грунт за счет значительных сил от действия на пружинах 10 поднимется до верхнего упора 5 с дальнейшим установлением на уровне $Z_C = 0,35$ м, угол балки $\varphi_9 = 25^\circ$.

Результирующие силы в шарнирах A , C , G для имитационных экспериментов I–II (пружины отсутствуют) покажем на рис. 3.

Для имитационного эксперимента I орудие опускается вниз, опирается на упор 5 у навески и катком 14 – на грунт, быстро приходя к установившемуся режиму работы. Результирующие силы (кН) в шарнирах включают 2 составляющие: силы от массы по оси OZ и от трения катка о почву по оси OX – после удара об упор они принимают следующие значения:

$$F_{A1} = \sqrt{F_{ZA1}^2 + F_{XA1}^2} = \sqrt{1,807^2 + (-0,539)^2} = 1,830;$$

$$F_{C1} = \sqrt{F_{ZC1}^2 + F_{XC1}^2} = \sqrt{0,825^2 + (-0,539)^2} = 0,978;$$

$$F_{G1} = \sqrt{F_{ZG1}^2 + F_{XG1}^2} = \sqrt{0,273^2 + (-0,538)^2} = 0,603.$$

Для имитационного эксперимента II пружины и грунт на орудие не действуют (контакт с почвой выключен, а значит, трения по оси OX нет), однако из-за колебательного движения рамы в первые 2 с присутствует сила по оси

OX , которая меняет знак при движении «маятника», но после остановки колебаний катка на раме вокруг шарнира C становится равной 0. Таким образом, с ударом об упор и прекращением колебательного движения силы в шарнирах включают только одну составляющую – по оси OZ и принимают значения $F_{AII} = 2,332$ кН; $F_{CII} = 1,418$ кН; $F_{GII} = 0,891$ кН. Поделив полученные показатели на силу тяжести, можно убедиться, что имитационная модель работает верно (массы отличаются от заданных на входе не более чем на 1,5 %). Масса всего орудия по модели $m_{sum} = F_{AII}/g = 237,9$ кг; $F_{CII}/g = 144,6$ кг (сумма масс звеньев 9, 11–14); масса катка $m_{14} = F_{GII}/g = 90,9$ кг.

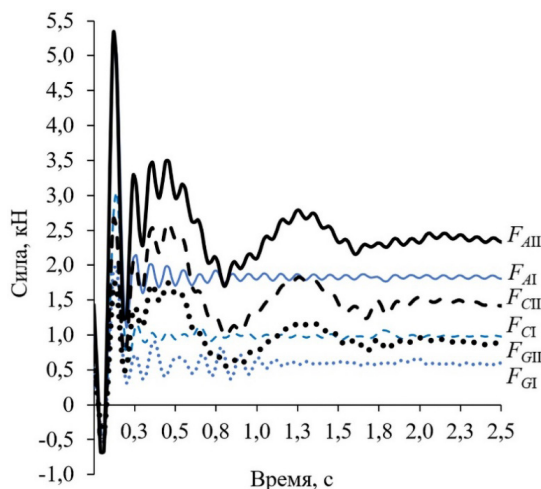


Рис. 3. Результирующие силы в шарнирах A, C, G для имитационных экспериментов I–II

Fig. 3. The resulting forces in joints A, C, G for simulation experiments I–II

Так как при опоре на грунт часть нагрузки от орудия начинает воздействовать на него, то и силы в шарнирах для опыта I меньше в сравнении с опытом II, когда вся масса орудия висит в воздухе, опираясь только на навеску.

Для имитационных экспериментов IV–V орудие начнет опускаться вниз, но после упора катком 14 на грунт за счет значительных сил от действия на пружинах 10 поднимется до верхнего упора 5 и установится на уровне $Z_C = 0,35$ м, угол балки $\varphi_9 = 25^\circ$.

Силы в шарнирах A, C, G для 3 пружин в их сжатом состоянии за счет опускания навески на уровень $Z_C = 0,35$ м и поворота балки 9 на угол $\varphi_9 = 25^\circ$ (имитационные эксперименты III–V) показаны на рис. 4. Угол поворота катка относительно направления движения $\alpha = 0^\circ$, и трактор движется прямо, поэтому составляющая вектора сил по оси OY отсутствует.

У шарнира A в случае установки пружины № 1 (III) силы наименьшие из всех 3 опытов: $F_{AIII} = 1,843$ кН; $F_{AZIII} = 0,306$ кН; $F_{AXIII} = -1,817$ кН. Для пружины № 2 (IV) силы увеличиваются и достигают: $F_{AIV} = 2,551$ кН; $F_{AZIV} = -0,469$ кН; $F_{AXIV} = -2,507$ кН. Для пружины № 3 (V) показатели максимальны: $F_{AV} = 3,366$ кН; $F_{AZV} = -1,922$ кН, $F_{AXV} = -3,147$ кН. При установке наименее слабой пружины № 1 давление от сил тяжести на грунт больше, чем от силы сжатия пружин, и составляющая F_{AZIII} положительна, однако, недостаточна, чтобы поднять навеску до верхнего упора 5, поэтому орудие находится в плавающем положении. При установке более жесткой пружины № 2 происходит подъем навески до упора 5, и оставшейся силой сжатия пружины дополнительно догружают каток. Аналогичная ситуация у наиболее жесткой пружины № 3, для которой силы наибольшие. Отметим, что силы F_{AX} препятствуют движению

трактора, поэтому имеют знак минус, а вертикальные составляющие F_{AZ} для пружин № 2 и 3 дают на верхний упор 5, поэтому ответная реакция направлена вниз и тоже имеет знак минус, когда давления на упор нет F_{AZ} (III) приобретает положительное значение.

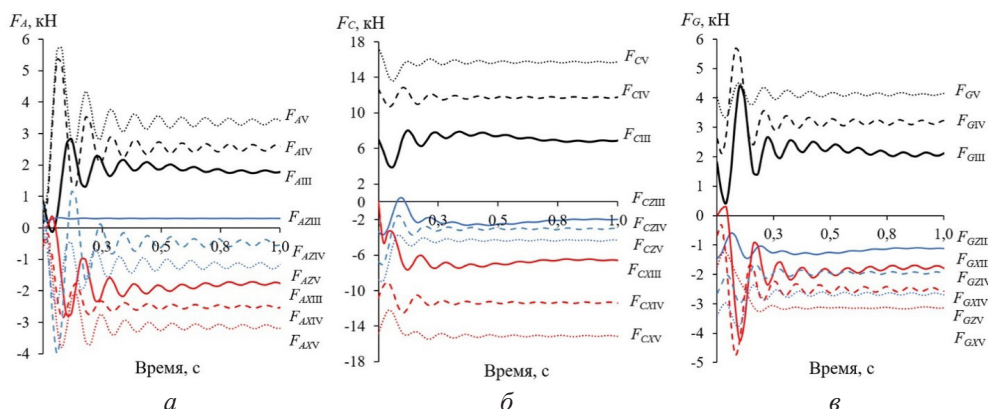


Рис. 4. Силы в шарнирах для имитационных экспериментов III–V:

а – шарнир А; б – шарнир С; в – шарнир G

Fig. 4. The forces in the joints for simulation experiments III–V:

а – joint А; б – joint С; в – joint G

Действующие у шарнира G силы могут быть использованы для расчета процесса резания ветвей, дерна и почвы непосредственно ножами катка. Причины уровня сил аналогичны шарниру А, с той лишь разницей, что пружины всегда оказывают дополнительное давление на каток, а значит F_{AZ} отрицательна для всех 3 опытов (III–V). Силы при устранившемся движении следующие: для пружины № 1 (III) $F_{GIII} = 2,161$ кН; $F_{GZIII} = -1,169$ кН; $F_{GXIII} = -1,817$ кН; для пружины № 2 (IV) $F_{GIV} = 3,174$ кН; $F_{GZIV} = -1,946$ кН; $F_{GXIV} = -2,507$ кН; для пружины № 3 (V) $F_{GV} = 4,126$ кН; $F_{GZV} = -2,668$ кН; $F_{GXV} = -3,147$ кН.

Действующие у шарнира С силы достигают значительных величин, т. к. находятся в месте «излома» рамы и могут приводить к повышенному износу и выходу орудия из строя. Причины уровня сил аналогичны шарниру G, разница заключается в том, что пружины располагаются в непосредственной близости от шарнира С и распределение масс орудия способствует возникновению наибольших реакций в шарнире. Сила для пружин при устранившемся движении: для пружины № 1 (III) $F_{CIII} = 7,054$ кН; $F_{CZIII} = -2,146$ кН; $F_{CXIII} = -6,817$ кН; для пружины № 2 (IV) $F_{CIV} = 11,761$ кН; $F_{CZIV} = -3,058$ кН; $F_{CXIV} = -11,356$ кН; для пружины № 3 (V) $F_{CV} = 15,731$ кН; $F_{CZV} = -4,337$ кН; $F_{CXV} = -15,121$ кН.

Общий вид лабораторной установки и результаты измерений сил в шарнире А показаны на рис. 5. Предусмотрим 2 пружины № 1, опустим навеску так, чтобы высота шарнира С над грунтом $Z_C = 0,35$ м, а угол наклона балки $\varphi_9 = 25^\circ$ при внедрении ножей катка в почву. Аналогичные параметры зададим в имитационном эксперименте VI.

Результирующая сила для установившегося режима работы у имитационного эксперимента $F_{AVI} = 2,094$ кН, а для данных, полученных с тензонавески при лабораторных опытах, $F_{Aexp} = 1,7$ кН, разница теоретических и экспериментальных исследований составила 23 %. Это связано с тем, что во время эксперимента сложно контролировать, чтобы навески и пружины не были так сильно

сжаты, как в случае имитационного эксперимента, также конструкция лабораторной навески включала треугольник для измерения усилий тензозвеньями и опорные колеса (которые были подняты и не касались грунта), т. е. были другими по сравнению с конструкцией навески в имитационном эксперименте. Однако в целом характер и величины сил, полученные на тензонавеске, оказались аналогичны силам в имитационном эксперименте.

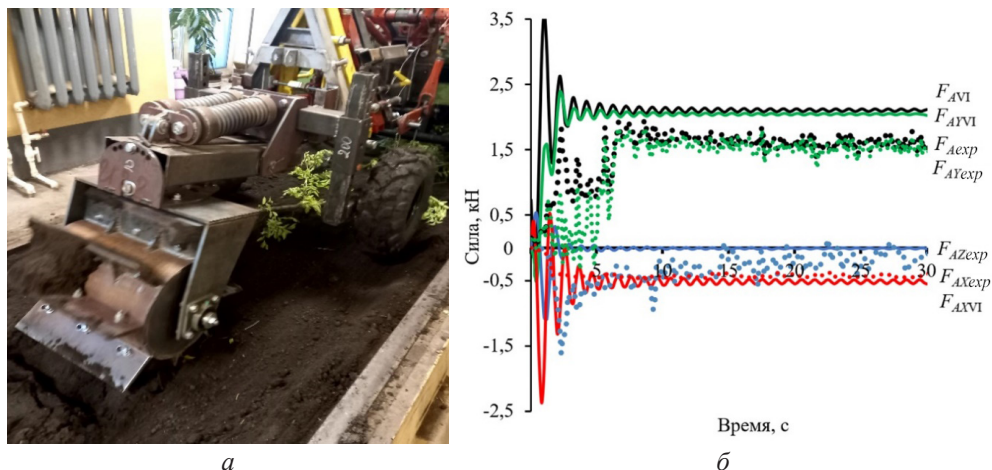


Рис. 5. Лабораторные исследования ножевого катка: *а* – общий вид орудия; *б* – сравнение имитационных и экспериментальных (*exp*) значений сил F_A

Fig. 5. The laboratory tests of a knife roller: *a* – general view of the tool; *b* – comparison of simulated and experimental (*exp*) values of F_A forces

Выводы

1. Проверка работоспособности модели при вывешивании конструкции в имитационном эксперименте вертикально вниз показала расхождение полученных масс орудия с лабораторными данными не более чем на 1,5 %. Масса всего орудия при расчетах по одной из анализируемых моделей (по модели II) равна 237,9 кг, в то время как по лабораторным данным показатель составляет 232,08 кг, масса катка в первом случае – 90,9 кг, во втором – 89 кг.

2. Силы сопротивления, полученные на основании лабораторных исследований, равняются 1,7 кН, отличаясь от результатов имитационного моделирования – 2,094 кН, т. е. на 23 %. Разница возникла из-за конструктивных расхождений модели и опытного образца, а также технологических параметров работы орудия, однако характер изменения сил при проведении лабораторного эксперимента аналогичен теоретическому.

3. Было изучено влияние пружин разной жесткости и предварительного усилия на работу орудия. Установлены технологические параметры (высота навески и угол наклона балки), при которых орудие приведенной конструкции будет находиться в плавающем и дополнительно нагруженном пружинами режиме, а также тяговое усилие и усилие, создаваемое на почве катком.

4. Разработанная имитационная модель приведенной конструкции орудия с ножевым катком позволяет определить его кинематические и динамические параметры и обосновать их выбор для установления технологических режимов использования на вырубке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бартенев И.М., Драпалюк М.В. Совершенствование технологии лесовосстановления на вырубках с применением энергонасыщенных тракторов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 5. С.117–133.

Bartenev I.M., Drapalyuk M.V. Improving the Technology of Reforestation in Cuttings with the Use of Energy-Efficient Tractors. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 5, pp. 117–133. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-5-117-133>

2. Бухтояров Л.Д., Малуков С.В., Лысыч М.Н. Имитационная модель для анализа кинематики лесопосадочного аппарата с двумя роторами // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2023. № 243. С. 197–209.

Bukhtoyarov L.D., Malyukov S.V., Lysych M.N. Simulation Model for the Analysis of the Kinematics of a Forest Planter with Two Rotors. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2023, no. 243, pp. 197–209. (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.243.197-209>

3. Каляшов В.А., До Туан А., Хитров Е.Г., Григорьева О.И., Гурьев А.Ю., Новгородов Д.В. Современные системы машин и технологии заготовки древесины и лесовосстановления в условиях горных лесосек // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 2. С. 1–47.

Kalyashov V., Do Tuan An', Hitrov E., Grigoreva O., Gur'ev A., Novgorodov D. Modern Systems of Machinery and Technologies for Timber Harvesting and Reforestation in Mountain Forests. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 1–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2022.6163>

4. Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Горбунов А.Ю., Дручинин Д.Ю. Разработка узла сочленения лесной погрузочно-транспортной машины // Лесотехн. журн. 2020. Т. 10, № 4(40). С. 217–226.

Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Gorbunov A.Yu., Druchinin D.Yu. Development of the Forwarder Articulation Joint. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2020, vol. 10, no. 4(40), pp. 217–226. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.4/18>

5. Клубничкин Е.Е. Моделирование мобильности колесных транспортных средств, оснащенных средствами повышения проходимости // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 1(140). С. 84–96.

Klubnichkin E.E. Modeling the Mobility of Wheeled Vehicles Equipped with Traction Devices. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* = Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev, 2023, no. 1(140), pp. 84–96. (In Russ.). https://doi.org/10.46960/1816-210X_2023_1_84

6. Посметьев В.И., Никонов В.О., Мануковский А.Ю., Посметьев В.В. Компьютерное моделирование работы рекуперативного поворотного коникового устройства лесовозного тягача с прицепом-ропуском // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 85–99.

Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Manukovskii A.Yu., Posmetyev V.V. Computer Simulation of the Operation of the Recuperative Swivel Bunk Device of a Hauling Tractor with a Timber Drug. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 5, pp. 85–99. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-85-99>

7. Хитров Е.Г., Должииков И.С., Дмитриев А.С., Каляшов В.А., Григорьев И.В., Григорьева О.И. Расчет коэффициента сцепления колесного движителя лесной машины с почвогрунтом // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 126–134.

Khitrov E.G., Dolzhikov I.S., Dmitriev A.S., Kalyashov V.A., Grigorev I.V., Grigoreva O.I. Calculation of the Coefficient of Adhesion of the Forest Machine Wheeled Mover with Soil. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 5, pp. 126–134. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-126-134>

8. Bivainis V., Jotautienė E., Lekavičienė K., Mieldazys R., Juodišius G. Theoretical and Experimental Verification of Organic Granular Fertilizer Spreading. *Agriculture*, 2023, vol. 13, no. 6, art. no. 1135. <https://doi.org/10.3390/agriculture13061135>
9. Bukhtoyarov L.D., Drapalyuk M.V., Pridvorova A.V. Simulation of the Movement of Hedge Cutter Links in the Simulink Application of the Matlab Package. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 875, art. no. 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012004>
10. Bukhtoyarov L., Kunickaya O., Urazova A., Perfiliev P., Druzyanova V., Egipko S., Burgonutdinov A., Tikhonov E. Substantiating Optimum Parameters and Efficiency of Rotary Brush Cutters. *Journal of Applied Engineering Science*, 2022, vol. 20, no. 3, pp. 788–797. <https://doi.org/10.5937/jaes0-36513>
11. Kim W.-S., Kim Y.-J., Baek S.-Y., Baek S.-M., Kim Y.-S., Choi Y., Kim Y.-K., Choi I.-S. Traction Performance Evaluation of a 78-kW-Class Agricultural Tractor Using Cone Index Map in a Korean Paddy Field. *Journal of Terramechanics*, 2020, vol. 91, pp. 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2020.08.005>
12. Kim Y.-S., Kim W.-S., Baek S.-Y., Baek S.-M., Kim Y.-J., Lee S.-D., Kim Y.-J. Analysis of Tillage Depth and Gear Selection for Mechanical Load and Fuel Efficiency of an Agricultural Tractor Using an Agricultural Field Measuring System. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 9, art. no. 2450. <https://doi.org/10.3390/s20092450>
13. Kim Y.-S., Kim T.-J., Kim Y.-J., Lee S.-D., Park S.-U., Kim W.-S. Development of a Real-Time Tillage Depth Measurement System for Agricultural Tractors: Application to the Effect Analysis of Tillage Depth on Draft Force during Plow Tillage. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 3, art. no. 912. <https://doi.org/10.3390/s20030912>
14. Ma H., Lu Y., Wu Z., Tai X., Li H., Wen B. A New Dynamic Model of Rotor–Blade Systems. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, vol. 357, pp. 168–194. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.07.036>
15. Musabbir A.A., Rahman A.M., Anjum N., Ali M. Performance Evaluation of New Rotary Blades and Roller Cutter of Versatile Multi-Crop Planter on Residue Management. *Sarhad Journal of Agriculture*, 2022, vol. 38, iss. 5, pp. 211–221. <https://doi.org/10.17582/journal.sja/2022/38.5.211.221>
16. Ucgul M., Fielke J.M., Saunders C. 3D DEM Tillage Simulation: Validation of a Hysteretic Spring (Plastic) Contact Model for a Sweep Tool Operating in a Cohesionless Soil. *Soil and Tillage Research*, 2014, vol. 144, pp. 220–227. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.10.003>
17. Ucgul M., Saunders C., Fielke J.M. Discrete Element Modelling of Tillage Forces and Soil Movement of a One-Third Scale Mouldboard Plough. *Biosystems Engineering*, 2017, vol. 155, pp. 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.12.002>
18. Ucgul M., Saunders C., Fielke J.M. Discrete Element Modelling of Top Soil Burial Using a Full Scale Mouldboard Plough under Field Conditions. *Biosystems Engineering*, 2017, vol. 160, pp. 140–153. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.008>
19. Ucgul M., Saunders C., Li P., Lee S.-H., Desbiolles J. Analyzing the Mixing Performance of a Rotary Spader Using Digital Image Processing and Discrete Element Modeling (DEM). *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, vol. 151, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.028>
20. Ye S., Wang X., Zhang C., Zhang J., Wang J., Zheng D. Design and Experiments of a Roll-Knife Pickup for a Buckwheat Pickup Harvester. *Agronomy*, 2024, vol. 14, no. 9, art. no. 1944. <https://doi.org/10.3390/agronomy14091944>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article