

## ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ И ЭКОЛОГИЧНОСТИ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОРЧЕВАТЕЛЯ, ОБОРУДОВАННОГО ШИРОКОПРОФИЛЬНЫМИ ШИНАМИ

доктор технических наук **В.И. Прядкин**

доктор технических наук **И.М. Бартенев**

кандидат физико-математических наук **В.В. Посметьев**

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

В статье проведен анализ технических средств для корчевания деревьев. В России наибольшее распространение получили навесные рычажного типа, агрегируемые с различными по тяговому классу колесными и гусеничными тракторами. За рубежом используются узкоспециализированные высокопроизводительные самоходные корчеватели с большой мощностью двигателя, востребованные в различных отраслях – лесном, сельскохозяйственном и нефте-газовом комплексах, дорожном строительстве, при прокладывании высоковольтных линий электропередач и их содержании, а также в других областях народного хозяйства. Проведенный анализ технических средств для корчевания деревьев показал, что в последнее время доминирующей тенденцией является создание роботов-корчевателей, обеспечивающих безопасность выполнения технологического процесса, высокую производительность и уменьшение количества персонала на вырубке. Для реализации инновационных технологий в лесном комплексе разработан самоходный роботизированный корчеватель, оборудованный широкопрофильными шинами низкого давления. Обеспечение выполнения технологического процесса роботом-корчевателем в беспилотном режиме достигается применением системы технического зрения, навигационным оборудованием, автоматизированным управлением технологическим оборудованием, трансмиссией и рулевым управлением. Целью исследования предусматривалась оценка продольной устойчивости роботизированного самоходного корчевателя при вертикальном транспортировании дерева и экологической совместимости его колесного движителя с почвенно-растительным покровом. Проведенными теоретическими исследованиями установлено, что предложенная компоновочная схемы самоходного корчевателя обеспечивает продольную устойчивость при движении с деревом в вертикальном положении без применения балластных противовесов за задним мостом. Также установлено, что колесный движитель корчевателя, оборудованный широкопрофильными шинами низкого давления является экологически чистым при выполнении технологических операций в летне-осенний период.

**Ключевые слова:** самоходный корчеватель, инновационные технологии, роботизация, динамическая модель, контактное давление, способы корчевания

## EVALUATION OF SUSTAINABILITY AND ECOLOGICAL PROPERTIES OF A ROBOTIZED STUMP REMOVER EQUIPPED WITH WIDE-SECTION TYRES

DSc (Engineering) **V.I. Pryadkin**

DSc (Engineering) **I.M. Bartenev**

PhD (Physics and Mathematics) **V.V. Posmetyev**

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

### Abstract

The article analyzes the technical means for uprooting trees. Tools aggregated with wheel and caterpillar tractors of various traction classes are the most popular ones in Russia. Abroad, self-propelled stump removers with high engine

power and high performance are used, which are in demand in various industries (forestry, agricultural and oil and gas complexes, road construction), when laying high-voltage power lines and their maintenance, as well as in other areas of the national economy. The analysis of technical means for uprooting trees has shown that the dominant trend is creation of stump removers that ensure safety of the process, its high productivity and decrease in the number of personnel on felling. Self-propelled robotic stump remover equipped with wide-profile low-pressure tires has been developed to implement innovative technologies in the forest complex. Ensuring the technological process is carried out by robot-eradicator in unmanned mode. It is achieved by using a technical vision system, navigation equipment, automated control of technological equipment, transmission and steering. The aim of the study was to evaluate the longitudinal stability of a robotic self-propelled stump remover during vertical transportation of a tree and environmental compatibility of its wheeled mover with soil and vegetation cover. Conducted theoretical studies have found that the proposed layout scheme of a self-propelled stump remover provides longitudinal stability when moving with a tree in an upright position without the use of ballast counterweights behind the rear axle. It was also found that the wheel mover of the stump remover equipped with wide-profile low-pressure tires is environmentally friendly when performing technological operations in the summer-autumn period.

**Keywords:** self-propelled stump remover, innovative technologies, robotics, dynamic model, contact pressure, uprooting methods

### Введение

Проведение подготовительных работ при лесовосстановлении на больших территориях после лесных пожаров; осветление придорожных лесополос для повышения пожарной безопасности; расчистка трасс под высоковольтными линиями электропередач, нефте- и газопроводами предусматривает применение высокопроизводительного технологического оборудования по удалению различной растительности. При выполнении этих работ широко используются машинные технологии на базе различных корчевателей [1, 2, 3].

Корчевание деревьев производится различным технологическим оборудованием, которое условно разделяют на два типа [4, 5, 6, 7]. К первому типу относятся навесные корчеватели, устанавливаемые как на передней, так и на задней навеске трактора. Этот тип корчевателей получил наибольшее распространение во всем мире, их применение обосновывается простотой конструкции, малой стоимостью и экономической целесообразностью агрегатирования с серийно выпускаемыми колесными и гусеничными тракторами различной мощности. Мировой промышленностью выпускается разнообразное навесное и прицепное технологическое оборудование для корчевания деревьев. В нашей стране разработаны принципиально новые, инновационные марки прицепных корчевателей КП-2, КПРН-1,0, применяются и ранее разработанные

навесные корчевальные машины КМ-1, МРП-2, ОРВ-1,5, К-2А, ДП-25 и другие.

Ко второму типу относятся самоходные машины, оборудованные различными техническими средствами для корчевания деревьев. За рубежом эти машины получили широкое применение при промышленной раскорчевке насаждений, восстановлении заброшенных территорий, для ухода за лесными участками при валке деревьев; расчистке территорий под линиями электропередачи; в полосах отвода газо- и нефтепроводов, автомобильных и железных дорог; создания противопожарных полос в лесу; уборке поврежденных деревьев после пожаров, ураганов, наводнений; ландшафтных и сельскохозяйственных работ (табл.) [3, 4]. Однако в России этот тип самоходной узкоспециализированной техники широкого распространения не получил, хотя его применение для некоторых видов работ является экономически весьма эффективным (рис. 1).



Фото авторов – автодорога Е-38

Рис. 1. Расчищенная от поросли самоходным мульчером придорожная полоса автомагистрали

В настоящее время на мировом рынке представлены различные виды самоходных корчевателей, измельчителей пней и ямокопателей, изготовленных в автономном варианте, с приводом от собственного электрического, бензинового или дизельного двигателя. Мобильные корчеватели и мульчеры оборудуются как гусеничным, так и колесным движителем. Гусеничным движителем, как правило, оборудуют самоходные лесные машины, обеспечивающие низкие технологические скорости до 10 км/ч, а колесным – когда необходимо обеспечить высокую маневренность, асфальтопригодность и скоростной режим до 40 км/ч. Зарубежными фирмами представлены различные самоходные машины, и в первую очередь это продукция компаний Bandit, Baumalight, Loftness, Vermeer, Gyro-Trac, FMI (США); FERRI, FAE, Orsi, Seppi (Италия); ANWI (Германия); Накмет, Nokamic (Канада) (см. табл.).

К первой группе можно отнести самоходные мульчеры и измельчители пней. Высокопроизводительные мульчеры рассчитаны на работу с двигателями мощностью до 600 л. с., они имеют большой расход топлива и низкие технологические скорости до 10 км/ч. Такие машины весьма распространены, привод ротора в них, как правило, осуществляется от одного или двух гидравлических моторов, подключенных к насосной станции. Самые мощные самоходные мульчеры позволяют в один заход срезать и измельчать деревья диаметром до 40 см, кусты и ветки.

Мировыми тенденциями развития мобильных технических средств для промышленной раскорчевки деревьев являются обеспечение высокой

производительности, повышение безопасности работы технологического оборудования, а также экономических и экологических показателей процесса корчевания.

Промышленная раскорчевка деревьев тяжелыми и высокоэнергонасыщенными самоходными средствами обеспечивает повышение производительности, снижение капиталовложений и затрат на выполнение работ. При этом повышается безопасность работы технологического оборудования за счет исключения вращающихся с большой скоростью элементов конструкции; комфортабельность и упрощение в использовании. Однако применение машин с большой мощностью двигателя, относящихся к тяжелому классу, приводит к переуплотнению почвы, ухудшению её структуры и водного баланса [8, 9, 10, 11]. Поэтому для снижения давления на почву их движители оборудуют либо резиноармированными гусеницами, либо широкопрофильными шинами [9].

Ко второй группе можно отнести самоходные машины для выкопки деревьев, которые являются узкоспециализированной техникой. Так, FZ 110 PLUS самоходная машина была спроектирована для выкопки деревьев из почвы с образованием сферического кома, содержащего корневую систему дерева. Выкопка дерева производится специальным вибрационно-режущим блоком, оборудованным ножом сферического поперечного сечения [11], далее дерево вынимается вертикально вверх другой машиной с челюстным захватом вместе с корневой системой и почвой. Эта машина может выкапывать сферические кома диаметром от 30 до 120 см.

Таблица

Зарубежные самоходные машины для корчевания деревьев

№ п/п	Тип машины	Производитель, страна	Тип движителя	Масса, кг	Мощность двигателя, кВт
1	2	3	4	5	6
1	Мульчер	Bandit США	на гусеничном ходу	16100	245,3
2	Мульчер	TRE EMME MM350B Италия	на колесном ходу	10020	260
3	Мульчер	RT-400 Германия	на гусеничном ходу	20270	295,7
4	Фреза	Vermeer США	на гусеничном ходу	1800	30
5	Фреза	Vermeer США	на колесном ходу	1750	25

1	2	3	4	5	6
6	Выкапыватель	FZ 110 PLUS Италия	на гусеничном ходу	2000	66,2
7	Мульчер	BRON-440 Канада	на гусеничном ходу	16783	251,3
8	Мульчер	AWHI PRINOTH RAPTOR 300R Германия	на гусеничном ходу	26000	470
9	Мульчер	Гуго-Трас США	на гусеничном ходу	10659	350
10	Мульчер	FMI FTX США	на гусеничном ходу	12700	350
11	Мульчер	FERRI TSKF/F 2200 Италия	на гусеничном ходу	16440	176

Источник – сайты производителей самоходных машин для корчевания деревьев

Ямокопатель (пересадочник) деревьев Optimal Opitz 1400 позволяет за одну операцию произвести выкапывание дерева вместе с корневой системой и почвой, а затем произвести выемку дерева вертикально вверх. Пересадочник деревьев Optimal Opitz 1400 полностью адаптирован для агрегатирования с тракторами и погрузчиками отечественного производства. Однако, несмотря на высокую эффективность, это технологическое оборудование имеет низкую годовую загрузку.

Третья группа самоходных машин предназначена для прямого корчевания деревьев за одну технологическую операцию вертикально приложенной силой, дальнейшего транспортирования деревьев и складирования их. Данная технология прямой раскорчевки деревьев обеспечивает повышение производительности, снижение капиталовложений и затрат на выполнение работ. Эти корчеватели позволяют выполнять подготовительные работы при лесовосстановлении, в промышленном садоводстве и осветлении придорожных лесополос, их используют для удаления пней и поросли, валки деревьев. При этом повышается безопасность работ за счет исключения вращающихся с большой скоростью элементов конструкции, комфортабельность и упрощение в использовании.

В последнее время доминирующей тенденцией является создание роботов-корчевателей и машин с дистанционным управлением для корчевания пней, обеспечивающих безопасность выполнения технологического процесса, высокую производительность, уменьшение количества персонала на лесосеке.

Самоходные роботизированные корчеватели и машины с дистанционным управлением предназначены для выполнения технологических процессов в цифровых технологиях лесного комплекса. Внедрение цифровых технологий при корчевании предусматривает наличие электронной карты участка леса либо придорожной лесополосы, на которой зафиксировано каждое дерево, указаны не только его координаты, но и параметры – высота, диаметр ствола, вид и другие. Составление цифровой модели леса производится с использованием мобильного или воздушного сканирования для составления трехмерной модели объектов. Картографирование придорожных лесополос и участков леса обеспечивает прецизионную работу самоходных роботизированных средств лесного комплекса. Применение цифровых технологий в лесном комплексе и дальнейшее развитие телекоммуникационных возможностей обеспечивает существенное повышение эффективности технологических процессов корчевания деревьев самоходными роботами. Однако лесной комплекс России сейчас отстает от других отраслей – промышленности и сельского хозяйства – по темпам цифровизации отрасли.

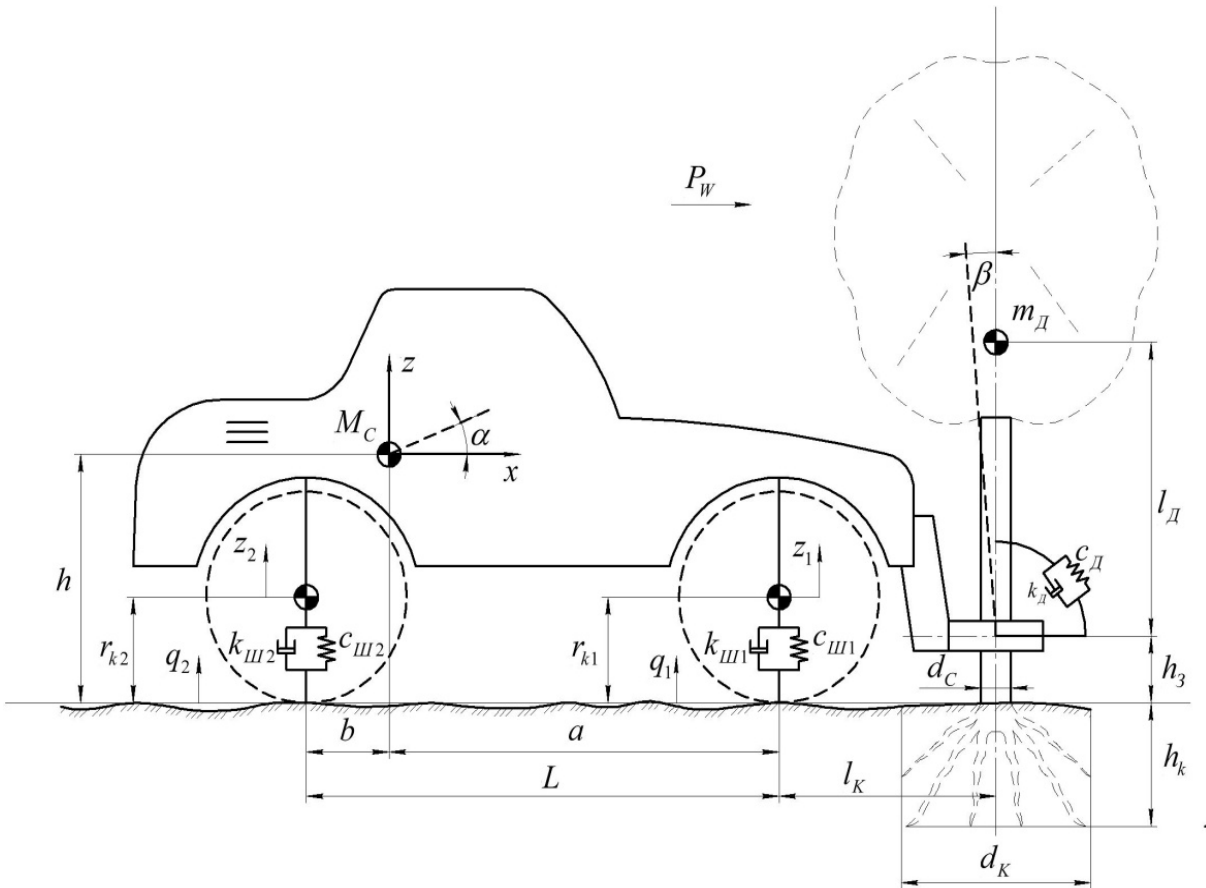
Для реализации цифровых технологий в лесном комплексе разработан самоходный роботизированный корчеватель, оборудованный широкопрофильными шинами низкого давления. Обеспечение выполнения технологического процесса роботом-корчевателем в беспилотном режиме достигается применением системы технического зрения, навигационным оборудованием, автоматизирован-

ным управлением технологическим оборудованием, трансмиссией и рулевым управлением. Однако исследования по комплексной оценке продольной устойчивости самоходного роботизированного корчевателя, непосредственно влияющей на безопасность выполнения технологического процесса и производительность, а также экологической совместимости его колесного движителя с почвой требуют дополнительных исследований.

Целью исследования являлась оценка продольной устойчивости роботизированного са-

моходного корчевателя при вертикальном транспортировании дерева и экологической совместимости его колесного движителя с почвенно-растительным покровом.

Для проведения теоретических исследований разработана расчетная динамическая модель самоходного роботизированного корчевателя [1, 8] (рис. 2).



Разработка авторов

Рис. 2. Динамическая модель самоходного роботизированного корчевателя

**Материалы и методы**

Система уравнений, описывающая вертикальные и продольно-угловые колебания самоходного корчевателя, имеет вид

$$\begin{cases} M_C \frac{d^2 z_K}{dt^2} = F_1 + F_2 - M_C g - F_D; \\ J_K \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = +F_1 a - F_2 b - F_D (a + l_K) + M_D; \\ m_D \frac{d^2 z_D}{dt^2} = -F_D - m_D g; \\ J_D \frac{d^2 \beta}{dt^2} = -M_D; \end{cases} \quad (1)$$

$$F_1 = -c_{ш1}(z_1 - z_{10}) - k_{ш1} \frac{dz_1}{dt}; \quad (2)$$

$$F_2 = -c_{ш2}(z_2 - z_{20}) - k_{ш2} \frac{dz_2}{dt}; \quad (3)$$

$$M_D = -c_D(\beta - \alpha) - k_D \frac{d(\beta - \alpha)}{dt}, \quad (4)$$

где  $M_C$  и  $m_D$  – массы корчевателя и дерева;  $z_K$  и  $z_K$  – вертикальная декартова координата центров тяжести корчевателя и дерева;  $t$  – время;  $F_1$  и  $F_2$  – силы реакции, действующие на корпус корчевателя со стороны переднего и заднего мостов;  $g$  – ускорение свободного падения;  $J_K$  и  $J_D$  – моменты инерции корчевателя и дерева относительно их центров тяжести;  $F_D$  – сила, действующая со стороны дерева на челюстной захват корчевателя;  $\alpha$  – угол отклонения корчевателя от горизонтального положения;  $\beta$  – угол отклонения дерева от вертикального положения;  $a$  и  $b$  – расстояния в горизонтальном направлении от центра тяжести до переднего и заднего мостов;  $l_K$  – расстояние в горизонтальном направлении от переднего моста до точки контакта корчевателя и дерева в челюстном захвате;  $M_D$  – момент вращения, оказываемый деревом на корчеватель;  $c_{ш1}$ ,  $c_{ш2}$  и  $k_{ш1}$ ,  $k_{ш2}$  – коэффициенты жесткости и демпфирования упруго-вязкого взаимодействия корпуса корчевателя с опорной поверхностью в переднем и заднем мосте соответственно;  $z_1$  и  $z_2$  – вертикальная декартова координата осей передних и задних колес;  $z_{10}$  и  $z_{20}$  – вертикальные декартовы координаты осей передних и задних колес в отсутствии нагрузки;  $c_D$  и  $k_D$  – коэффициенты жесткости и демпфирования угло-

вого упруго-вязкого взаимодействия корчевателя и дерева.

Решение системы дифференциальных уравнений производилось на ЭВМ методом Рунге-Кутты. В качестве возмущающего воздействия на колебательную систему приняты возмущающее воздействие от вертикально закрепленного челюстным захватом транспортируемого дерева и неровностей опорной поверхности с учетом сглаживающей способности широкопрофильных шин низкого давления. Для удобства моделирования разработанная компьютерная программа «Программа для моделирования работы корчевателя» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019665869). Моделирование процесса взаимодействия широкопрофильной шины низкого давления с почвой производилось на основе метода конечных элементов [12–21].

Исходные данные для решения системы дифференциальных уравнений определялись расчетным путем, были взяты из чертежа общего вида самоходного корчевателя и определены экспериментально.

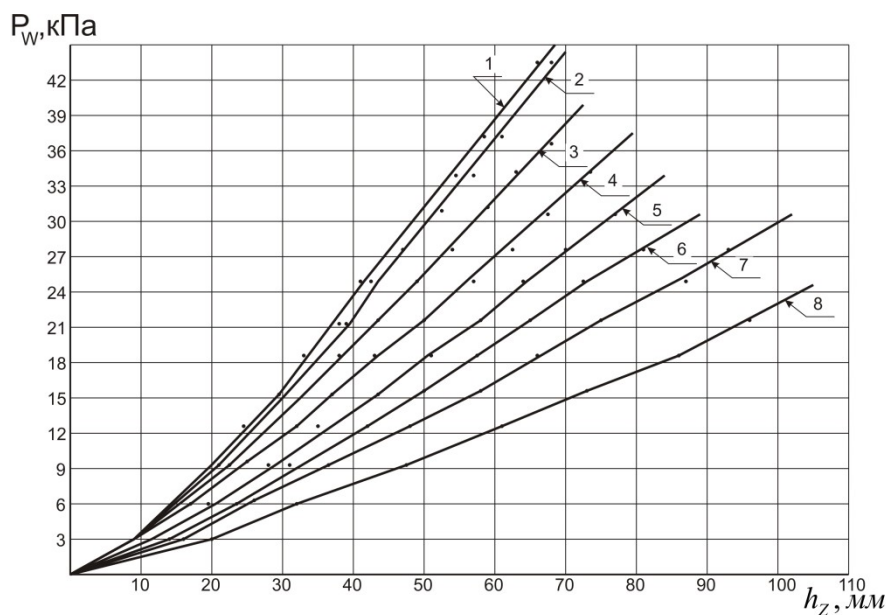
**Результаты и обсуждение**

Для снижения контактного давления на почву самоходный корчеватель оборудован широкопрофильными шинами низкого давления, жесткость которых определена экспериментально на специальном стенде. Зависимость нормальной деформации от нагрузки при различных давлениях воздуха в шине приведена на рис. 3.

Универсальная характеристика и рекомендуемая область работы в графическом виде представлена на рис. 4. Математической обработкой точек нагрузочного ряда получена универсальная характеристика, связывающая радиальный прогиб шины с нагрузкой и давлением воздуха в виде

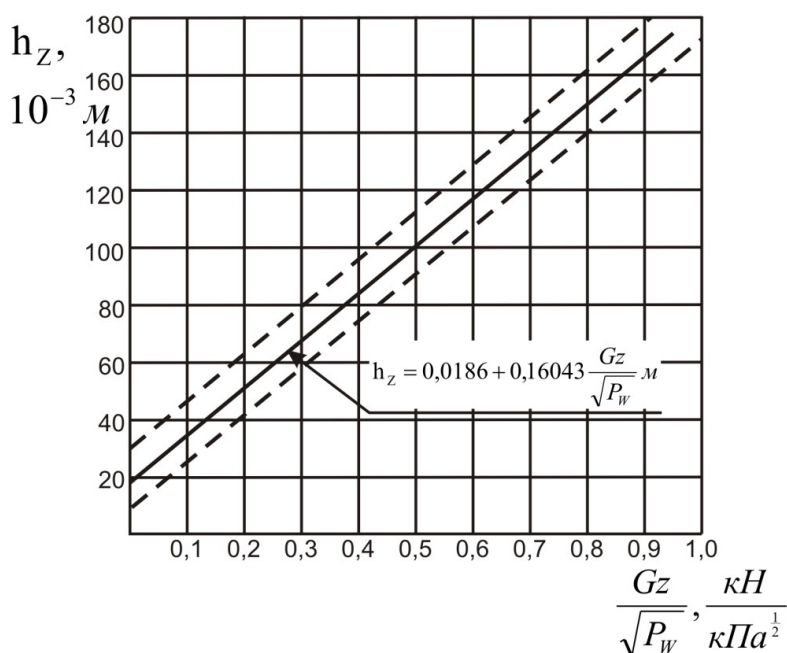
$$h = 5,514 + 25,904 \frac{G_z}{\sqrt{P_w}}, \text{ мм}$$

Компоновка самоходного корчевателя должна обеспечивать продольную устойчивость при движении с деревом, закрепленном в вертикальном положении челюстным захватом, как на подъем, так и под уклон не менее 12°. В статическом положении нагрузка на задний мост корчевателя составляет 60 % от общей его массы, а на передний – 40 %.



Результаты эксперимента авторов

Рис. 3. Нагрузочная характеристика шины 600/50R 22,5: 1 –  $P_w = 260$  кПа; 2 –  $P_w = 230$  кПа; 3 –  $P_w = 200$  кПа; 4 –  $P_w = 160$  кПа; 5 –  $P_w = 130$  кПа; 6 –  $P_w = 100$  кПа; 7 –  $P_w = 80$  кПа; 8 –  $P_w = 50$  кПа



Результаты вычислений авторов

Рис. 4. Универсальная характеристика шины 600/50R 22,5 мод. DT-46

После выемки из почвы дерева с корневой системой происходит перераспределение нагрузок между мостами корчевателя. Вследствие этого при движении корчевателя с деревом в челюстном захвате под действием реактивного динамического

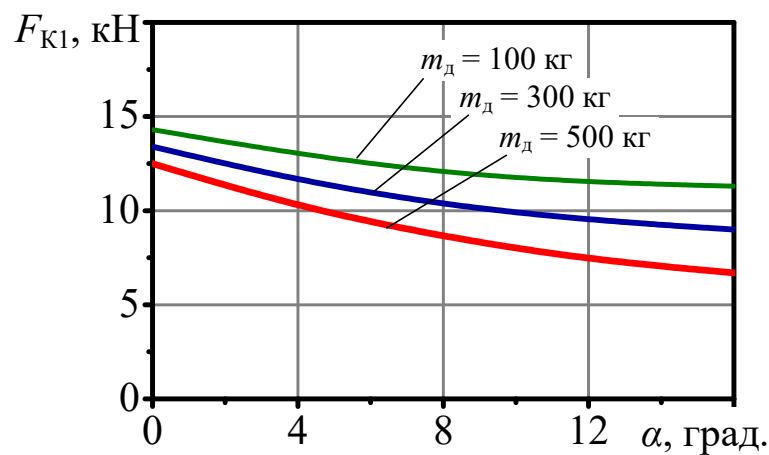
момента от массы дерева нагрузка на передний мост возрастает.

Проведенными теоретическими исследованиями по определению влияния уклона и массы дерева на величину нормальной реакции колес зад-

него моста установлено, что с увеличением массы транспортируемого дерева с 100 кг до 500 кг происходит перераспределение нагрузок между мостами, так при движении под уклон  $12^\circ$  величина нагрузки на задний мост достигает 5,9 кН (рис. 5). Благодаря применению предложенной компоновочной схемы нет необходимости в применении балластных противовесов за задним мостом самоходного корчевателя для обеспечения продольной устойчивости.

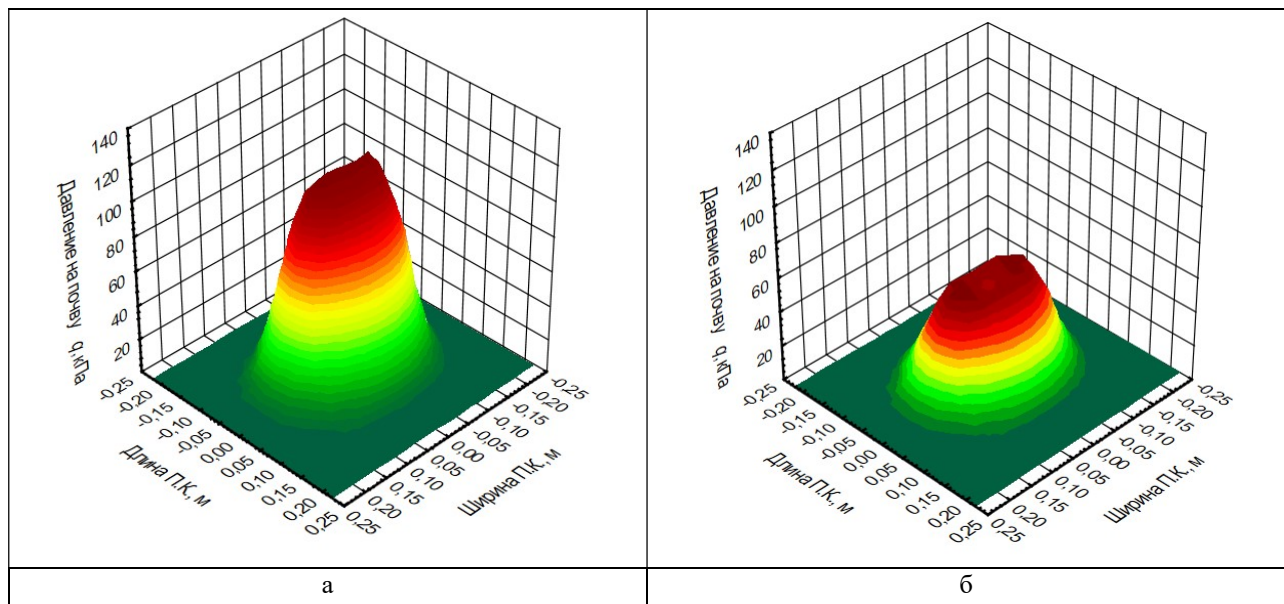
Оценка экологической совместимости колесного движителя с почвой производилась по величине контактного давления (рис. 6).

Анализ эпюр, приведенных на рис. 6, показывает, что до выемки дерева максимальная величина контактного давления шин заднего моста составляет 121 кПа. При движении под уклон  $12^\circ$  с деревом массой 500 кг величина контактного давления шин заднего моста составляет 63,3 кПа. В соответствии с ГОСТ 26955-86 самоходный корчеватель может работать в летне-осенний период с влажностью почвы в слое 0-30 см от 0,7 НВ до 0,9 НВ при давлении 121 кПа.



Результаты вычислений авторов

Рис. 5. Изменение реакции заднего моста в зависимости от массы дерева и продольного угла наклона при движении со скоростью 5 км/ч



Результаты вычислений авторов

Рис. 6. Расчетные эпюры контактных напряжений шины: а – при нагрузке 13,6 кН; б – при нагрузке 5,9 кН



При транспортировании дерева массой 500 кг давление колесного движителя заднего моста снижается и достигает 92,7 кПа. Следовательно, при корчевании садовых деревьев в летне-осенний период колесный движитель самоходного корчевателя, оборудованный широкопрофильными шинами низкого давления, является экологически чистым. Для обеспечения нормативных требований ГОСТ 26955-86 можно рекомендовать установку шин 600/50R22,5 с нормой слоистости 8 и с распорным кольцом. Обеспечение режима работы шины с учетом оптимальной деформации может быть достигнуто применением системы регулирования давления воздуха в шинах при движении по почве [22].

После корчевания дерева и его вертикального транспортирования под уклон 12° давление колесного движителя заднего моста достигает 63,3 кПа, при этом не происходит потери управляемости.

### Выводы

1. Разработанная математическая модель самоходного корчевателя позволяет оценить продольную устойчивость с учетом его динамической нагруженности и экологическую совместимость колесного движителя с почвой.

2. Предложенная компоновочная схема самоходного корчевателя обеспечивает продольную устойчивость при движении с деревом в вертикальном положении без применения балластных противовесов за задним мостом.

3. Колесный движитель самоходного корчевателя, оборудованный широкопрофильными шинами низкого давления, является экологически чистым, при выполнении технологических операций в летне-осенний период удельное давление на почву не превышает 140 кПа.

### Библиографический список

1. Жуков, А. В. Проектирование лесопромышленного оборудования / А. В. Жуков. – Минск : Вышэйш. шк., 1990. – 312 с.
2. Машины и механизмы лесного и лесопаркового хозяйства / А. Ф. Алябьев, В. Н. Винокуров, В. И. Казаков, А. А. Котов, В. Г. Шаталов ; под ред. В. Н. Винокурова. – Москва : ГОУ ВПО МГУЛ, 2009. – 468 с.
3. Конструкции и параметры машин для расчистки лесных площадей : монография / И. М. Баргенов, М. В. Драпалюк, П. И. Попиков, Л. Д. Бухтояров. – Москва : Флинта : Наука, 2007. – 208 с.
4. Тенденции развития перспективных технических средств для корчевания деревьев / А. В. Артёмов, А. В. Федянин, С. А. Ермоленко, В. И. Прядкин // Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования. – Т. 4. – № 1 (7). – Воронеж, 2017. – С. 343–348.
5. Stump removal to control root disease in Canada and Scandinavia: A synthesis of results from longterm trials / M. R. Cleary, N. Arhipova, D. J. Morrison [et al.] // Forest Ecology and Management. – 2013. – Vol. 290. – P. 5–14.
6. Athanassiadis, D. Производительность и стоимость уборки сосны и ели с помощью инструмента для подъема пня PallariKH 160 / D. Athanassiadis, O. Lindroos, T. Nordfjell // Scandinavian Journal of Forest Research. – 2011. – No. 26 (5). – С. 437–445.
7. Criteria and guidance considerations for sustainable tree stump harvesting in British Columbia / S.M. Berch, M. Curran, C. Dymond [et al.] // Scandinavian Journal of Forest Research. – 2012. – No. 27(8). – P. 709–723.
8. Прядкин, В. И. Проходимость колесных транспортно-технологических агрегатов лесного комплекса / В. И. Прядкин. – Воронеж, 2000. – 232 с.
9. Jansson, K. J. Soil changes after traffic with a tracked and a wheeled forest machine: a case study on a silt loam in Sweden / K. J. Jansson, J. Johansson // Forestry. – 1998. – No. 71 (1). – P. 57–66.

10. Jusoff, K. Effect of tracked and rubber-tyred logging machines on soil physical properties of the Berkelah Forest Reserve, Malaysia / K. Jusoff // *Pertanika*. – 1991. – No. 14(3). – P. 265–276.
11. Impacts of soil compaction and tree stump removal on soil properties and outplanted seedlings in northern Idaho, USA / D. S. Page-Dumroese, A. E. Harvey, M. F. Jurgensen, M. P. Amaranthus // *Canadian Journal of Soil Science*. – 1998. – No. 78(1). – P. 29–34.
12. Three dimensional finite element model of soil compaction caused by agricultural tire traffic / O. González Cueto, C. E. Coronel Iglesias, C. A. Recarey Morfa [et al.]. *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2013. – No. 99. – P. 146–152.
13. Experiment validation of distinct element simulation for dynamic wheel-soil interaction / L. R. Khot, V. M. Salokhe, H. P. W. Jayasuriya, H. Nakashima // *Journal of Terramechanics*. – 2007. – No. 44. – P. 9.
14. Discrete element modeling of a Mars Exploration Rover wheel in granular material / M. A. Knuth, J. B. Johnson, M. A. Hopkins, R. J. Sullivan, J. M. Moore // *Journal of Terramechanics*. – 2012. – No. 49. – P. 10.
15. Kuhn, M. R. Contact rolling and deformation in granular media / M. R. Kuhn, K. Bagi // *International journal of solids and structures*. – 2004. – No. 41. – P. 5793–5820.
16. Li, H. Investigation of Tire-Soil Interaction with Analytical and Finite Element Method / H. Li, C. Schindler // *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. – 2013. – No. 41. – P. 293–315.
17. Parametric analysis of lugged wheel performance for a lunar microrover by means of DEM / H. Nakashima, H. Fujii, A. Oida [et al.] // *Journal of Terramechanics*. – 2007. – No. 44. – P. 153–162.
18. Nakashima, H. Algorithm and implementation of soil-tire contact analysis code based on dynamic FE-DE method / H. Nakashima, A. Oida // *Journal of Terramechanics*. – 2004. – No. 41. – P. 127–137.
19. Nakashima, H. Analysis of tire tractive performance on deformable terrain by finite element-discrete element method / H. Nakashima, Y. Takatsu, H. Shinone // *Journal of computational science and technology*. – 2008. – No. 4. – P. 423–434.
20. Nakashima, H. FE-DEM analysis of the effect of tread pattern on the tractive performance of tires operating on sand / H. Nakashima, Y. Takatsu, H. Shinone // *Journal of Mechanical Systems For Transportation and Logistics*. – 2009. – No. 2. – P. 55–65.
21. Shinone, H. Experimental analysis of tread pattern effects on tire tractive performance on sand using an indoor traction measurement system with forced-slip mechanism / H. Shinone, H. Nakashima, Y. Takatsu // *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. – 2010. – No. 3. – P. 61–66.
22. Mohsenimanesh, A. Application of automatic air inflation deflation control system on a manure tanker to prevent excessive soil compaction / A. Mohsenimanesh, C. Laguë // *ASABE Paper Number: 152179891 St. Joseph, Mich.: ASABE, 2015.*

### References

1. Zhukov A.V. *Proektirovanie lesopromyshlennogo oborudovaniya* [Design of forestry equipment]. Minsk: Vysh. shkola, 1990. 312 p. (in Russian).
2. Alyabyev A.F., Vinokurov V.N., Kazakov V.I., Kotov A.A., Shatalov V.G. *Mashiny i mekhanizmy lesnogo i lesoparkovogo khozyaystva* [Machines and mechanisms of forestry and forestry management]; ed. by V.N. Vinokurov. M.: MGUL, 2009. 468 p. (in Russian).
3. Bartenev I.M., Drapalyuk M.V., Popikov P.I., Bukhtoyarov L.D. *Konstruktsi i parametry mashin dlya raschistki lesnykh ploshchadey: monografiya* [Designs and parameters of machines for clearing forest areas: a monograph]. M.: Flinta: Nauka, 2007. 208 p. (in Russian).
4. Artyomov A.V., Fedyanin A.V., Ermolenko S.A., Pryadkin V.I. *Tendentsii razvitiya perspektivnykh tekhnicheskikh sredstv dlya korchevaniya derev'yev* [Trends in the development of promising technical means for

uprooting trees]. *Alternative energy sources in automobile transport: problems and prospects of rational use*. Vol. 4. No. 1 (7). Voronezh, 2017. P. 343-348 (in Russian).

5. Cleary M.R., Arhipova N., Morrison D.J. (et al.) (2013). Stump removal to control root disease in Canada and Scandinavia: A synthesis of results from longterm trials. *Forest Ecology and Management*, 290, pp. 5-14.

6. Athanassiadis D., Lindroos O., Nordfjell, T. (2011a). Productivity and cost of harvesting pine and spruce using the Pallari KH 160 stump raising tool. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 26 (5), p. 437-445.

7. Berch S.M., Curran M., Dymond C. (et al.) (2012) Criteria and guidance considerations for sustainable tree stump harvesting in British Columbia. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 27 (8), pp. 709-723.

8. Pryadkin V.I. *Prokhodimost' kolesnykh transportno-tekhnologicheskikh agregatov lesnogo kompleksa* [Passability of wheeled transport and technological units of the forest complex]. Voronezh, 2000. 232 p. (in Russian).

9. Jansson K.J., Johansson J. (1998). Soil changes after traffic with a tracked and a wheeled forest machine: a case study on a silt loam in Sweden. *Forestry*, 71 (1), pp. 57-66.

10. Jusoff K. (1991). Effect of tracked and rubber-tyred logging machines on soil physical properties of the Berkelah Forest Reserve, Malaysia. *Pertanika*, 14 (3), pp. 265-276.

11. Page-Dumroese D.S., Harvey A.E., Jurgensen M.F., Amaranthus M.P. (1998). Impacts of soil compaction and tree stump removal on soil properties and outplanted seedlings in northern Idaho, USA. *Canadian Journal of Soil Science*, 78 (1), pp. 29-34.

12. González Cueto, O., Iglesias Coronel C.E., Recarey Morfa C.A. (et al.) (2013) Three dimensional finite element model of soil compaction caused by agricultural tire traffic. *Computers and Electronics in Agriculture* 99, pp. 146-152.

13. Khot L.R., Salokhe V.M., Jayasuriya H.P.W., Nakashima H. (2007) Experiment validation of distinct element simulation for dynamic wheel-soil interaction. *Journal of Terramechanics* 44, 9.

14. Knuth M.A., Johnson J.B., Hopkins M.A., Sullivan R.J., Moore J.M. (2012) Discrete element modeling of a Mars Exploration Rover wheel in granular material. *Journal of Terramechanics* 49, 10.

15. Kuhn M.R., Bagi K. (2004) Contact rolling and deformation in granular media. *International journal of solids and structures* 41, 5793-5820.

16. Li H., Schindler C. (2013) Investigation of Tire-Soil Interaction with Analytical and Finite Element Method. *Mechanics Based Design of Structures and Machines* 41, 293-315.

17. Nakashima H., Fujii H., Oida A. (et al.) (2007) Parametric analysis of lugged wheel performance for a lunar microrover by means of DEM. *Journal of Terramechanics* 44, 153-162.

18. Nakashima H., Oida A. (2004) Algorithm and implementation of soil-tire contact analysis code based on dynamic FE-DE method. *Journal of Terramechanics* 41, 127-137.

19. Nakashima H., Takatsu Y., Shinone H. (2008) Analysis of tire tractive performance on deformable terrain by finite element-discrete element method. *Journal of computational science and technology* 4, 423-434.

20. Nakashima H., Takatsu Y., Shinone H. (2009) FE-DEM analysis of the effect of tread pattern on the tractive performance of tires operating on sand. *Journal of Mechanical Systems For Transportation and Logistics* 2, 55-65.

21. Shinone H., Nakashima H., Takatsu Y. (2010) Experimental analysis of tread pattern effects on tire tractive performance on sand using an indoor traction measurement system with forced-slip mechanism. *Engineering in Agriculture, Environment and Food* 3, 61-66.

22. Mohsenimanesh A., Laguë C. (2015) Application of automatic air inflation deflation control system on a manure tanker to prevent excessive soil compaction, ASABE Paper Number: 152179891 St. Joseph, Mich. : ASABE.

### Сведения об авторах

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

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

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

### Information about authors

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

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

*Posmetyev Victor Valeryevich* – PhD (Physics and Mathematics), Director, IE Posmetyev, Voronezh, Russian Federation; e-mail: viktorvpo@mail.ru.