

## Лесоинженерное дело

УДК 540:631.4

### ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ, СВЯЗАННЫХ С ТЯГОВО-СЦЕПНЫМИ СВОЙСТВАМИ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ, РАБОТАЮЩЕЙ НА СКЛОНЕ

До Туан Ань, Н.И. Злобина, В.А. Каляшов, Д.В. Новгородов, О.И. Григорьева, Е.Г. Хитров

*При работе лесных машин на горных склонах, прежде всего, их оснащают специальными гусеницами. Однако это далеко не всегда обеспечивает эффективную и безопасную работу лесных машин на склонах. Для повышения эффективности и безопасности работы лесных машин на горных склонах, в настоящее время, используют два основных варианта. Во-первых, сами лесные машины могут быть оснащены встроенными лебедками, которые устанавливаются на заводах изготовителях, по предварительному требованию заказчика. Во-вторых, используют различные варианты самоходных лебедок (T-winch, ROB, и т.д.), выполненные на базе бульдозеров, экскаваторов, или специальных самоходных шасси. Использование таких технических решений позволяет существенно повысить эффективность и безопасность работы лесных машин на горных склонах, за счет реализации дополнительного тягового усилия. Это позволяет существенно снизить нагрузки в трансмиссии лесных машин и снизить расход топлива. Однако стоимость такого оборудования весьма существенна. В статье определены условия, при которых возникает необходимость использования дополнительного лебедочного оборудования при работе лесных машин на горных склонах. Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства».*

**Ключевые слова:** лесозаготовки, трелевка, горные леса, лесные машины, самоходные лебедки, встроенные лебедки.

#### Введение

Проблема повышения эффективности лесосечных работ складывается из экономических и экологических показателей. Экономические показатели считаются хорошими при достижении возможного минимума себестоимости заготовленной древесины, т.е. минимизации затрат на подготовительные, вспомогательные и основные работы, объем которых во многом зависит от принятой системы машин, режима их работы, технологического процесса и схемы разработки лесосеки [1-5].

Экологические показатели лесосечных работ считаются хорошими при достижении возможного минимума отрицательного воздействия на лесную экосистему, и, соответственно, при достижении минимума затрат на последующее лесовосстановление. При этом степень отрицательного воздействия лесосечных работ на лесную экосистему также во многом зависит от принятой системы машин, режима их работы, технологического процесса и схемы разработки лесосеки [6-10].

Во многих странах мира для освоения запасов древесины в эксплуатационных лесах на крутых склонах были разработаны многочисленные системы машин, включая различные средства воздушного транспорта (легче и тяжелее воздуха), различные системы канатных трелевочных установок (лесных кранов), самоходные лебедки, лесные машины с интегрированными в их трансмиссию лебедками.

В СССР также была разработана и выпускалась широкая линейка передвижных, самоходных, и стационарных канатных трелевочных установок (КТУ). Над проблемой обоснования и оптимизации их конструктивных параметров и режимов работы в различных условиях эксплуатации трудились несколько отраслевых научно-исследовательских институтов, конструкторских бюро, специализированные кафедры профильных высших учебных заведений. По данному вопросу были защищены десятки диссертаций, включая работы вьетнамских специалистов, проходящих обучение в ВУЗах и НИИ Советского Союза. К сожалению, в Российской Федерации такое направление специального лесного машиностроения утрачено на сегодняшний день полностью. Выпуск специальной техники для освоения лесов на склонах прекращен.

В других странах мира, например США, Япония, Новая Зеландия, Австрия, выпускается широкая линейка техники для работы в горных лесах. Каждый вариант этой техники имеет свои достоинства и недостатки.

Одним из наиболее распространенных в России вариантов при машинной заготовке древесины на склонах является использование лесных машин, оснащенных встроенными в трансмиссию лебедками. Такой вариант позволяет лесной машине намного эффективнее работать на крутых склонах, но утяжеляет машину конструктивно, и значительно удорожает. Кроме этого, недостатками такого варианта является негативное воздействие двигателей лесных машин на почвогрунты [11-13], а также то, что при смене дислокации машины, например переходе на разработку равнинных лесосек, снять эту лебедку нельзя, машина работает с дополнительным весом технологического оборудования, и, соответственно, с дополнительным расходом топлива на перемещение.

Еще одним современным вариантом является использование самоходных лебедок различных конструкций, которые, в отличие от КТУ, перемещают не непосредственно заготовленную древесину, а лесные машины, работающие на склоне. При сохранении недостатков в виде дополнительных расходов на оборудование (в данном случае самоходную лебедку) и негативного воздействия на почвогрунты двигателей работающих на склоне лесных машин, этот вариант дает также и преимущества. Во-первых, самоходная лебедка является достаточно универсальным оборудованием, и может быть использована не только для совместной работы с лесными машинами на склонах. Во-вторых, при смене дислокации лесной машины (на равнинные, тем более переувлажнённые лесосеки), ей нет необходимости возить дополнительную массу не нужного в данных условиях технологического оборудования. В целом, анализ систем машин, применяемых для разработки лесосек на горных склонах, позволяет утверждать, что для рассматриваемых условий наиболее предпочтительным вариантом являются самоходные лебедки, работающие в паре с лесными машинами. Выбор типа и конкретной модели лебедки будет зависеть от используемых лесных машин, вида двигателя, их массы и грузоподъемности, природно-производственных условий эксплуатации – формы и протяженности склона, влажности почвогрунта, таксационных характеристик древостоя, и т.д.

Но высокая стоимость рассмотренных выше технических решений обуславливает необходимость обоснования условий необходимости их использования, и определения случаев, при которых без дополнительного оборудования можно обойтись.

### Материалы и методы

Рассмотрим порядок обоснования технологических параметров, связанных с тягово-сцепными свойствами гусеничной лесной машины [14-16,19]. Для обеспечения проходимости гусеничной лесной машины на склоне необходимо выполнение условий [17-19]:

$$\begin{cases} F_T \geq F_R - T \\ N \geq \frac{F_R v}{\eta} \\ p \leq p_{adm} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $F_T$  – сила сцепления двигателя с почвогрунтом,  $F_R$  – сила сопротивления движению машины,  $v$  – заданная скорость движения,  $N$  – мощность двигателя машины,  $\eta$  – коэффициент полезного действия трансмиссии,  $T$  – сила, буксирующая машину,  $p$  – среднее давление двигателя на почвогрунт,  $p_{adm}$  – допустимое давление двигателя на почвогрунт.

При работе на склоне запишем:

$$F_T = \mu_T G \cos \beta, \quad (2)$$

$$F_R = \varphi_R G \cos \beta + G \sin \beta + T, \quad (3)$$

где  $\beta$  – угол склона,  $\mu_T$  – коэффициент сцепления двигателя,  $\varphi_R$  – коэффициент сопротивления движению,  $G$  – вес гусеничной машины, связанный со средним давлением двигателя на почвогрунт:

$$G = 2blp. \quad (4)$$

Тогда, после несложных преобразований, запишем на основе (1):

$$\begin{cases} \mu_T \cos \beta \geq \varphi_R \cos \beta + \sin \beta - \frac{T}{G} \\ \frac{N}{G} \geq \frac{v}{\eta} \left( \varphi_R \cos \beta + \sin \beta + \frac{P}{G} \right) \\ p \leq p_{\text{adm}} \end{cases} \quad (5)$$

Если гусеничная машина движется самостоятельно, без буксировки, то можем записать:

$$\begin{cases} \mu_T \cos \beta \geq \varphi_R \cos \beta + \sin \beta \\ K_{\text{Э}} = \frac{N}{M} \geq \frac{vg}{\eta} (\varphi_R \cos \beta + \sin \beta), \\ p \leq p_{\text{adm}} \end{cases} \quad (6)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $M$  – масса машины,  $K_{\text{Э}}$  – коэффициент энергонасыщенности машины.

Выражения для  $\mu_T$ ,  $\varphi_R$ ,  $p_{\text{adm}}$  получены нами ранее на основе аппроксимации сведений и положений [17-22]:

$$\mu_T = 0,253 - 0,066 \frac{p}{p_{\text{adm}}} + 0,925q_s - 2,11q_s^2, \quad (7)$$

$$\varphi_R = \left( 0,0306 - 0,0246q_s - 0,0829 \frac{p}{p_{\text{adm}}} + 0,115 \left( \frac{p}{p_{\text{adm}}} \right)^2 \right) (1 + 0,016\beta), \quad (8)$$

$$p_{\text{adm}} = q_s \cdot (0,642 + 0,035 \ln q_s), \quad (9)$$

где  $q_s$  – несущая способность почвогрунта.

### Результаты исследования

Решение системы неравенств (6) с учетом (7) – (9) позволит определить максимальный угол склона, вдоль которого способна перемещаться машина. На рисунках 1–3 приведены результаты расчета максимального значения угла  $\beta$ , удовлетворяющего первому неравенству системы (6) при среднем давлении  $p \leq p_{\text{adm}}$ .

Те же результаты обобщены для трех категорий почвогрунта на рисунке 4, графики построены относительно частного среднего и допустимого по колее давления на грунт. В таблице 1 приведены числовые результаты расчетов.

В результате аппроксимации расчетных данных получим следующую зависимость для оценки максимального угла склона:

$$\beta_0 = 12,3 + 49,2q_s + 1,69 \frac{p}{p_{\text{adm}}} - 108q_s^2 - 7,23 \left( \frac{p}{p_{\text{adm}}} \right)^2. \quad (10)$$

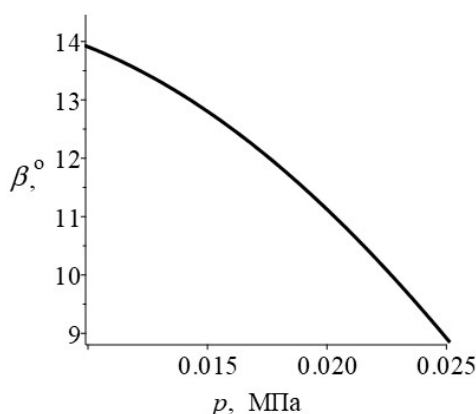


Рис. 1. Оценка максимального угла склона в зависимости от среднего давления гусеничного движителя на почвогрунт (слабый почвогрунт, III,  $q_s = 0,047$  МПа)

Решение второго неравенства системы (6) позволяет установить нижнюю оценку коэффициента энергонасыщенности гусеничной лесной машины, при котором возможно поступательное движение

вдоль склона, в зависимости от соотношения среднего и допустимого давления движителя. При этом угол преодолеваемого склона определяется по уравнению (10). Результаты расчетов представлены в таблице 2 и на рисунке 5. В таблице  $K_{\Sigma}$  указан в [кВт/т], данные получены при  $v = 5$  км/ч,  $\eta = 0,9$ .

Таблица 1 – Оценка максимального угла склона в зависимости от соотношения среднего и допустимого давления гусеничного движителя на почвогрунт

Соотношение среднего и допустимого давления $p/p_{adm}$	Категория прочности почвогрунта		
	III (слаб.)	II (средн.прочн.)	I (прочн.)
0	14,3	16,0	17,9
0,5	13,4	15,1	17,0
0,75	11,6	13,2	15,1
1	8,8	10,5	12,4

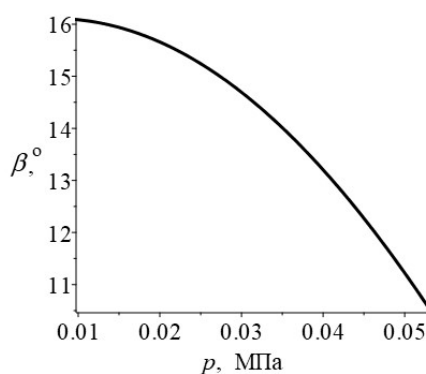


Рис. 2. Оценка максимального угла склона в зависимости от среднего давления гусеничного движителя на почвогрунт (почвогрунт средней прочности, II,  $q_s = 0,095$  МПа)

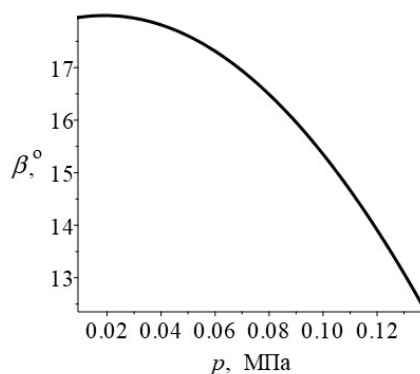


Рис. 3. Оценка максимального угла склона в зависимости от среднего давления гусеничного движителя на почвогрунт (прочный почвогрунт, I,  $q_s = 0,233$  МПа)

Анализ графиков на рисунках 1-3 показывает качественное сходство оценки максимального угла склона в зависимости от среднего давления гусеничного движителя на почвогрунты разных категорий прочности – с увеличением угла склона несущая способность почвогрунта падает, что снижает устойчивость и тягово-сцепные свойства машины на склоне, особенно на слабых почвогрунтах.

Таблица 2 – Оценка коэффициента энергонасыщенности гусеничной лесной машины, при котором возможно поступательное движение вдоль склона, в зависимости от соотношения среднего и допустимого давления движителя

Соотношение среднего и допустимого давления $p/p_{adm}$	Категория прочности почвогрунта		
	III (слаб.)	II (средн.прочн.)	I (прочн.)
0,25	4,04	4,44	4,86
0,5	3,81	4,22	4,65
0,75	3,59	4,01	4,45
1	3,38	3,81	4,26

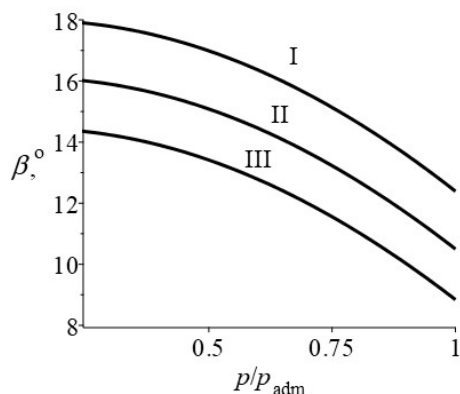


Рис. 4. Оценка максимального угла склона в зависимости от соотношения среднего и допустимого давления гусеничного движителя на почвогрунт

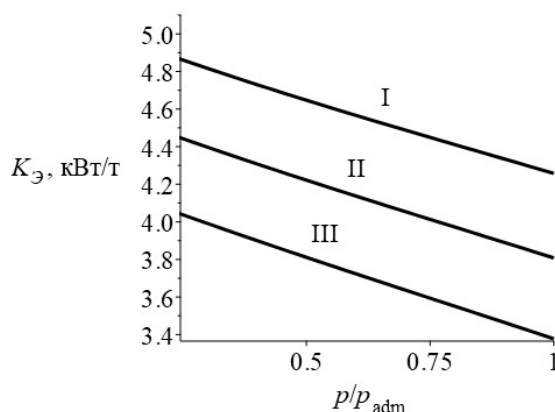


Рис. 5. Оценка коэффициента энергонасыщенности гусеничной лесной машины, при котором возможно поступательное движение вдоль склона, в зависимости от соотношения среднего и допустимого давления движителя

Анализ графических зависимостей, представленных на рисунках 4 и 5, показывает, что с увеличением угла склона снижается соотношение среднего и допустимого давления гусеничного движителя на почвогрунт, и, соответственно, растет необходимый коэффициент энергонасыщенности гусеничной лесной машины, при котором возможно поступательное движение вдоль склона. Особенно быстро на слабых почвогрунтах, что приводит к необходимости использования дополнительных технических средств, таких как интегрированные в трансмиссию лесных машин лебедки, или отдельные самоходные лебедки, помогающие лесным машинам перемещаться по склону. Необходимо также учитывать обстоятельство, что в теплое время года, особенно после осадков, влажность почвогрунта у подошвы склона больше, чем у вершины, и, соответственно, несущая способность почвогрунта, в этих условиях, у подошвы склона ниже, чем у вершины.

Энергонасыщенность техники существенно выше значений, указанных в таблице, не рациональная с точки зрения использования мощности двигателя: большая мощность не будет реализована на преодоление сопротивления движению, поскольку при увеличении угла склона не будет выполняться ограничение по сцеплению движителя с опорной поверхностью. Приближенная зависимость для оценки коэффициента энергонасыщенности имеет вид:

$$K_{Э} = 4,12 + 4,24q_s - 0,84 \frac{p}{p_{adm}}. \quad (11)$$

На более крутых склонах, которые машина не способна преодолеть самостоятельно по сцеплению движителя с опорной поверхностью, возникает необходимость в буксировке. При помощи первого неравенства системы (5) получим оценку соотношения силы, буксирующей гусеничную машину на склоне, и силы тяжести самой машины. Результаты решения при  $p = p_{adm}$  представлены на рисунке 6.

Аппроксимация результатов расчетов приводит к получению уравнения:

$$\frac{T}{G} = -0,155 + 0,0185\beta - 0,326q_s. \quad (12)$$

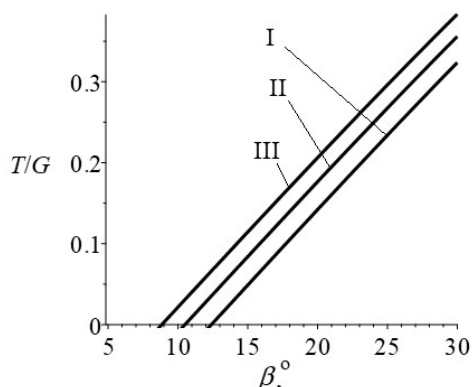


Рис. 6. Соотношение силы, требующейся для буксировки машины на крутом склоне, и веса машины

### Вывод

В качестве вывода наиболее иллюстративно привести пример расчета: гусеничная лесная машина массой  $M=15$  т, работает на уклоне до  $\beta = 20^\circ$ , несущая способность грунта  $q_s = 0,09$  МПа. Геометрические параметры движителя: ширина пятна контакта  $b = 0,6$  м, длина пятна контакта  $l = 5b = 3$  м. Вес машины составляет  $G = 0,147$  МН; среднее давление движителя на грунт  $p = 0,041$  МПа, что меньше допустимого значения  $p_{adm} = 0,05$  МПа. Коэффициент энергонасыщенности по формуле (11) составляет 3,82 кВт/т, таким образом, мощность двигателя машины следует принять ориентировочно 57,3 кВт (существенно большая мощность не будет реализована). Уклон, который машина способна преодолеть по сцеплению, по формуле (10) составляет  $\beta_0 = 12,4^\circ$ , что меньше заданного значения, следовательно, в паре с машиной должна работать лебедка, причем тяговое усилие  $T$  по формуле (12) должно составлять не менее  $T = 0,0273$  МН = 27,3 кН.

### Авторский вклад

До Туан Ань: проведение расчетов и интерпретация их результатов (50%); Григорьев Г.В.: разработка программы для проведения расчетов (12,5%), Каляшов В.А.: разработка программы для проведения расчетов (12,5%); Новгородов Д.В.: анализ проблематики исследования (10%); Григорьева О.И.: анализ проблематики исследования (10%); Хитров Е.Г.: общее руководство работой (5%).

*Исследование частично выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>.*

### Литература

1. Григорьев И.В., Куницкая О.А., Рудов С.Е., Давтян А.Б. Пути повышения эффективности работы лесных машин // Энергия: экономика, техника, экология. 2020. № 1. С. 55-63.
2. Григорьев И.В., Куницкая О.А., Просужих А.А., Давтян А.Б., Рудов С.Е. Перспективы создания лесозаготовительных комплексов на базе отечественных строительных и сельскохозяйственных машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 10. С. 3-10.
3. Мануковский А.Ю., Зорин М.В., Просужих А.А., Куницкая О.А., Григорьев И.В. Современные подходы к повышению энергоэффективности и экономичности лесных машин // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности. сборник научных статей по итогам шестой международной научной конференции. Казань, 2020. С. 138-140.
4. Куницкая О.А. Проактивный сервис для лесных машин // Повышение эффективности лесного комплекса. Материалы Шестой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием. Петрозаводск, 2020. С. 86-87.
5. Куницкая О.А., Просужих А.А., Давтян А.Б., Григорьев М.Ф., Григорьева А.И. Организационно-технические решения для повышения коэффициента технической готовности лесных машин // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе. Материалы международной научно-практической конференции. 2020. С. 162-167.
6. Рудов С.Е., Куницкая О.А. Теоретические исследования экологической совместимости колесных лесных машин и мерзлотных почвогрунтов лесов криолитозоны // Транспортные и транспортно-

технологические системы. Материалы Международной научно-технической конференции. Отв. редактор Н.С. Захаров. 2020. С. 323-326.

7. Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф., Григорьева А.И. Моделирование процесса динамического уплотнения почвогрунта // IX Международная конференция по математическому моделированию, посвященная 75-летию Владимира Николаевича Врагова. Тезисы докладов. Северо-Восточный федеральный университет, Академия наук Республики Саха (Якутия). 2020. С. 144.

8. Никитина Е.И., Куницкая О.А., Николаева Ф.В. Проект организации лесозаготовок в условиях Алданского лесничества с применением многооперационных лесозаготовительных комплексов // Современные проблемы и достижения аграрной науки в арктике. Сборник научных статей по материалам Всероссийской студенческой научно-практической конференции с международным участием в рамках «Северного форума – 2020» (29–30 сентября 2020 г., Якутск) и Международной научной онлайн летней школы – 2020 (6–20 июля 2020 г., Якутск). 2020. С. 138-148.

9. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Tikhonov E., Makuev V., Egipko S., Hertz E., Zorin M. Modeling the effect of wheeled tractors and skidded timber bunches on forest soil compaction // Journal of Applied Engineering Science. 2021. Т. 19. № 2. С. 439-447.

10. Kunickaya O., Hertz E., Kruchinin I., Tikhonov E., Ivanov N., Dolmatov N., Zorin M., Grigorev I. Pressure control systems for tyre preservation in forestry machinery and forest soils // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2021. Т. 18. № 3. С. 95-102.

11. Бурмистрова О.Н., Просужих А.А., Рудов С.Е., Куницкая О.А., Григорьев И.В. Экспериментальные исследования производительности форвардера с учетом его эксплуатационных характеристик, параметров лесосеки, и физико-механических свойств почвогрунта // Resources and Technology. 2021. Т. 18. № 1. С. 94-124.

12. Бурмистрова О.Н., Тетеревлева Е.В., Рудов С.Е., Григорьев И.В., Куницкая О.А. Обоснование исходных требований математической модели взаимодействия колесных транспортных средств на пневматиках низкого давления с лесными почвогрунтами // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 2 (46). С. 94-99.

13. Бурмистрова О.Н., Тетеревлева Е.В., Рудов С.Е., Григорьев И.В., Куницкая О.А. Методика и результаты экспериментальных исследований взаимодействия колесных транспортных средств на пневматиках низкого давления с лесными почвогрунтами // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 1 (45). С. 66-71.

14. Добрецов Р.Ю., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Фам Н.Л. Адаптация принципа низкочастотного импульсного управления поворотом к трансмиссиям лесных и транспортно-тяговых гусеничных машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 11. С. 29-35.

15. Добрецов Р.Ю., Григорьев И.В., Куницкая О.А. Шасси гусеничного трелевочного трактора с "диагональной" системой управления поворотом // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 1. С. 42-48.

16. Dobretsov R., Grigorev I., Tikhonov E., Mikheev A., Khakhina A., Storodubtseva T., Shiryaev S., Burgonutdinov A. Impulse control technology for improving steering control systems of the tracked vehicles // International Review of Automatic Control. 2021. Т. 14. № 3. С. 172-178.

17. Хахина А.М. Методы прогнозирования и повышения проходимости колесных лесных машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. - СПб, 2018. - 318 с.

18. Хитров Е.Г. Комплексное обоснование параметров и режимов работы движителей лесных машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. - Воронеж, 2020. - 319 с.

19. Рудов С.Е., Хитров Е.Г., Рудов М.Е., Устинов В.В. Расчет тяговых и сцепных свойств колесного скиддера с использованием данных зарубежных коллег // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 1 (12). С. 223-228.

20. Kochnev A., Khitrov E. Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel Passover // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings. 2018. pp. 1005-1012.

21. Калистратов А.В., Иванов В.А., Коротков Р.К., Хитров Е.Г., Григорьев Г.В. Исследование коэффициента фильтрации лесной почвы (случай дерново-подзолистой почвы) // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 190-193.

22. Григорьев И.В., Никифорова А.И., Пельмский А.А., Хитров Е.Г., Хахина А.М. Экспериментальное определение времени релаксации напряжений лесного грунта // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2013. № 8 (137). С. 77-80.

© **До Туан Ань** – преподаватель, Вьетнамский национальный университет лесного хозяйства, e-mail: anhdo.dhln@gmail.com; **Злобина Н.И.** – старший преподаватель кафедры организации перевозок и безопасности движения, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ имени Г.Ф. Морозова», e-mail: natasha\_boichka@mail.ru; **Каляшов В.А.** – канд. техн. наук., доцент кафедры начертательной геометрии и инженерной графики, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», (ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»), e-mail: vit832@yandex.ru; **Новгородов Д.В.** – аспирант ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет» (ФГБОУ ВО «АГАТУ»), e-mail: novgorodov\_dulus@mail.ru; **Григорьева О.И.** – канд. с-х наук, доцент кафедры лесоводства ФГБОУ ВО «СПбГЛТУ», e-mail: grigoreva\_o@list.ru; **Хитров Е.Г.** – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии лесозаготовительных производств, ФГБОУ ВО «СПбГЛТУ», e-mail: yegorkhitrov@gmail.com.

UDC 540:631.4

## JUSTIFICATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS RELATED TO TRACTION AND TRACTION PROPERTIES OF A TRACKED MACHINE OPERATING ON A SLOPE

Do Tuan Anh, N.I. Zlobina, V.A. Kalyashov, D.V. Novgorodov, O.I. Grigorieva, E.G. Khitrov

*When forest machines work on mountain slopes, they are first of all equipped with special tracks. However, this does not always ensure efficient and safe operation of forest machines on slopes. To improve the efficiency and safety of forest machines on mountain slopes, two main options are currently being used. Firstly, forest machines themselves can be equipped with integrated winches, which are installed at manufacturers' plants, at the customer's prior request. Second, various variants of self-propelled winches (T-winch, ROB, etc.) made on the basis of bulldozers, excavators, or special self-propelled chassis are used. The use of such technical solutions allows to significantly increase efficiency and safety of forest machines operation on mountain slopes, due to realization of additional traction force. This makes it possible to significantly reduce loads in the transmission of forest machines and reduce fuel consumption. However, the cost of such equipment is quite substantial. In the article the conditions under which the necessity of using additional winch equipment arises during the work of forest machines on mountain slopes are determined.*

**Key words:** logging, skidding, mountain forests, forest machines, self-propelled winches, integrated winches.

### References

1. Grigorev I.V., Kunickaya O.A., Rudov S.E., Davtyan A.B. [Ways to improve the efficiency of forest machines] // Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya [Energy: Economics, Technology, Ecology]. 2020. № 1. pp. 55-63. (InRuss.)
2. Grigorev I.V., Kunickaya O.A., Prosuzhikh A.A., Davtyan A.B., Rudov S.E. [Prospects for the creation of logging complexes based on domestic construction and agricultural machines] // Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya. [Repair. Restoration. Modernization.] 2020. № 10. pp. 3-10. (InRuss.)
3. Manukovskij A.YU., Zorin M.V., Prosuzhikh A.A., Kunickaya O.A., Grigorev I.V. [Modern approaches to improving the energy efficiency and economy of forest machines] // Prioritetnye napravleniya innovacionnoj deyatel'nosti v promyshlennosti. sbornik nauchnyh statej po itogam shestoj mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. Kazan' [Priority directions of innovation activity in industry. collection of scientific articles based on the results of the sixth international scientific conference. Kazan], 2020. pp. 138-140. (InRuss.)
4. Kunickaya O.A. [Proactive service for forest machines] // Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa. Materialy SHestoj Vserossijskoj nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Petrozavodsk [Increasing the Efficiency of the Forestry Complex. Proceedings of the Sixth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation. Petrozavodsk], 2020. pp. 86-87. (InRuss.)
5. Kunickaya O.A., Prosuzhikh A.A., Davtyan A.B., Grigorev M.F., Grigoreva A.I. [Organizational and technical solutions to increase the coefficient of technical availability of forest machines] // Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-



prakticheskoy konferencii [Energy Efficiency and Energy Saving in Modern Production and Society. Materials of the international scientific-practical conference] 2020. pp. 162-167. (InRuss.)

6. Rudov S.E., Kunickaya O.A. [Theoretical studies of ecological compatibility of wheeled forest machines and permafrost soils of cryolithozone forests] // Transportnye i transportno-tehnologicheskie sistemy. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. Otv. redaktor N.S. Zaharov [Transport and transport-technological systems. Materials of the International Scientific and Technical Conference. Editor-in-Chief N.S. Zakharov]. 2020. pp. 323-326. (InRuss.)

7. Grigorev I.V., Kunickaya O.A., Grigorev M.F., Grigoreva A.I. [Modeling of dynamic soil compaction process] // IX Mezhdunarodnaya konferenciya po matematicheskomu modelirovaniyu, posvyashchennaya 75-letiyu Vladimira Nikolaevicha Vragova. Tezisy dokladov. Severo-Vostochnyj federal'nyj universitet, Akademiya nauk Respubliki Saha (Yakutiya) [IX International Conference on Mathematical Modeling, dedicated to the 75th anniversary of Vladimir Nikolayevich Vragov. Theses of reports. North-Eastern Federal University, Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia)]. 2020. pp. 144. (InRuss.)

8. Nikitina E.I., Kunickaya O.A., Nikolaeva F.V. [Project for the organization of logging in the conditions of Aldan Forestry with the use of multi-operated logging complexes] // Sovremennye problemy i dostizheniya agrarnoy nauki v arktike. Sbornik nauchnyh statej po materialam Vserossijskoj studencheskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem v ramkah «Severnogo foruma – 2020» (29–30 sentyabrya 2020 g., YAkutsk) i Mezhdunarodnoj nauchnoj onlajn letnej shkoly – 2020 (6–20 iyulya 2020 g., YAkutsk) [Modern problems and achievements of agrarian science in the Arctic. Collection of scientific articles on the materials of the All-Russian student scientific-practical conference with international participation in the framework of "Northern Forum - 2020" (September 29-30, 2020, Yakutsk) and International scientific online summer school - 2020 (July 6-20, 2020, Yakutsk)]. 2020. pp. 138-148. (InRuss.)

9. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Tikhonov E., Makuev V., Egipko S., Hertz E., Zorin M. Modeling the effect of wheeled tractors and skidded timber bunches on forest soil compaction // Journal of Applied Engineering Science. 2021. Vol. 19. № 2. pp. 439-447.

10. Kunickaya O., Hertz E., Kruchinin I., Tikhonov E., Ivanov N., Dolmatov N., Zorin M., Grigorev I. Pressure control systems for tyre preservation in forestry machinery and forest soils // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2021. Vol. 18. № 3. pp. 95-102.

11. Burmistrova O.N., Prosuzhih A.A., Rudov S.E., Kunickaya O.A., Grigorev I.V. [Experimental studies of forwarder performance with regard to its operating characteristics, logging parameters, and physical and mechanical properties of the soil] // Resources and Technology. 2021. Vol. 18. № 1. pp. 94-124. (InRuss.)

12. Burmistrova O.N., Teterevleva E.V., Rudov S.E., Grigorev I.V., Kunickaya O.A. [Rationale for the initial requirements of the mathematical model of interaction of wheeled vehicles on low-pressure pneumatics with forest soils] // Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]. 2020. № 2 (46). pp. 94-99. (InRuss.)

13. Burmistrova O.N., Teterevleva E.V., Rudov S.E., Grigorev I.V., Kunickaya O.A. [Methodology and results of experimental studies of interaction of wheeled vehicles on low-pressure pneumatics with forest soils] // Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]. 2020. № 1 (45). pp. 66-71. (InRuss.)

14. Dobrecov R.YU., Grigorev I.V., Kunickaya O.A., Fam N.L. [Adapting the principle of low-frequency pulse steering control to transmissions of forestry and transport-tractor tracked machines] // Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya. [Repair. Restoration. Modernization]. 2020. № 11. pp. 29-35. (InRuss.)

15. Dobrecov R.YU., Grigorev I.V., Kunickaya O.A. [Tracked skidder chassis with "diagonal" steering system] // Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya. [Repair. Restoration. Modernization]. 2020. № 1. pp. 42-48. (InRuss.)

16. Dobretsov R., Grigorev I., Tikhonov E., Mikheev A., Khakhina A., Storodubtseva T., Shiryayev S., Burgonutdinov A. Impulse control technology for improving steering control systems of the tracked vehicles // International Review of Automatic Control. 2021. Vol. 14. № 3. pp. 172-178.

17. Hahina A.M. [Methods of predicting and improving the passability of wheeled forest machines]: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.21.01. [Ph. D. in Technical Sciences: 05.21.01.] - SPb, 2018. - 318 p. (InRuss.)

18. Hitrov E.G. [Comprehensive substantiation of parameters and operating modes of forest machine engines]: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.21.01. [Ph. D. in Technical Sciences: 05.21.01.] - Voronezh, 2020. - 319 pp. (InRuss.)

19. Rudov S.E., Khitrov E.G., Rudov M.E., Ustinov V.V. Raschet tiagovykh i stepnykh svoystv kolesnogo skiddera s ispolzovaniem dannykh zarubezhnykh kolleg [Calculation of Traction and Coupling Properties of a

Wheeled Skidder Using Data from Foreign Colleagues] // Aktualnye napravleniia nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriia i praktika. 2015. T. 3. № 1 (12). pp. 223-228. (InRuss.)

20. Kochnev A., Khitrov E. Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel Passover // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings. 2018. pp. 1005-1012.

21. Kalistratov A.V., Ivanov V.A., Korotkov R.K., Khitrov E.G., Grigorev G.V. Issledovanie koeffitsienta filtratsii lesnoi pochvy (sluchai dernovo-podzolistoi pochvy) [Investigation of the filtration coefficient of forest soil (case of soddy-podzolic soil)] // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2014. № 2 (22). pp. 190-193. (InRuss.)

22. Grigorev I.V., Nikiforova A.I., Pelymskii A.A., Khitrov E.G., Khakhina A.M. Eksperimentalnoe opredelenie vremeni relaksatsii napriazhenii lesnogo grunta [Experimental determination of the stress relaxation time of the forest soil] // Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. 2013. № 8 (137). pp. 77-80. (InRuss.).

© **Do Tuan Anh** - lecturer, Vietnam National Forestry University, e-mail: anhdo.dhln@gmail.com; **Zlobina N.I.** – Senior Lecturer of the Department of Organization of Transportation and Traffic Safety, VGLTU named after G.F. Morozov, e-mail: natasha\_boichka@mail.ru; **Kalyashov V.A.** – PhD in Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Descriptive Geometry and Engineering Graphics Department, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbSUATU), e-mail: vit832@yandex.ru; **Novgorodov D.V.** – Postgraduate student, Arctic State Agrotechnological University (ASATU), e-mail: novgorodov\_dulus@mail.ru; **Grigorieva O.I.** – PhD in Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Forestry Technology, SPbSFU, e-mail: grigoreva\_o@list.ru; **Khitrov E.G.** – Grand PhD in Engineering Sciences, Professor of the Department of Forestry Technology, SPbSFU, e-mail: yegorkhitrov@gmail.com.

УДК 625.852

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ЛЕСНЫХ МАШИН

**О.М. Тимохова, И.Н. Кручинин, О.Н. Бурмистрова, Я.И. Абрамов**

*Рассмотрены основные проблемы по повышению надежности деталей лесных машин путем контроля качества использования восстановленных деталей. Для восстановленных деталей характерно использование режимов приработки поверхностей. Разнообразие условий работы отдельных узлов машин предопределяет различное влияние режимов работы машины на их износ. Изнашивание любых узлов машины зависит от сочетания материалов, конструктивных особенностей пар трения и режимов работы, непосредственно обуславливающих изменения, как в материале, так и в геометрическом очертании поверхностей. Это вызывает значительные осложнения при эксплуатации лесных машин. Опыт эксплуатации лесных машин показывает, что трудоемкость их технического обслуживания и ремонта достаточно велика. Связано это со сложностью конструкции современных машин и использовании не всегда качественных и оригинальных запасных частей. Этот фактор напрямую влияет на надежность лесных машин. Таким образом, решить проблему позволит соответствующая методика контроля качества восстановленных деталей лесных машин. Целью исследований была разработка требований к системе контроля качества восстановленных деталей лесных машин. В работе рассматривалась задача: разработка требований к повышению надежности лесных машин, использующих восстановленные детали. С момента ввода в эксплуатацию до достижения предельного состояния отдельных узлов машин характер фрикционных связей, разрушение которых вызывает изнашивание деталей, меняется. Результатами работы стала разработка требований к восстанавливаемым деталям. В статье приведена оценка влияния качества восстановления деталей на надежность узлов и агрегатов лесных машин. Необходимо обеспечить уменьшение износа в период приработки сопрягаемых поверхностей деталей. Для этого необходимо проводить контроль: взаимного расположения поверхностей деталей; износа сопрягаемых поверхностей во время всего рабочего цикла; остаточного ресурса невозстанавливаемых поверхностей.*

**Ключевые слова:** лесные машины, надежность, отказ, восстановление.