

УДК 631.372

05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства (технические науки)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЯГОВЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЕСНЫХ  
ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН**

Коростелев Сергей Анатольевич  
доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой  
РИНЦ SPIN-код: 1971-8460  
E-mail: korsan73@mail.ru  
*Алтайский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова, Россия, г.  
Барнаул, пр. Ленина 46*

Горбачев Александр Владимирович  
кандидат технических наук, доцент  
E-mail: aleks\_gorb@mail.ru  
*Алтайский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова, Россия, г.  
Барнаул, пр. Ленина 46*

Клубничкин Владислав Евгеньевич  
кандидат технических наук, доцент  
Scopus Author ID: 57203352852  
РИНЦ SPIN-код: 6060-7794  
E-mail: vklubnichkin@mgul.ac.ru  
*Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-  
я Институтская, д. 1*

В работе представлены тяговые характеристики лесохозяйственных и трелевочных колесных тракторов с колесной формулой 4К4 и их анализ. Для определения тяговых показателей лесохозяйственных и трелевочных тракторов и построения тяговых характеристик применялась программа для ЭВМ, в основу которой положены соотношения теории трактора. Исходными данными для расчета тяговых характеристик являлись: эксплуатационный вес трактора; колесная формула трактора; динамический радиус колеса; характеристики почвенного фона; номинальные мощность и частота вращения коленчатого вала двигателя; удельный расход топлива двигателя; количество передач и передаточные числа трансмиссии; коэффициент полезного действия трансмиссии. В результате расчета получены параметры регуляторной характеристики двигателя. Определены теоретические скорости трактора и значения касательной силы тяги на ведущих колесах на соответствующих передачах трансмиссии. В функции от крюковой нагрузки построены графики зависимости коэффициента буксования и потенциального тягового коэффициента полезного действия трактора, а также действительной скорости, крюковой мощности трактора и

UDC 631.372

05.20.01 – Technologies and means of mechanization of agriculture (technical sciences)

**THE INVESTIGATION OF TRACTION  
CHARACTERISTICS OF WHEELED  
FORESTRY MACHINES**

Korostelev Sergey Anatolyevich  
Dr.Sci.Tech., assistant professor,  
Head of the Department  
RSCI SPIN-code: 1971-8460  
E-mail: korsan73@mail.ru  
*Polzunov Altai State Technical University, Russia,  
Barnaul, prospect Lenina 46*

Gorbachev Alexander Vladimirovich  
Cand.Tech.Sci., assistant professor  
E-mail: aleks\_gorb@mail.ru  
*Polzunov Altai State Technical University, Russia,  
Barnaul, prospect Lenina 46*

Klubnichkin Vladislav Evgenievich  
Cand.Tech.Sci., assistant professor  
Scopus Author ID: 57203352852  
RSCI SPIN-code: 6060-7794  
E-mail: vklubnichkin@mgul.ac.ru  
*Mytishchi branch Bauman Moscow State Technical  
University, Russia, 141005, Moscow region,  
Mytishchi, 1-ya Institutskaya,*

The article presents the traction characteristics of forestry and skidding wheeled tractors with the wheel formula 4K4 and their analysis. To calculate the traction indicators of forestry and skidding tractors and to engineer traction characteristics, we used a special computer program based on correlation of tractor theory. The initial data for the calculation of traction characteristics were: the operational weight of the tractor; the wheel formula of the tractor; the dynamic radius of the wheel; the characteristics of the soil specificity; the nominal power and engine crankshaft speed; the specific fuel consumption of the engine; the number of gears and transmission ratios; transmission efficiency factor. As a result of the calculation, the parameters of the regulatory characteristics of the engine were obtained. The theoretical tractor speeds and the values of tangential thrust force on the driving wheels on the corresponding transmissions are determined. The work determines theoretical tractor speeds and the values of tangential thrust force on the driving wheels on the corresponding transmissions. The performed analysis of traction characteristics has shown that skidding tractors, being a modification of an agricultural tractor, have higher traction characteristics

удельного крюкового расхода топлива, полученные для каждой передачи. Проведенный анализ тяговых характеристик показал, что трелевочные тракторы, являющиеся модификацией сельскохозяйственного трактора, обладают более высокими тяговыми показателями

Ключевые слова: КОЛЕСНЫЙ ТРАКТОР, ТЯГОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАКТОРА, ТЯГОВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТРАКТОРА, ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННАЯ МАШИНА, ТРЕЛЕВОЧНЫЙ ТРАКТОР

Keywords: WHEELED TRACTOR, TRACTOR TRACTION CHARACTERISTICS, TRACTOR TRACTION INDICATORS, FORESTRY MACHINE, SKIDDING TRACTOR

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-184-009>

Для повышения эффективности устойчивого использования и воспроизводства лесных ресурсов Российской Федерации требуется многофункциональный транспортно-технологический комплекс машин, обеспечивающий высокую механизацию лесохозяйственных мероприятий с применением цифровых технологий. В настоящее время отечественное машиностроение не производит колесных машин, которые предназначены для выполнения работ по лесовозобновлению и уходу за лесосекой после вырубке леса, а также при использовании навесного и прицепного оборудования для сбора, погрузки, разгрузки и транспортирования сортиментов, уборки порубочных остатков.

Для создания конструкций машин для выполнения лесохозяйственных работ необходимо выявление современного мирового уровня, тенденций развития и формирование технических требований к конструкции, техническим и эксплуатационным характеристикам разрабатываемой лесохозяйственной машине.

В работах [1 - 6] рассмотрены технико-экономические показатели трелевочных тракторов в различных природно-производственных условиях и показано, что основными критериями оценки эффективности является производительность и себестоимость заготавливаемой древесины [5, 7]. Производительность трелевочного трактора и себестоимость заготавливаемой древесины зависит от многих факторов,

характеризующих природно-производственные условия и конструктивные особенности трелевочного трактора и его технологического оборудования [1 - 8].

В связи с чем в настоящей работе рассмотрены тяговые характеристики колесных лесохозяйственных машин, технические характеристики которых представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики тракторов

Наименование характеристики	ТТР-411	EcoTrac 120V	LKT-81 Turbo	Timberjack 240C	Timberjack 360D
Масса эксплуатационная, кг	6450	7257	7145	8250	10012
Колесная формула	4К4а	4К4б	4К4б	4К4б	4К4б
Мощность номинальная двигателя, кВт	96	84	72,3	87	89
Трансмиссия, механическая, число передач вперед/назад	16/8	10/2	10/2	4/4	8/7

Расчет и построение тяговых характеристик выполнялся с помощью программы для ЭВМ [9].

Тяговая характеристика Беларус ТТР-411, который является модификацией сельскохозяйственного трактора Беларус 1221, представлена на рисунке 1. Расчет выполнен для работы с крюковой нагрузкой без догрузки ведущих колес весом трелеваемой пачки. На рисунке 1 представлены зависимости для рабочих и транспортных передач трансмиссии трактора

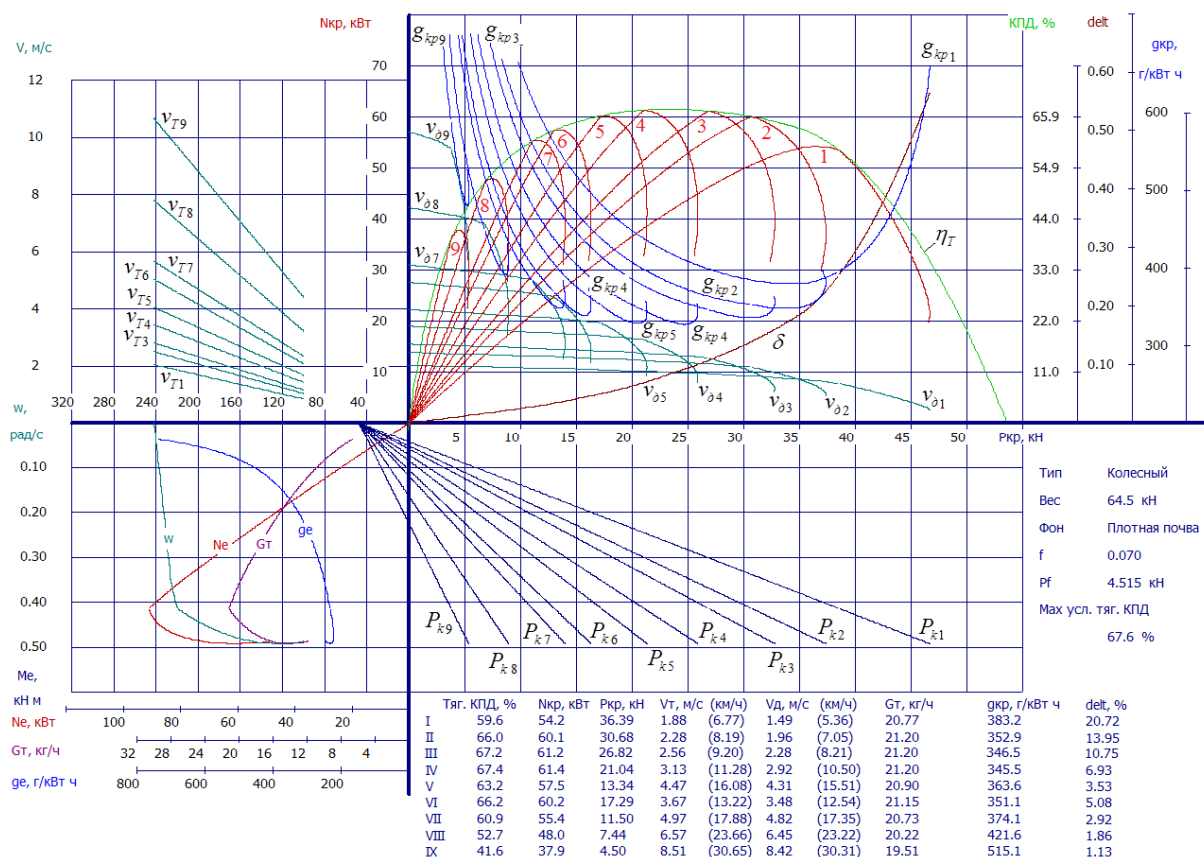


Рисунок 1 – Тяговая характеристика Беларус ТТР-411

1...9 – крюковая мощность соответственно на 1-ой, 2-ой и т.д. передачах

Здесь и далее на рисунках 1-5 приняты следующие обозначения:

$\eta_T$  – условный потенциальный тяговый коэффициент полезного действия трактора;

$P_k$  - касательная сила тяги на ведущих колесах;

$v_T$  – теоретическая скорость движения трактора;

$v_d$  – действительная скорость движения трактора;

$g_{кр}$  - удельный крюковой расход топлива;

$\delta$  – коэффициент буксования трактора;

$g_e$  – удельный расход топлива двигателя трактора;

$N_e$  – мощность двигателя трактора;

$M_e$  – момент двигателя трактора;

$G_T$  – часовой расход двигателя трактора.

Работа трактора Беларус ТТР-411 в диапазоне изменения крюковых нагрузок от 17 кН до 30 кН на 4-ех передачах возможна с максимальным значением тягового коэффициента полезного действия (КПД), величина которого составляет более 97% от максимально возможного КПД по потенциальной тяговой характеристике. Скорости движения в этом диапазоне крюковых нагрузок изменяются от 7,0 км/ч до 12,5 км/ч.

Одним из вариантов конструктивного исполнения специализированных машин для выполнения лесохозяйственных и лесозаготовительных работ является трактор трелевочный EcoTrac 120V, который является шарнирно-сочлененной машиной с колесной формулой 4К46. Тяговая характеристика EcoTrac120V представлена на рисунке 2 расчет выполнен для условий работы с крюковой нагрузкой без догрузки ведущих колес весом трелеваемой пачки.

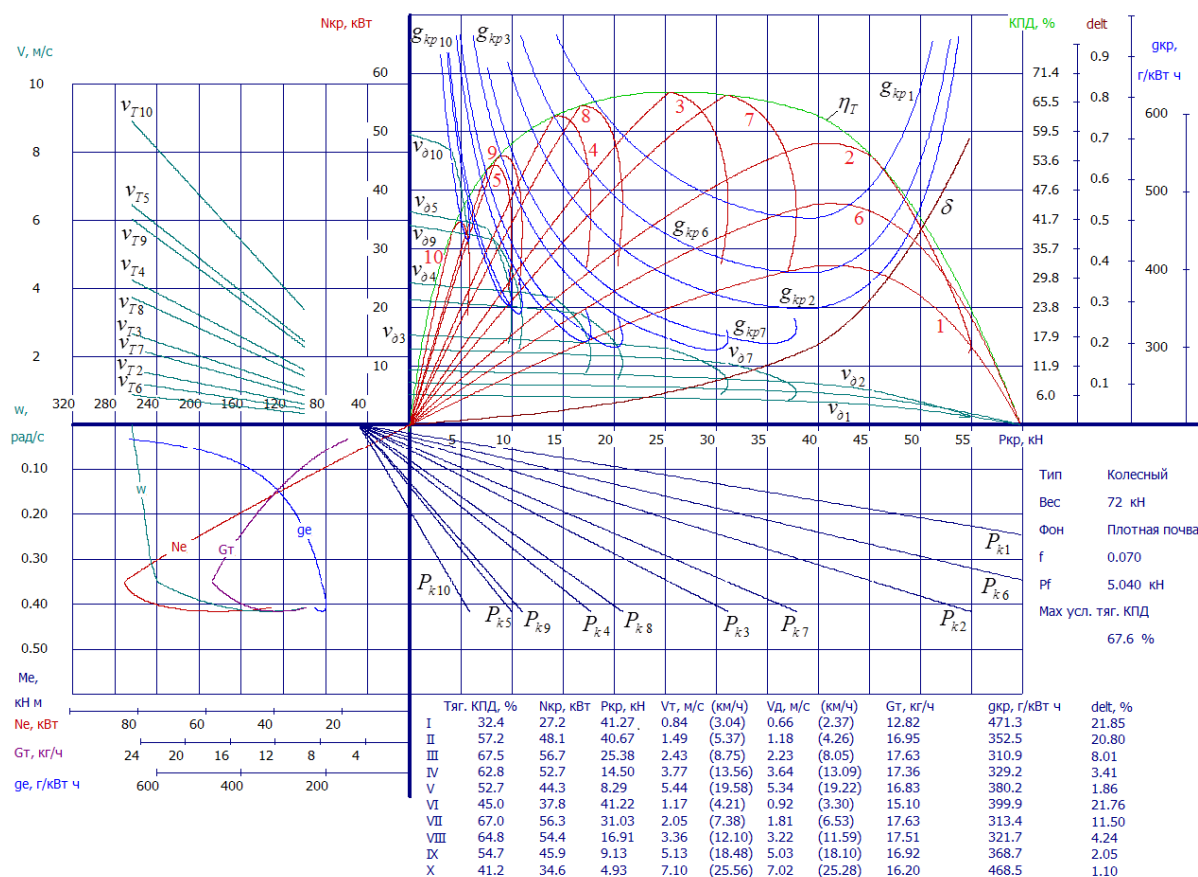


Рисунок 2 – Тяговая характеристика EcoTrac 120V  
 1...10 – крюковая мощность соответственно на 1-ой, 2-ой и т.д. передачах

Работа EсоTrac 120V в диапазоне изменения крюковых нагрузок от 14 кН до 31 кН на 4-ех передачах возможна с максимальным значением тягового КПД, величина которого составляет более 93% от максимально возможного КПД по потенциальной тяговой характеристике. Скорости движения в этом диапазоне крюковых нагрузок изменяются от 6,5 км/ч до 13,0 км/ч.

Диапазон изменения передаточных чисел трансмиссии позволяет двигаться во всем диапазоне крюковых нагрузок с КПД близким к потенциально возможному с крюковой нагрузкой от 5 до 40 кН.

Наличие передач трансмиссии с большим передаточным отношением обеспечивают возможность движения с низкими скоростями от 3,0 км/ч и развивать высокую касательную силу тяги на ведущих колесах, что обеспечивает возможность движения в тяжелых дорожных условиях.

Высокая максимальная скорость движения, достигающая 30 км/ч, позволяет использовать машину на транспортных операциях.

К недостаткам следует отнести разрыв между тяговыми усилиями между 16 кН и 25 кН (соотношение 1,56), что не позволяет в этом диапазоне эффективно осуществить загрузку двигателя, а также дублирование передач с близкими значениями крюковой нагрузки 8,29 кН и 9,13 кН.

Другим представителем семейства специализированных лесохозяйственных тракторов является LKT 81 Turbo. Его тяговая характеристика при работе с крюковой нагрузкой без догрузки ведущих колес весом трелюемой пачки представлена на рисунке 3.

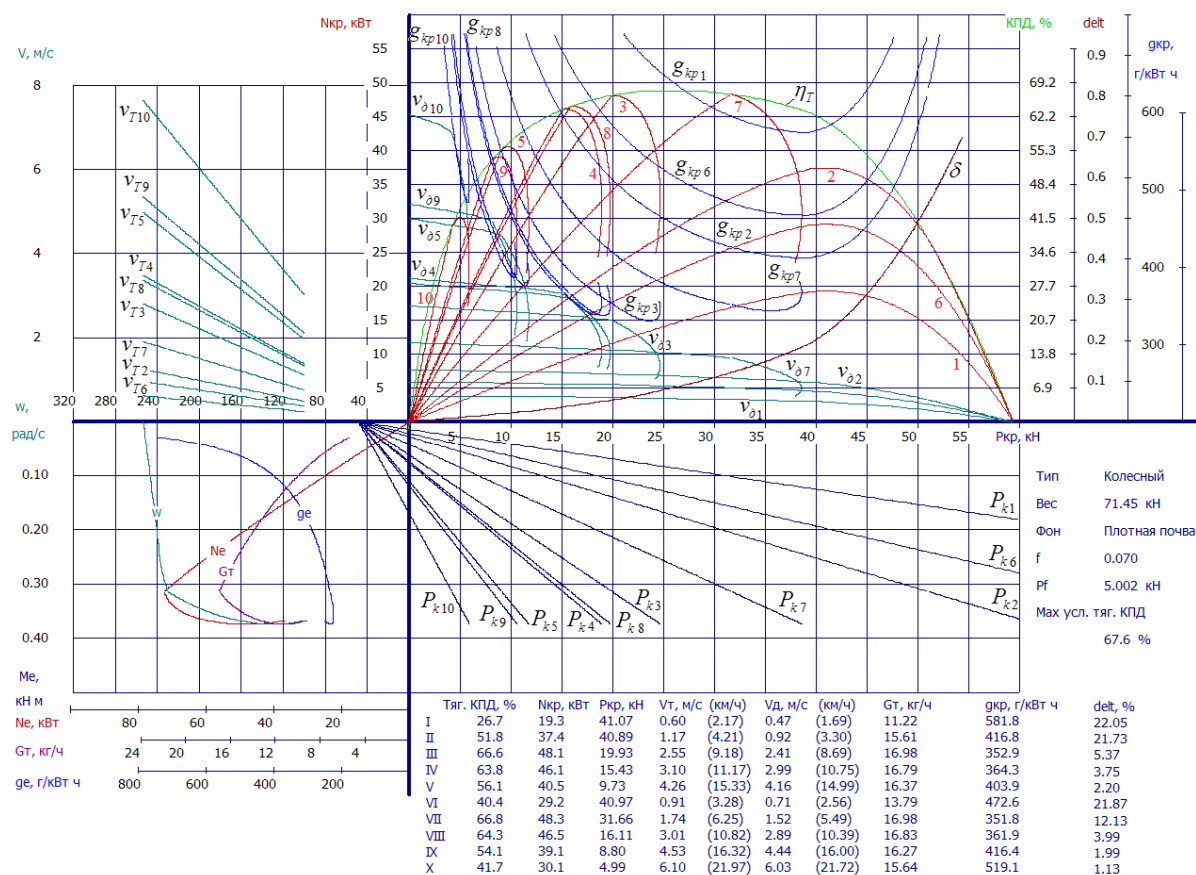


Рисунок 3 – Тяговая характеристика LKT-81 Turbo

1...10 – крюковая мощность соответственно на 1-ой, 2-ой и т.д. передачах

В диапазоне изменения крюковых нагрузок от 15 кН до 31 кН Работа LKT-81 Turbo с максимальным значением тягового КПД возможна на 4-ех передачах. Величина тягового КПД на этих передачах составляет более 94% от максимально возможного КПД по потенциальной тяговой характеристике. Скорости движения в этом диапазоне крюковых нагрузок изменяются от 5,5 км/ч до 11,0 км/ч.

Диапазон изменения передаточных чисел трансмиссии позволяет двигаться во всем диапазоне крюковых нагрузок от 5 до 20 кН с КПД близким к потенциально возможному.

Наличие передач трансмиссии с большим передаточным отношением обеспечивают возможность движения с низкими скоростями от 2,0 км/ч и развивать высокую касательную силу тяги на ведущих

колесах, что обеспечивает возможность движения в тяжелых дорожных условиях.

Высокая максимальная скорость движения, достигающая 25 км/ч, позволяет использовать машину на транспортных операциях.

К недостаткам следует отнести дублирование передач с близкими значениями передаточных отношений трансмиссии и обеспечивающих работу с крюковыми нагрузками 15,43 кН и 16,11 кН, (отличие менее 5%), 8,8 кН и 9,73 кН (отличие 10%). Другим существенным недостатком, снижающим эффективность использования мощности двигателя, является большой разрыв между передачами от 20 кН до 31 кН (соотношение 1,55).

Тяговая характеристика лесозаготовительной машины Timberjack 240С представлена на рисунке 4, расчет выполнен для режима работы с крюковой нагрузкой без догрузки ведущих колес весом трелемной пачки.

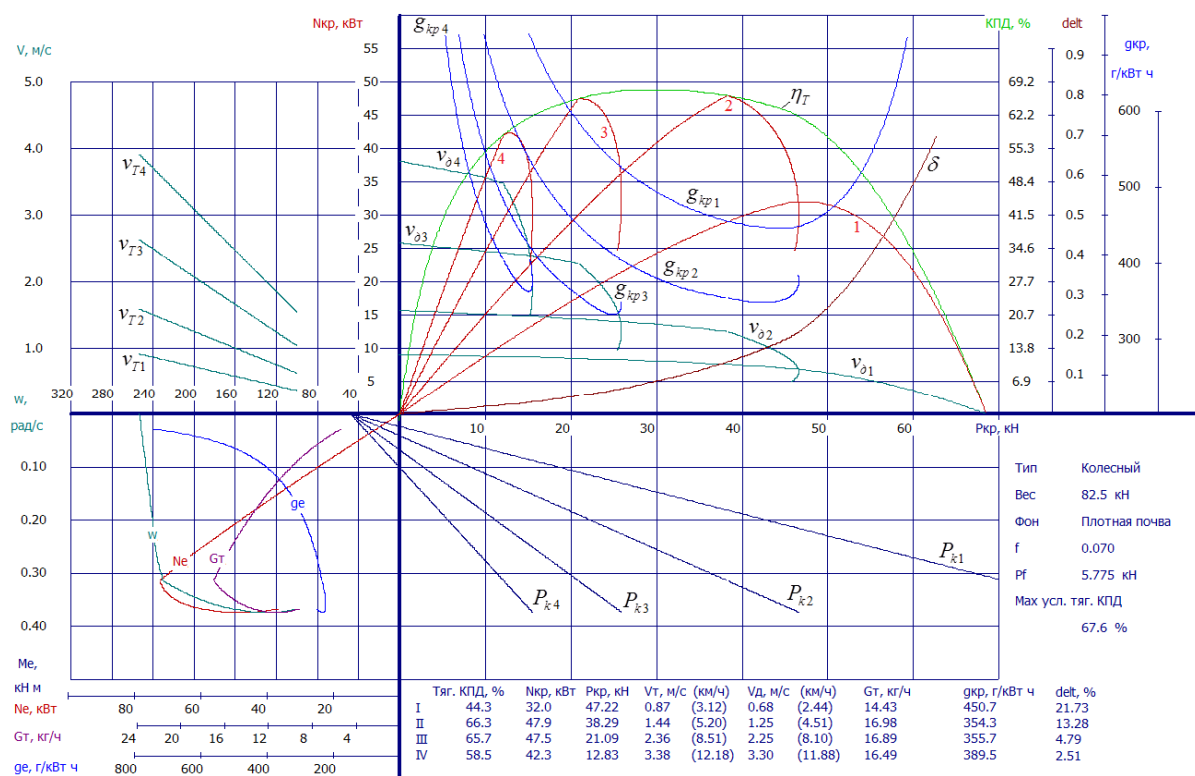


Рисунок 4 – Тяговая характеристика Timberjack 240С

1...4 – крюковая мощность соответственно на 1-ой, 2-ой и т.д. передачах

В области, соответствующей работе трактора со значениями тягового КПД более 97% от максимального значения тягового КПД потенциальной



характеристики, расположены 2 передачи. Оптимальная крюковая нагрузка на этих передачах составляет 21 кН и 38 кН при скоростях движения соответственно 8 км/ч и 4,5 км/ч. В трансмиссии Timberjack 240С всего 4 передачи, что не позволяет эффективно использовать трактор с высокими значениями тягового КПД во всем тяговом диапазоне.

Большие разрывы между передачами (отношение соседних передаточных чисел составляет 1,73; 1,65; 1,48) не позволяет двигаться во всем диапазоне крюковых нагрузок с КПД близким к потенциально возможному.

Низкая максимальная скорость движения, составляющая 12,8 км/ч, снижают эффективность применения машины на транспортных операциях.

Лесозаготовительная машина Timberjack 360D является представителем 60-й серии трелевочных тракторов компании Timberjack, предназначенных для круглогодичного выполнения лесозаготовительных работ, по сбору и транспортировке деревьев от места заготовки к объектам хранения и обработки в условиях равнинной и пересеченной местности.

На рисунке 5 представлена тяговая характеристика Timberjack 360D при работе с крюковой нагрузкой без догрузки ведущих колес весом трелеваемой пачки.

В диапазоне тяговых усилий от 9,0 до 66,9 кН равномерно расположены 8 передач, которые обеспечивают рациональную загрузку двигателя и обеспечивают работу трактора с тяговым КПД максимально близкому к потенциальным значениям.

В области, соответствующей работе трактора со значениями тягового КПД более 92% от максимального значения тягового КПД потенциальной характеристики, расположены 4 передачи. Диапазон изменения крюковой нагрузки на этих передачах от 23,8 до 59,4 кН позволяет эффективно использовать трактор с высокими значениями тягового КПД, обеспечивая при этом скорости движения трактора от 4,6 км/ч до 13,2 км/ч.

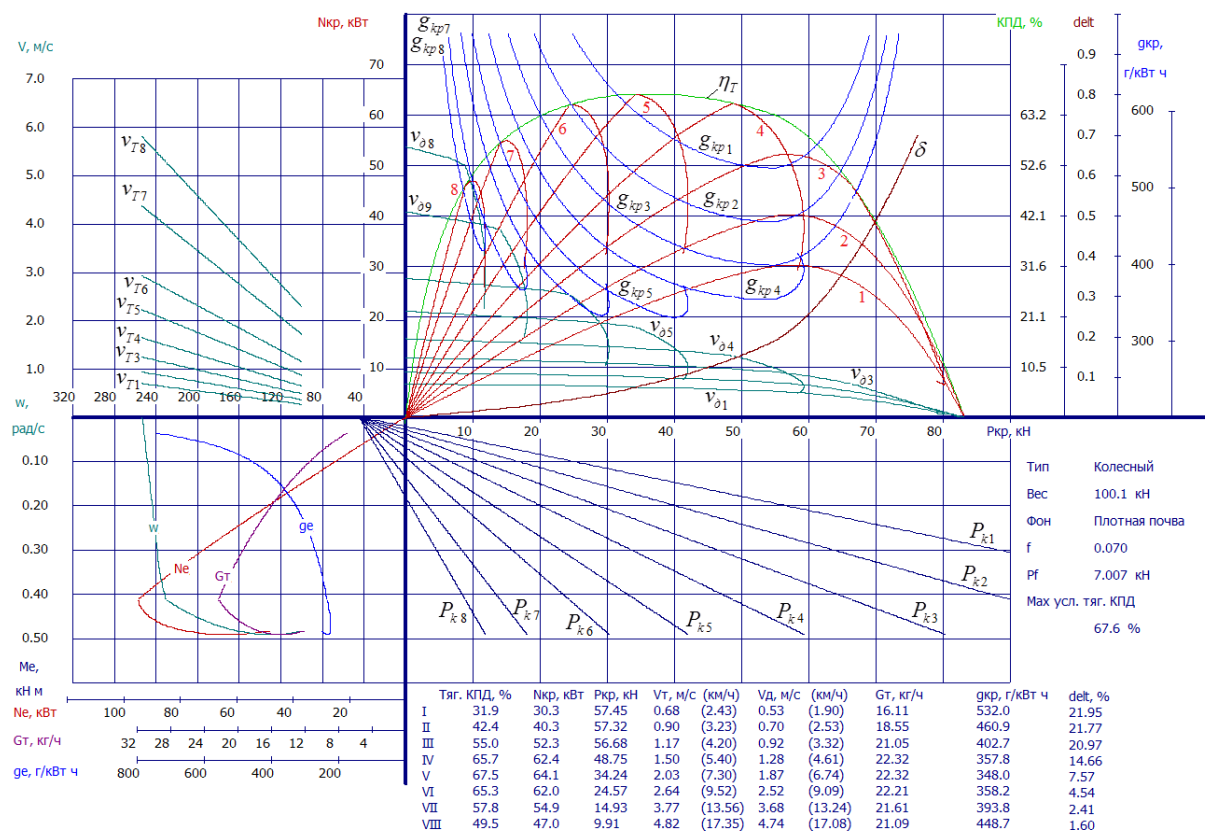


Рисунок 5 – Тяговая характеристика Timberjack 360D

1...8 – крутяковая мощность соответственно на 1-ой, 2-ой и т.д. передачах

Проведенный анализ показал, что трансмиссия колесных лесохозяйственных тракторов, которые являются модификацией сельскохозяйственных моделей, позволяет максимально эффективное использование трактора, что обеспечивается диапазоном изменения передаточных чисел трансмиссии и плотностью их ряда. Эти машины могут эффективно использоваться не только во всем тяговом диапазоне на рабочих передачах, но и при работе в транспортном режиме и при движении с низкими скоростями, необходимыми для выполнения технологических операций. Обеспечение высоких тяговых показателей является следствием применения достаточно сложных механических трансмиссий с большим количеством передач. Необходимо отметить, что указанные трансмиссии, как правило, проектировались для конкретной модели трактора с учетом возможной модернизации, поэтому характеристики двигателя, масса трактора, колесные движители и

передаточные числа трансмиссии еще на стадии проектирования были взаимоувязаны. Кроме того, этим же объясняется сохранение эффективности их использования с более высоким сцепным весом обусловленным применением навесного технологического оборудования или догрузкой ведущих колес весом трелюемой пачки.

**Благодарности:** Исследование выполнено в АлтГТУ им. И. И. Ползунова при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения №075-11-2021-039 от 25 июня 2021 г.

### Литература.

1. Шегельман И. Р., Скрыпник В. И., Кузнецов А. В. Анализ показателей работы и оценка эффективности лесозаготовительных машин в различных природно-производственных условиях // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2010. № 4 (109). С. 66–75.
2. Ву Хай Куан Повышение эффективности работы трелёвочных машин обоснованием рациональных передаточных чисел перспективных трансмиссий: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства». – С.-П., 2015. – 155с
3. Жуков А. В. Оценка эффективности использования колесного трелевочного трактора на заготовке древесины / А. В. Жуков, А. С. Федоренчик, А. В. Жорин // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 1998. – № 4. – С. 43-47.
4. Бурмистрова О. Н. Теоретические исследования производительности форвардеров при ограничениях воздействия на почвогрунты / О.Н. Бурмистрова, А.А. Просужих, Е.Г. Хитров [и др.]// Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2021. – № 3. – С. 101–116.
5. Colton A. Hitching optimal payloads increases skidder productivity / A. Colton, M. Brink // Southern African Forestry Journal. – 1999. – Vol. 186(1). – P. 29-32.
6. Zečić, Ž. Proizvodnost traktora Ecotrac 120V pri privlačenju drva u brdskom području središnje Hrvatske / Ž. Zečić, Z. Benković, I. Papa, J. Marenče, D. Vusić // Nova mehanizacija šumarstva. – 2019. – Vol. 40. – P. 1-10.
7. Horvat, D. Morphological characteristics and productivity of skidder ECOTRAC 120V / D. Horvat, Ž. Zečić, M. Šušnjar // Croatian Journal of Forest Engineering. – 2007. – Vol. 28. – P. 11-25.
8. Самсонов, В.А. Оптимизация тяговой характеристики сельскохозяйственного трактора/ В.А. Самсонов, Ю.Ф. Лачуга // Тракторы и сельхозмашины. – 2017.- № 11. – С. 49 – 56.

9. Коростелев С.А. Тяговый расчет трактора (TractorSolvar) / С.А. Коростелев//Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2004611126 от 06.05.04.

### References.

1. Shegel'man I. R., Skrypnik V. I., Kuznecov A. V. Analiz pokazatelej raboty i ocenka jeffektivnosti lesozagotovitel'nyh mashin v razlichnyh prirodno-proizvodstvennyh uslovijah // Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. «Estestvennye i tehnicheckie nauki». 2010. № 4 (109). С. 66–75.

2. Vu Haj Kuan Povyschenie jeffektivnosti raboty treljovochnyh mashin obosnovaniem racional'nyh peredatochnykh chisel perspektivnykh transmissij: dissertacija na soiskanie uchjonoj stepeni kandidata tehnicheckih nauk. Special'nost' 05.21.01 «Tehnologija i mashiny lesozagotovok i lesnogo hozjajstva». – S.-P., 2015. – 155s

3. Zhukov A. V. Ocenka jeffektivnosti ispol'zovanija kolesnogo trelevochnogo traktora na zagotovke drevesiny / A. V. Zhukov, A. S. Fedorenchik, A. V. Zhorin // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal. – 1998. – № 4. – S. 43-47.

4. Burmistrova O. N. Teoreticheskie issledovanija proizvoditel'nosti forvarderov pri ogranichenijah vozdejstvija na pochvogrunty / O.N. Burmistrova, A.A. Prosuzhij, E.G. Hitrov [i dr.]// Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal. – 2021. – № 3. – S. 101–116.

5. Colton A. Hitching optimal payloads increases skidder productivity / A. Colton, M. Brink // Southern African Forestry Journal. – 1999. – Vol. 186(1). – P. 29-32.

6. Zechich, ZH. Proizvodnost traktora Ecotrac 120V pri privlachenju drva u brdskom podrucl'ju sredishne Hrvatske / ZH. Zechich, Z. Benkovich, I. Papa, J. Marenche, D. Vusich // Nova mekhanizacija shumarstva. – 2019. – Vol. 40. – P. 1-10.

7. Horvat, D. Morphological characteristics and productivity of skidder ECOTRAC 120V / D. Horvat, ZH. Zechich, M. SHushnyar // Croatian Journal of Forest Engineering. – 2007. – Vol. 28. – P. 11-25.

8. Samsonov, V.A. Optimizacija tjagovoj harakteristiki sel'skohozjajstvennogo traktora/ V.A. Samsonov, Ju.F. Lachuga // Traktory i sel'hozmashiny. – 2017.- № 11. – S. 49 – 56.

9. Korostelev S.A. Tjagovyj raschet traktora (TractorSolvar) / S.A. Korostelev//Svidetel'stvo ob oficial'noj registracii programmy dlja JeVM №2004611126 ot 06.05.04.