

**А.В. Андронов, И.А. Зверев, М.С. Тюрина, Г.С. Тарадин,
О.А. Михайлов**

МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕСНЫХ УЗКОЗАХВАТНЫХ ВАЛОЧНО-ПАКЕТИРУЮЩИХ МАШИН ФРОНТАЛЬНОГО ТИПА

Введение. В настоящее время заготовка древесины в хлыстах сохраняет уверенные позиции как в России, так и во всем мире. Например, в 2013 г. по хлыстовой технологии в России заготавливалось примерно 26% от всего объема рубок в лесном комплексе [Большаков, 2015]. При машинной заготовке древесины в хлыстах используют комплекс техники, который включает в себя валочно-пакетирующую машину (ВПМ), трелёвочный трактор и сучкорезную машину. ВПМ в этом комплексе является основной. Как правило, используются гусеничные ВПМ экскаваторного типа. Данный вид техники обладает рядом преимуществ, таких как повышенная проходимость на грунтах со слабой несущей способностью, высокой производительностью в смену и грузоподъемностью. К недостаткам можно отнести большую массу и габариты машин, а также недостаточно высокую маневренность.

При проведении рубок ухода, широкое распространение нашли колесные узкозахватные ВПМ фронтального типа [Патякин и др., 2012]. Данный тип машин лишен недостатков гусеничных ВПМ, однако имеет меньшую производительность с учетом времени, затрачиваемого на маневрирование между срезаемыми деревьями.

Колесная узкозахватная валочно-пакетирующая машина фронтального типа, представляющая из себя лесопромышленный трактор с колесной схемой 4К4, предназначенный для срезания и последующего пакетирования деревьев. Машины этого типа имеют шарнирно-сочлененную раму, обеспечивающую машине возможность разворота до 90 градусов и, как следствие, высокую маневренность в условиях лесосеки. Силовая установка и кабина оператора смонтированы на задней части рамы совместно с противовесом, что обеспечивает устойчивость машины против опрокидывания за счет равномерного распределения масс в процессе срезания деревьев. Технологическое оборудование располагается в передней части рамы и представляет из себя гидроманипулятор высокой грузоподъемности, на

который фронтально навешивается захватно-срезающее устройство (ЗСУ). Наибольшее распространение получили ЗСУ с дисковым пильным механизмом, приводимым во вращение при помощи аксиально-поршневого гидромотора; также нашли применение и ножевые срезающие устройства. Как правило, все современные выпускающиеся модели ЗСУ оснащаются накопителем деревьев – дополнительным комплектом захватных рычагов, позволяющих удерживать сразу несколько деревьев и при этом продолжать спиливать последующие деревья.

Принимая во внимание массу современных колесных узкозахватных ВПМ фронтального типа (в среднем 11000-13000 кг), а также небольшую высоту этих машин (порядка 3,5 м), можно сказать, что современные модели ВПМ данного типа созданы преимущественно для проведения рубок ухода, так как могут работать под пологом леса и при этом не оказывать существенного вреда на почву, так как давление на грунт сопоставимо с ВПМ с гусеничным двигателем. Также некоторые модели колесных ВПМ могут применяться и при проведении сплошных и санитарных рубок. Такие машины имеют массу порядка 15000 кг, а ЗСУ позволяют спиливать деревья диаметром 600 мм и выше.

В роли основных параметров колесных узкозахватных ВПМ фронтального типа оперируют мощность двигателя, максимальный диаметр срезаемого дерева, эксплуатационную массу машины и давление на грунт. Для определения наиболее соответствующих значений параметров ВПМ необходимо учитывать уровень воздействия фактора нагрузки.

Целью исследования является определение оптимальных показателей колесных ВПМ посредством статистического анализа.

Методика исследования. В роли фактора, характеризующего величину нагрузки, которая передается от дерева на конструкцию технологического оборудования, применяется значение максимального диаметра срезаемого дерева. В качестве исходных данных использовались технические характеристики наиболее распространенных моделей ВПМ, представленные в табл. 1.

Основные параметры ВПМ лежат в интервале значений:

- Мощность N_e от 104 до 245 кВт;
- Масса M_m от 9979 до 15115 кг;
- Энергонасыщенность N_e/M_m от 9,38 до 17,88 кВт/т;
- Давление на грунт P от 50,0 до 76,0 кПа;
- Диаметр срезаемого дерева D от 460 до 660 мм;
- Масса ЗСУ $M_{ЗСУ}$ от 2155 до 3588 кг.

Таблица 1

**Технические характеристики наиболее распространенных моделей
колесных ВПМ**

Specifications for the most common wheel feller bunchers

Компания	Модель	Мощность, кВт	Масса, кг	Максимальный диаметр спиливаемых деревьев, мм	Масса ЗСУ, кг	Энергонасыщенность, кВт/т	Давление на грунт, кПа
John Deere	643J	150	12696	560	3012	11,81	64
	843J	175	12696	560	3012	13,78	64
	643L-II	157	13910	584	2494	11,28	70
	843L-II	201	13910	584	3090	14,45	70
	643H	127	11782	510	2728	10,78	59
	843H	149	11918	510	2728	12,50	60
	643L	157	13910	584	2971	11,28	70
	843L	201	13910	584	2971	14,45	70
	643K	130	12696	559	3071	10,24	64
	843K	168	12696	559	3071	13,23	64
Tigercat	718	129	10900	460	2430	11,83	55
	720D	129	11130	510	2155	11,59	56
	724D	160	12180	545	2690	13,14	61
	726D	160	12720	585	2690	12,58	64
	718E	129	11070	460	2430	11,65	56
	726E	245	13700	585	2690	17,88	69
	718G	129	12170	460	2430	10,59	61
	720G	165	13260	510	2155	12,44	66
	724G	189	13260	545	2690	14,25	66
	726G	230	13360	585	2950	17,21	67
Barko	685	104	9979	508	2926	10,42	50
	785B	125	11793	559	3338	10,59	59
	885B	160	14288	610	3452	11,19	72
	830B	224	15081	660	3588	14,85	76
Franklin	C4500S2	138	10100	510	2585	13,66	51
	C4800	149	12700	560	2970	11,73	64
	C5000	149	13331	585	3140	11,17	67
	C5500	156	13789	610	3240	11,31	69

Окончание табл. 1

Компания	Модель	Мощность, кВт	Масса, кг	Максимальный диаметр спиливаемых деревьев, мм	Масса ЗСУ, кг	Энергонасыщенность, кВт/т	Давление на грунт, кПа
Caterpillar	553C	130	13862	580	3220	9,38	70
	563C	152	14089	580	3220	10,79	71
	573C	180	14442	600	3220	12,46	72
	563D	151	14897	620	2847	10,13	75
	573D	179	15115	630	3220	11,84	76
	553	129	11476	508	2919	11,24	58
	563	147	12372	560	2973	11,88	62
	573	168	12599	560	2973	13,33	63
	533	152	12941	610	2782	11,74	65
	543	168	13907	610	2782	12,08	70

Наибольшим давлением на грунт (от 58 до 76 кПа) обладают машины фирмы Caterpillar, по причине высокой массы машин этой фирмы (от 11 476 до 15 115 кг). Другие фирмы изготовители имеют в своем модельном ряде более компактные машины с массой порядка 10000...11000 кг и соответственно небольшим давлением на грунт (50...55 кПа).

Разнообразный диапазон значений мощности двигателя и энергонасыщенности, можно объяснить потребностью некоторых моделей машин в приспособленности к конкретным условиям эксплуатации, например при работе на склонах, где требуется получить больший крутящий момент на ведущих колесах, по сравнению с машинами эксплуатирующимися на равнинной местности.

Значения показателей максимального диаметра срезаемых деревьев, массы ЗСУ, давления на грунт и эксплуатационной массы машин различаются несущественно.

Для анализа представленных технических характеристик валочно-пакетирующих машин, был использован метод статистической обработки. Объем выборки составил 50 значений при критерии Стьюдента равном 1,96, коэффициенте вариации 18% и точности 5%.

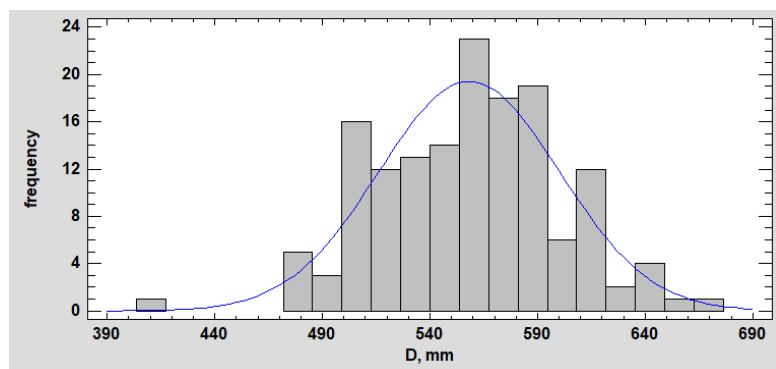
Результаты исследования. Результаты статистической обработки сведены в табл. 2. Статистический анализ был выполнен с применением программного обеспечения Statgraphics 18.

Таблица 2

**Значения основных статистик основных параметров
колёсных узкозахватных валочно-пакетирующих машин фронтального типа**

Values of basic statistics of the main parameters of wheel feller bunchers

Основные статисти- ки	Значения основных статистик					
	Мощ- ность N_e , кВт	Масса M_m , кг	Энергона- сыщенность N_e/M_m , кВт/т	Давление на грунт P , кПа	Масса ЗСУ $M_{ЗСУ}$, кг	Диаметр срезаемого дерева D , мм
Математическое ожидаие $m(X)$	156,46	12884	12,12	64,76	2897,5 2	559,44
Среднеквадратичное отклонение σ	28,19	1209	1,67	6,086	312,3	43,6704
Закон распределения	Логнор- мальный	Нормальный				
Коэффициент вариа- ции C_v , %	18	9	13,8	9,3	10,7	7,8
Критерий χ^2 (Chi- Square) и его уровень значимости p	14,1 0,12	12,3 0,5	7,3 0,69	9,7 0,46	5,7 0,95	19,1 0,08



*Рис. 1. Нормальное распределение значений показателя диаметра
срезаемого дерева современных колёсных валочно-пакетирующих машин*

*Fig. 1. Normal distribution of the values of the diameter of the cut tree
of modern wheeled feller bunchers*

В соответствии с данными в табл. 2, значения уровня значимости критерия χ^2 для всех параметров $p = 0,08...0,95$ больше, чем 0,05. Следовательно, распределение выборок параметров не отличаются от логнормального и нормального. В качестве примера графического представления нормального распределения диаметра срезаемых деревьев современных колёсных узкозахватных ВПМ фронтального типа, представлен рис. 1.

Учитывая значения коэффициента вариации $C_v = 13,8-18\%$, математические ожидания мощности двигателя $m(N_e)$ и энергонасыщенности $m(N_e/M_m)$ имеют заметные колебания, что может являться следствием конструктивных особенностей конкретных моделей ВПМ. Математические колебания массы машины $m(M_m)$, давления на грунт $m(P)$, массы ЗСУ $m(M_{ЗСУ})$ и диаметра срезаемого дерева $m(D)$ изменяются незначительно.

Оценить влияние максимального диаметра срезаемого дерева D на мощность двигателя N_e , массу машины M_m и давление на грунт P можно по графикам, представленным на рис. 2, 3 и 4 соответственно. Данные зависимости описываются линейными уравнениями регрессии. Коэффициент детерминации R^2 полученных зависимостей равен 0,33; 0,68; 0,68 соответственно. Уровни значимости t -критерия и F -критерия для всех трех уравнений составляет менее 0,05, т. е. коэффициенты уравнений и сами регрессионные зависимости достоверны на 95%. Коэффициент корреляции между массивами составил $r = 0,58; 0,83; 0,83$ соответственно.

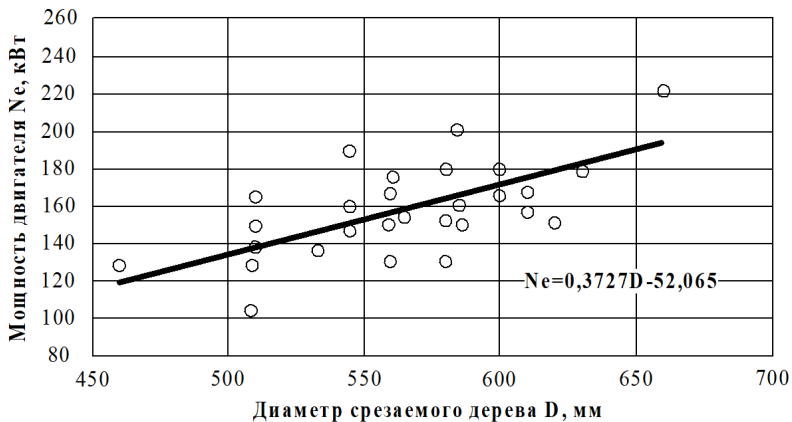


Рис. 2. Изменение мощности в зависимости от диаметра срезаемого дерева

Fig. 2. Change in power depending on the diameter of the cut tree

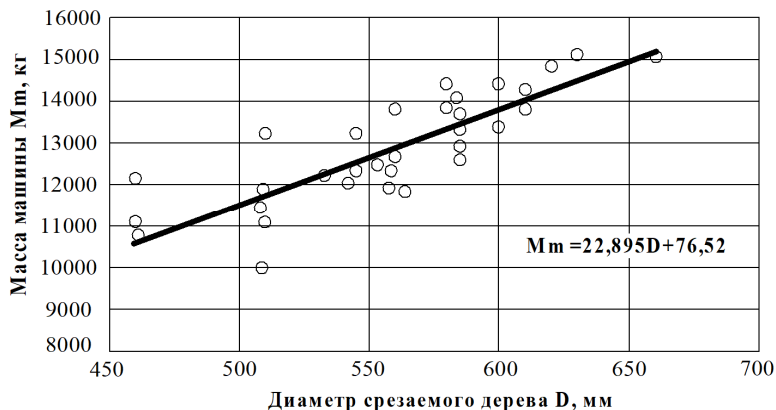


Рис. 3. Изменение массы ВПМ в зависимости от диаметра срезаемого дерева

Fig. 3. Change in the mass of the VPM depending on the diameter of the cut tree

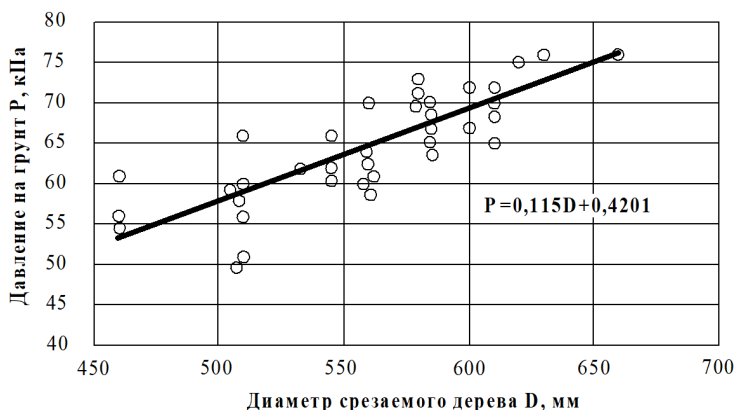


Рис. 4. Изменение давления на грунт в зависимости от диаметра срезаемого дерева

Fig. 4. Change in ground pressure depending on the diameter of the cut tree

Полученные регрессионные зависимости показывают, что при увеличении максимально возможного диаметра срезаемого дерева D на 100 мм мощность N_e , масса машины M_m и давление на грунт P увеличивается на 37 кВт, 2300 кг и 12 кПа соответственно.

Приведенные уравнения регрессии позволяют произвести оценку основных параметров колесных узкозахватных ВПМ фронтального типа на

стадии проектирования машины на основании требований, предъявляемых к необходимому диаметру срезаемого дерева. Также полученные регрессионные уравнения $N_e = f(D)$, $M_m = f(D)$ и $P = f(D)$ позволяют определить значения основных параметров для эксплуатации, в зависимости от диаметра срезаемого дерева.

Помимо анализа однофакторных регрессионных зависимостей, был также проведен и двухфакторный регрессионный анализ $N_e = f(D, M_m)$, $M_m = f(D, N_e)$ и $P = f(D, N_e)$, уравнения множественных регрессий имеют вид:

$$N_e = -52,8 + 0,15D + 0,0096M_m;$$

$$M_m = -52,8 + 0,15D + 0,0096N_e;$$

$$P = 2,54 + 0,04N_e + 0,1D.$$

Значения коэффициента детерминации R^2 для первого, второго и третьего выражения равны 0,38; 0,71 и 0,70 соответственно. Уровни значимости t -критерия для коэффициентов всех трех уравнений составляют менее 0,05, следовательно коэффициенты полученных множественных регрессий достоверны на 95%. Уровни значимости F -критерия составили менее 0,05 у трех уравнений, следовательно сами регрессионные уравнения достоверны на 95%.

Выводы. Полученные уравнения регрессии позволяют оценить характер и степень влияния основных действующих факторов. С помощью полученных зависимостей можно приближенно определить значения величин основных параметров колёсных узкозахватных ВПМ фронтального типа, т. е. мощности двигателя, массы машины и давления на грунт как на стадии проектирования, так и при подборе машины для эксплуатации в различных природно-производственных условиях, в зависимости от требований к диаметру срезаемого дерева.

Полученные двухфакторные регрессионные уравнения $N_e = f(D, M_m)$, $M_m = f(D, N_e)$ и $P = f(D, N_e)$ дают возможность произвести совокупную оценку влияния мощности двигателя ВПМ, массы машины и диаметра срезаемого дерева на давление на грунт, массу машины и мощность двигателя. Таким образом, полученные уравнения позволяют комплексно оценить и выбрать основные параметры колёсных узкозахватных валочно-пакетирующих машин фронтального типа.

Библиографический список

Андронов А.В., Зверев И.А. Исследование параметров, определяющих значение сменной производительности валочно-пакетирующих машин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. Вып. 233. С. 126–138. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.233.126-138

Большаков Б.М. Актуальные вопросы развития лесных машин и оборудования // Машины и оборудование лесопромышленного комплекса. 2015. № 2. С. 21–24. URL: <http://www.sdmpress.ru/online/220152701.pdf>

Патякин В.И., Григорьев И.В. Технология и машины лесосечных работ: учебник / под ред. В.И. Патякина. СПб.: СПбГЛТУ, 2012. 362 с.

Andronov A.V., Taradin G.S., Zverev I.A. Models for the determination of basic parameters of tracked feller buncher machines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 817 (2020) 012001. DOI: 10.1088/1757-899X/817/1/012001

Andy Horcher: – 2003/ Feller Bunchers Wheeled. Brochure p. 139.

Barko Inc. 2019 830B/ Wheeled Feller Buncher Specifications – Brochure p2

Caterpillar Inc. 2012 553C/563C/573C Wheel Feller Bunchers Brochure p. 28.

Deere & Company 2019 L-II Series Wheeled Feller Bunchers/ Disk-saw felling heads FD45/ FD55 / FD22B John Deere 643L-II/ 843L-II -Series Brochure p. 18.

Deere & Company 2019 Wheel Feller Bunchers/Harvesters John Deere 643J/843J-Series Brochure p. 16.

Tigercat Inc. 2018 1800 Bunching Shear/ 2000 Bunching Shear / 5000 Bunching Saw/ 5300 Bunching Saw/ 5500 Bunching Saw/ 5600 Bunching Saw/ 5400 Felling Saw/ 5702 Felling Saw/ 5702-26 Felling Saw/ Disc Saws and Shears, Brochure p. 8.

Tigercat Inc. 2020 720G/ 724G/ 726G Rive-To-Tree Feller Bunchers Brochure p. 8.

References

Andronov A.V., Taradin G.S., Zverev I.A. Models for the determination of basic parameters of tracked feller buncher machines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 817 (2020) 012001. DOI: 10.1088/1757-899X/817/1/012001.

Andronov A.V., Zverev I.A. Investigation of the parameters determining the value of the shift productivity of a feller-bunchers. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2020, iss. 233, pp. 126–138. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.233.126-138. (In Russ.)

Andy Horcher: – 2003/ Feller Bunchers Wheeled. Brochure p 139.

Barko Inc. 2019 830B/ Wheeled Feller Buncher Specifications – Brochure p2

Bolshakov B.M. Actual issues of the development of forestry machinery and equipment. *Construction and Road Building Machinery*, 2015, no. 2, pp. 21–24 (In Russ.)

Caterpillar Inc. 2012 553C/563C/573C Wheel Feller Bunchers Brochure p 28.

Deere & Company 2019 L-II Series Wheeled Feller Bunchers/ Disk-saw felling heads FD45/ FD55 / FD22B John Deere 643L-II/ 843L-II -Series Brochure p 18.

Deere & Company 2019 Wheel Feller Bunchers/Harvesters John Deere 643J/843J-Series Brochure p 16.

Patyakin V.I., Grigor'ev I.V. Logging technology and machines: textbook; edited by V.I. Patyakina. SPb.: SPbFTU, 2012. 362 p. (In Russ.)

Tigercat Inc. 2018 1800 Bunching Shear/ 2000 Bunching Shear / 5000 Bunching Saw/ 5300 Bunching Saw/ 5500 Bunching Saw/ 5600 Bunching Saw/ 5400 Felling Saw/ 5702 Felling Saw/ 5702-26 Felling Saw/ Disc Saws and Shears, Brochure p 8.

Tigercat Inc. 2020 720G/ 724G/ 726G Rive-To-Tree Feller Bunchers Brochure p 8.

Материал поступил в редакцию 24.09.2021

Андронов А.В., Зверев И.А., Тюрина М.С., Тарадин Г.С., Михайлов О.А. Модели формирования основных параметров колесных узкозахватных валочно-пакетирующих машин фронтального типа // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 241. С. 184–195. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.241.184-195

Исследование посвящено анализу основных технических характеристик колесных узкозахватных валочно-пакетирующих машин фронтального типа методами стохастического математического моделирования. Проанализированы были следующие параметры: мощность двигателя, масса машин, давление на грунт, энергонасыщенность, максимальный диаметр срезаемых деревьев и масса захватно-срезающих устройств. В результате статической обработки с применением программного обеспечения Statgraphics 18 были получены законы распределения каждого из исследуемых параметров. Также был проведен однофакторный и многофакторный регрессионный анализ. В результате однофакторного регрессионного анализа были получены зависимости мощности двигателя, давления на грунт и массы машины от максимально возможного диаметра срезаемых деревьев. Двухфакторный регрессионный анализ позволил получить зависимости: мощности двигателя от максимального диаметра срезаемых деревьев и массы машины; массы машины от максимального диаметра срезаемых деревьев и мощности двигателя; давления на грунт от максимального диаметра срезаемых деревьев и мощности двигателя. Полученные регрессионные зависимости позволяют приблизительно определить значения величин мощности, массы машины и давления на грунт как на стадии конструкторской разработки, так и при выборе машины для эксплуатации в зависимости от требований к диаметру срезаемых деревьев.

Ключевые слова: колёсная узкозахватная валочно-пакетирующая машина фронтального типа, основные параметры, диаметр срезаемого дерева, мощность, давление на грунт.

Andronov A.V., Zverev I.A., Tyurina M.S., Taradin G.S., Mikhailov O.A. Models for the formation of the main parameters of wheel feller bunchers. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehneskoj Akademii*, 2022, iss. 241, pp. 184–195 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.241.184-195

The research is devoted to the analysis of the main technical characteristics of wheeled narrow-grip feller buncher machines of frontal type by methods of stochastic mathematical modeling. The following parameters were analyzed: engine power, machine weight, ground pressure, power capacity, maximum diameter of trees to be cut and the weight of the feller head. As a result of static processing with Statgraphics 18 software, the laws of distribution of each of the investigated parameters. Also, a single-factor and multifactor regression analysis. As a result of the one-factor regression analysis we received the dependences of the engine power of the engine, ground pressure and machine weight on the maximum possible diameter of the trees to be cut. The two-factor regression analysis made it possible to dependences of: engine power from the maximum diameter of trees to be cut of trees to be cut and the weight of the machine; the weight of the machine from the maximum diameter of trees to be cut and engine power; ground pressure from maximum diameter of trees to be cut and engine power. The obtained regression dependencies make it possible to approximate values of power, machine weight and ground pressure both at the stage of design development stage and when choosing a machine for operation depending on requirements to cutting diameter.

Keywords: wheeled feller buncher, main settings, diameter of the cut tree, power, ground pressure.

АНДРОНОВ Александр Вячеславович – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 8345-3722, ORCID: 0000-0002-1035-9231.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: andronovalexandr@gmail.com

ANDRONOV Alexander V. – PhD (Technical), associate professor of Forestry engineering, service and repair department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8345-3722, ORCID: 0000-0002-1035-9231.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: andronovalexandr@gmail.com

ЗВЕРЕВ Игорь Андреевич – ассистент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 1126-2121, ORCID: 0000-0002-8163-7489.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: igorzv1997@gmail.com

ZVEREV Igor A. – assistant of Forestry engineering, service and repair department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 5247-6595, ORCID: 0000-0002-8163-7489.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: igorzv1997@gmail.com

ТЮРИНА Мария Сергеевна – магистр 2-го курса Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 6582-0730.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: turinamaria2017@yandex.ru

TYURINA Maryia S. – master student, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 6582-0730.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: turinamaria2017@yandex.ru

ТАРАДИН Григорий Сергеевич – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 5247-6595.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: grisha190@mail.ru

TARADIN Grigory S. – PhD (Technical), associate professor of Forestry engineering, service and repair department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 5247-6595.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: grisha190@mail.ru

МИХАЙЛОВ Олег Андреевич – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 4681-4898.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: kerro07@mail.ru

MIKHAILOV Oleg A. – PhD (Technical), associate professor of Forestry engineering, service and repair department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 4681-4898.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: kerro07@mail.ru