

## 2. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОК

---

УДК 630\*307

А.А. Платонов

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ СБОРА ПОРУБОЧНЫХ ОСТАТКОВ

*Введение.* При выполнении работ по текущему содержанию таких линейных инфраструктурных объектов, как полосы отвода автомобильных и железных дорог, трассы высоковольтных линий, а также полосы отвода под нефте- и газопроводы [Ersson, 2020], одной из технологических операций технологического процесса удаления нежелательной древесно-кустарниковой растительности с территории вышеуказанных объектов является операция сгребания и/или сбора порубочных остатков [Михайлов, 2016; Технология, 2012; Yoshida, 2012], применяемых нередко в дальнейшем для производства энергетического топлива [Базаров, 2020; Сютёв, 2014; Karpachev, 2020]. Указанная операция, в случае её выполнения механизированным способом [Бартенев, 2013; Мясищев, 2018], осуществляется при помощи специализированного технического средства, предназначенного для сбора неизмельчённых порубочных остатков и навешиваемого на переднюю или заднюю навеску трактора или на конец стрелы-манипулятора многофункциональной машины (рис. 1).

Осуществленным нами исследованием современных технических средств по сбору и сгребанию нежелательной растительности (в том числе, с/под поверхности водных объектов) [Силаев, 2020; Шегельман, 2005; Coleman, 2019] было выявлено многообразие применяемых соответствующих средств механизации (с предложенным нами названием «лесные грабли» и соответствующим определением), различающихся по назначению, области применения, способам агрегатирования с базовым транспортным средством, а также конструктивным особенностям, в том числе нами была выполнена их классификация, детальное описание которой не входит в цели и задачи данной статьи. При этом для некоторых обоснованных нами

классификационных признаков лесных граблей (в частности – ширины их захвата и густоты; рис. 2) было установлено значительное влияние субъективной составляющей, оказывающей воздействие на непосредственное отнесение классифицируемых лесных граблей к тому или иному элементу соответствующего классификационного ряда.

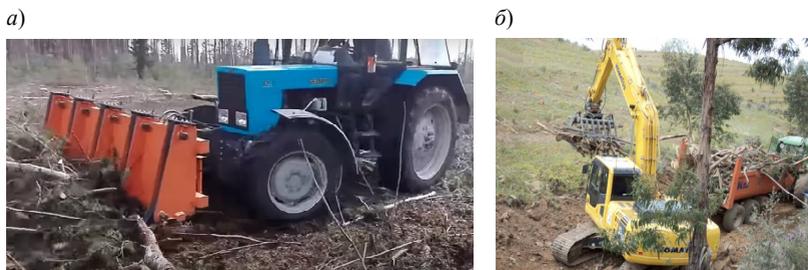


Рис. 1. Удаление порубочных остатков

а) грабли лесные EM 2200 + трактор Belarus 82.1; б) грабли лесные Grab Bucket Excavator + многофункциональная машина Komatsu PC-210

Fig. 1. Removal of chopped residues

а) forest rake EM 2200 + tractor Belarus 82.1; б) forest rake Grab Bucket Excavator + multifunctional machine Komatsu RS-210

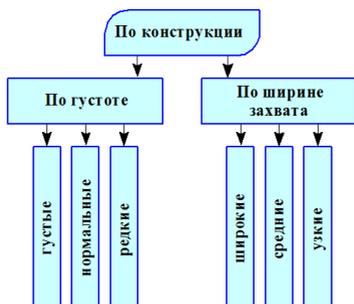


Рис. 2. Компонент предварительной классификации лесных граблей

Fig. 2. Component of preliminary classification of forest rake

Цель работы – повышение эффективности классифицирования лесных граблей путём обоснования распределения их основных конструктивных параметров на основе математического моделирования.

*Методика исследования.* Для реализации указанной цели нами было проанализировано более 500 моделей лесных граблей отечественного (российского и приравненного к отечественным белорусского), а также зарубежного производства. Исследование осуществлялось по актуальным на момент выполнения данной работы нормативным документам ряда акционерных обществ, специализирующихся на удалении нежелательной поросли с территорий линейных объектов транспортной инфраструктуры, а также каталогам технических средств сбора и сгребания нежелательной растительности, размещённых на официальных сайтах производителей указанной техники. В качестве основных конструктивных параметров лесных граблей нами в данном исследовании были приняты ширина захвата (обозначенная нами  $B_R$ , мм), ширина одного зуба ( $B_Z$ , мм) и количество зубьев  $Z$ . Причиной этого служит то, что именно эти параметры исследуемых технических средств оказывают, на наш взгляд, наибольшее влияние как на производительность работ по очистке территорий линейных инфраструктурных объектов от нежелательной растительности, так и на качество выполнения указанных работ.

Методологическую основу выполненного нами исследования составлял комплекс методов логического, статистического и компаративного анализа, а также сопоставительный анализ.

*Результаты исследования.* Для корректного описания математической модели введём следующие обозначения и начальные граничные критерии:

$\mathfrak{R}$  – множество чисел;

$M$  – множество целых чисел:  $M \in \mathfrak{R}$ ;

$Z$  – количество зубьев лесных граблей:  $Z \in M, Z \geq 2$ ;

$B_R$  – ширина захвата лесных граблей, мм:  $B_R \in \mathfrak{R}, 500 \leq B_R \leq 4000$ ;

$B_Z$  – ширина одного зуба лесных граблей, мм:  $B_Z \in \mathfrak{R}, 12 \leq B_Z \leq 100$ .

Результаты статистической обработки принятой в исследование генеральной совокупности выше рассмотренных параметров лесных граблей [Глинский, 2002] позволили подтвердить предварительно выдвинутую гипотезу о возможности разделения данной совокупности на три части (*Зона I, Зона II и Зона III*; рис. 3, а), при этом было визуализировано данное разделение в части формирования распределений по трём зависимостям  $B_R = f(B_Z)$ .

Анализ полученных результатов статистической обработки подвыборок трёх вышеуказанных зон распределения позволил нам выявить высокие и весьма высокие связи между исследуемыми признаками (а именно, в 82–95% случаев входной параметр влияет на выходной параметр), опреде-

лить статистическую значимость установленных коэффициентов регрессии и в целом выявить статистическую значимость полученных уравнений регрессии, где в качестве зависимых параметров нами были приняты ширина захвата лесных граблей  $B_R^{(I)}$ ,  $B_R^{(II)}$  и  $B_R^{(III)}$  (соответственно, для Зоны I, Зоны II и Зоны III), а в качестве независимого параметра – ширина одного зуба лесных граблей  $B_Z$  (рис. 3, б).

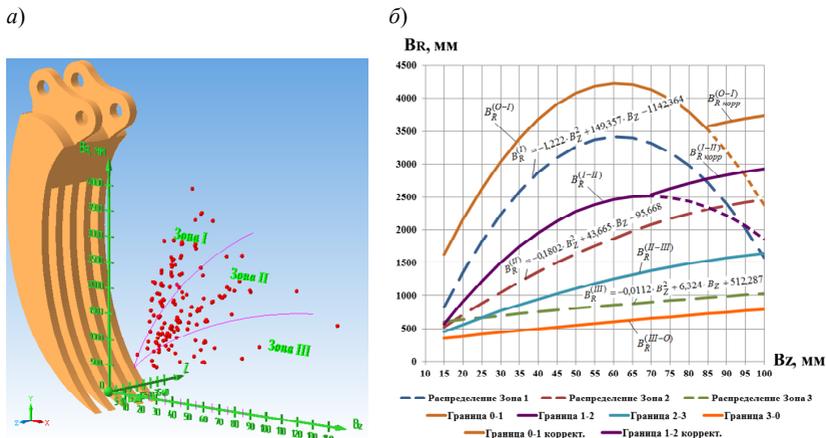


Рис. 3. Визуализация зонных и граничных распределений зависимости ширины захвата лесных граблей от ширины одного зуба

Fig. 3. Visualization of zonal and boundary distributions of the dependence of the width of the forest rake on the width of one tooth

Приняв во внимание вышеизложенное, нами была установлена основная система уравнений, описывающих положение границ характерных зон распределения ширины захвата лесных граблей от количества их зубьев  $B_R = f(Z)$ :

$$\begin{cases} B_R^{(O-I)} = -1,222 B_Z^2 + 149,357 B_Z - 338,836, \\ B_R^{(I-II)} = -0,674 B_Z^2 + 92,853 B_Z - 678,523, \\ B_R^{(II-III)} = -0,0957 B_Z^2 + 24,994 B_Z + 100,076, \\ B_R^{(III-O)} = -0,0112 B_Z^2 + 6,324 B_Z + 512,287, \end{cases} \quad (1)$$

где  $B_R^{(O-I)}$  – максимальная условная граница распределения случайной величины (ширины захвата лесных граблей) для Зоны I;  $B_R^{(I-II)}$  – граница

распределения случайной величины между *Зоной I* и *Зоной II*;  $B_R^{(II-III)}$  – граница распределения случайной величины между *Зоной II* и *Зоной III*;  $B_R^{(III-0)}$  – минимальная условная граница распределения случайной величины для *Зоны III*.

Ввиду нехарактерного (для выявленного нами распределения основных параметров лесных граблей) снижения случайной величины трендов  $B_R^{(O-I)}$  и  $B_R^{(I-II)}$  при  $B_Z > 70-80$  мм нами была выполнена их корректировка с определением граничной точки  $B_Z^{O-I} = 84,2351$  мм смены тренда  $B_R^{(O-I)}$  на тренд  $B_{R \text{ корр}}^{(O-I)}$  и граничной точки  $B_Z^{I-II} = 68,7878$  мм смены тренда  $B_R^{(I-II)}$  на тренд  $B_{R \text{ корр}}^{(I-II)}$ , при этом:

$$\begin{cases} B_{R \text{ корр}}^{(O-I)} = -0,1802B_Z^2 + 43,665B_Z + 1171,994, \\ B_{R \text{ корр}}^{(I-II)} = -0,1802B_Z^2 + 43,665B_Z + 368,466. \end{cases} \quad (2)$$

В части рассмотрения зависимости ширины захвата лесных граблей от количества их зубьев  $B_R = f(Z)$  необходимо отметить следующее. Несмотря на то, что нами не было выявлено адекватных уравнений регрессий для полученной выборки, с достаточной степенью точности описывающих данную зависимость, тем не менее является очевидным факт того, что с увеличением количества зубьев  $Z$  ширина лесных граблей  $B_R$  также возрастает. Однако при стабильно неизменной величине  $B_R$  увеличение  $Z$  (при  $B_Z = \text{const}$ ) неизбежно ведёт к уменьшению интервала (расстояния) между двумя соседними зубьями  $B_{pr}$  (мм), определяемого по зависимости

$$B_{pr} = \frac{B_R - ZB_Z}{Z - 1}. \quad (3)$$

Такое уменьшение расстояния приводит, в свою очередь, к постепенному переходу лесных граблей или в категорию лесных щёток (для которых характерно расположение зубьев в несколько рядов с частичным или полным перекрытием указанного расстояния  $B_{pr}$  и оправданно при необходимости создания оборудования для более тщательной очистки территории от порубочных остатков небольшого размера), или в категорию отвалов и ковшей (работа которых сопряжена с неизбежным захватом вместе с порубочными остатками верхнего слоя почвы, что отрицательным образом отражается на ряде экологических показателей очищаемой территории).

С учётом вышеизложенного, установим граничные критерии  $I_{RZ \min}$  и  $I_{RZ \max}$  соотношения ширины зубьев  $B_Z$  лесных граблей и интервала между двумя соседними зубьями  $B_{pr}$ :

$$\begin{cases} \text{при } B_Z \rightarrow 0: & I_{Rz \min} = \lim \frac{B_Z}{B_{pr}} \rightarrow 0, \\ \text{при } B_Z \rightarrow B_{pr}: & I_{Rz \max} = \lim \frac{B_Z}{B_{pr}} \rightarrow 1, \end{cases} \quad (4)$$

где достижение граничного критерия ширины зубьев лесных граблей  $I_{RZ \min} = 0$  соответствует переходу лесных граблей в категорию «отвалы, ковши», а  $I_{RZ \max} = 1$  – в категорию «лесные щётки».

Приняв предельное значение отношения  $B_Z / B_{pr} = 1$  с учётом вышеприведённой зависимости  $B_{pr} = f(B_R, Z)$  после некоторых преобразований получим критическую ширину  $B_{Rc}$  (мм) лесных граблей при предельном соотношении ширины зубьев и интервала между двумя соседними зубьями:  $B_{Rc} = B_Z(Z - 1)$ , мм.

Результаты математического моделирования критической ширины  $B_{Rc}$  лесных граблей представлены на рис. 4:

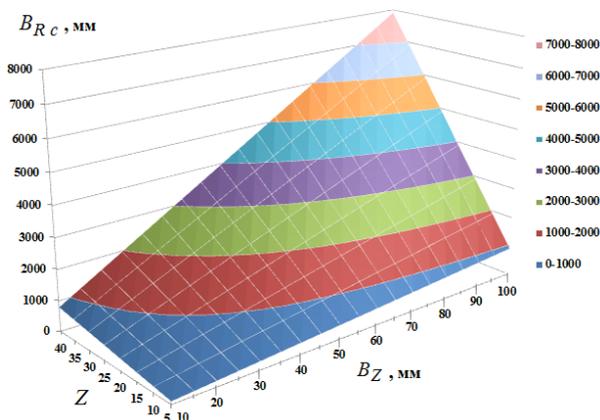


Рис. 4. Зависимость критической ширины  $B_{Rc}$  лесных граблей от количества  $Z$  и ширины  $B_Z$  зубьев

Fig. 4. Dependence of the critical width  $B_{Rc}$  of the forest rake on the number  $Z$  and width  $B_Z$  of teeth

Учитывая вышеприведённые рассуждения об уменьшении интервала (расстояния) между двумя соседними зубьями  $B_{pr}$ , в качестве показателя густоты распределения зубьев лесных граблей нами предлагается использовать критерий  $D_{Rz}$ , определяемый как соотношение интервала между двумя соседними зубьями  $B_{pr}$  и ширины  $B_R$  лесных граблей:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{при } B_{pr} \rightarrow 0: \quad D_{Rz \min} = \lim \frac{B_{pr}}{B_R} \rightarrow 0, \\ \text{при } B_{pr} \rightarrow B_R: \quad D_{Rz \max} = \lim \frac{B_{pr}}{B_R} \rightarrow 1, \end{array} \right. \quad (5)$$

где достижение критерия густоты распределения зубьев лесных граблей как  $D_{Rz \min} = 0$ , так и  $D_{Rz \max} = 1$  соответствует переходу лесных граблей в категорию «отвалы, ковши».

Следует отметить, что несмотря на схожесть выражений критериев ширины зубьев лесных граблей  $I_{Rz}$  и густоты распределения зубьев  $D_{Rz}$ , между ними есть существенные различия, определяющие то, что критерий  $I_{Rz}$  характеризует момент перехода «отвалы (ковши) ↔ лесные грабли ↔ лесные щётки», в то время как критерий  $D_{Rz}$  фактически показывает степень отдалённости до указанного перехода.

С учётом вышеизложенного для обеспечения возможности проведения классификации существующих и перспективных конструкций лесных граблей нами предлагается ввести в практику применения в научной и справочной литературе (а также на производственных предприятиях и при организации работ по удалению нежелательной древесно-кустарниковой растительности с территорий различных инфраструктурных объектов) нижеследующие критерии и соответствующие им шкалы.

Для оценки густоты распределения зубьев лесных граблей по ширине их захвата в качестве классификационного признака нами предлагается использовать критерий  $D_{Rz}$  (учитывающий соотношение интервала между двумя соседними зубьями  $B_{pr}$  и ширины  $B_R$  лесных граблей:  $D_{Rz} = B_{pr} / B_R$ ) со следующими граничными его значениями (см. таблицу):

Для оценки ширины захвата лесных граблей в качестве классификационного признака нами предлагается использовать критерий удельной ширины граблей  $SW_R = f(B_R; B_Z)$ , определяемый как функция соотношения ширины захвата граблей и ширины одного зуба (рис. 5). Граничные значения данного критерия устанавливаются по выявленным нами зависимостям (1, 2), при этом к первоначальным трём зонам распределения основ-

ных конструктивных параметров лесных граблей (рис. 3; Зона I соответствует средне-широким лесным граблям, Зона II – нормальным, а Зона III – узким) было добавлено ещё три (Зона IV соответствует широким лесным граблям, Зона V – экстра-широким, Зона VI – экстра-узким).

**Значения критерия  $D_{Rz}$  густоты распределения зубьев лесных граблей**

**Values of the criterion  $D_{Rz}$  for the density of distribution of forest rake teeth**

| № п/п | Критерий $D_{Rz}$ | Характеристика лесных граблей |
|-------|-------------------|-------------------------------|
| 1     | 0...0,04          | Экстра-густые                 |
| 2     | 0,04...0,09       | Густые                        |
| 3     | 0,09...0,25       | Нормальные                    |
| 4     | 0,25...0,5        | Редкие                        |
| 5     | 0,5...1,0         | Ультра-редкие                 |

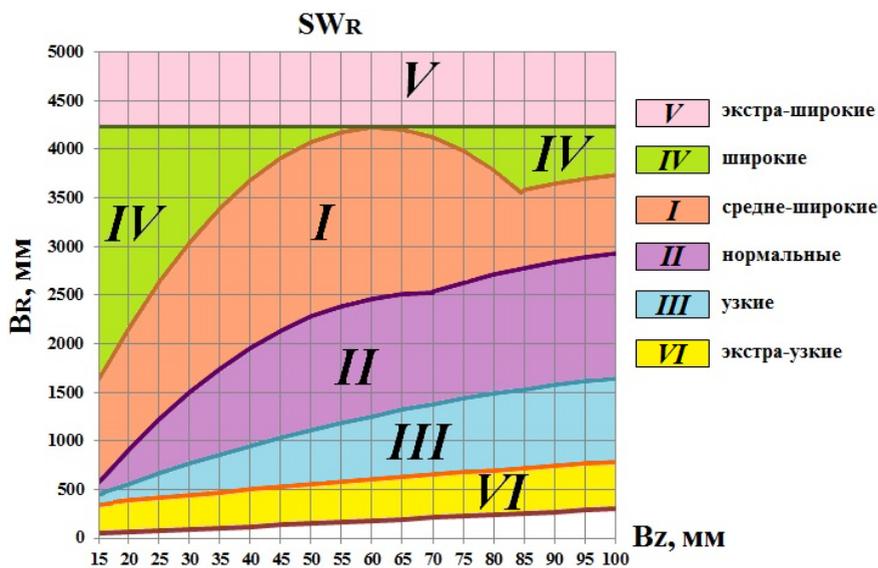


Рис. 5. Классификационное распределение лесных граблей по критерию удельной ширины  $SW_R$

Fig. 5. Classification distribution of forest rakes by to the criterion of specific width  $SW_R$

Нижняя граница критерия удельной ширины лесных граблей  $SW_R$  была принята для вышерассмотренной критической ширины  $B_{Rc}$  лесных граблей при минимально допустимом количестве зубьев  $Z = 2$ :  $B_{Rc \min} = 3B_Z$ . Следует отметить, что полученная зависимость является теоретической с весьма малой долей вероятности того, что реальная ширина какой-либо модели лесных граблей (даже в зоне больших величин ширины одного зуба) будет соответствовать значениям указанной зависимости.

Граница критерия удельной ширины лесных граблей  $SW_R$ , разделяющая зоны экстра-широких и широких лесных граблей была принята по следующим соображениям. Как уже отмечалось выше, выполненным нами исследованием было выявлено незначительное (около 1,42%) количество моделей лесных граблей с шириной захвата более 4000 мм. При этом нами была определена выраженная точка экстремума для верхней условной границы зоны средне-широких граблей  $B_{R \max}^{(O-I)} = 4224,892$  мм при  $B_Z = 61,112$  мм. С учётом вышеизложенного, нижняя граница распределения экстра-широких лесных граблей была установлена нами на величине  $B_R^{(V-IV)} = 4224,892$  мм.

На рис. 6 представлено классификационное распределение (в процентном соотношении) современных моделей лесных граблей по критерию густоты зубьев и по критерию удельной ширины:

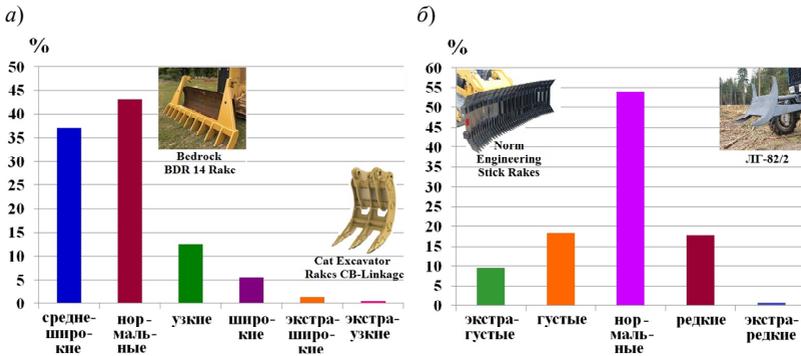


Рис. 6. Классификационное распределение моделей лесных граблей  
 а) по критерию густоты зубьев  $D_{Rz}$ ; б) по критерию удельной ширины  $SW_R$

Fig. 6. Classification distribution of forest rake models

а) by the criterion of the density of the teeth  $D_{Rz}$ ;

б) by to the criterion of specific width  $SW_R$

*Выводы.*

1. Выполненное исследование основных конструктивных параметров лесных граблей позволило установить систему уравнений, описывающих положение границ характерных зон распределения ширины захвата лесных граблей от количества их зубьев.

2. Для оценки ширины захвата лесных граблей в качестве классификационного признака предложено использовать критерий удельной ширины граблей, определяемый как функция соотношения ширины захвата граблей и ширины одного зуба.

3. Показаны результаты математического моделирования критической (минимальной) ширины лесных граблей в зависимости от их количества зубьев и ширины одного зуба, характеризующие момент перехода лесных граблей в категорию «лесные щётки».

4. Для оценки густоты распределения зубьев лесных граблей по ширине их захвата в качестве классификационного признака предложено использовать критерий густоты зубьев, учитывающий соотношение интервала между двумя соседними зубьями и ширины лесных граблей; предложены граничные значения данного критерия.

5. Вышерассмотренная математическая модель позволяет с достаточной степенью точности выполнить классификацию лесных граблей в части разделения существующих и/или перспективных технических средств для сбора и сгребания порубочных остатков по таким классификационным признакам, как «ширина граблей» и «густота распределения зубьев».

### **Библиографический список**

*Бартенев И.М., Драпалюк М.В., Казаков В.И.* Совершенствование технологий и средств механизации лесовосстановления: монография. М: ФЛИНТА-Наука, 2013. 208 с.

*Базаров С.М., Беленький Ю.И., Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф., Бальде Т.М.Д.* Системный анализ технологической эффективности производства сортиментов на базе ВСРМ // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. № 233. С. 177-188. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.233.177-188.

*Глинский В.В., Ионин В. Г.* Статистический анализ. М.: Инфра-М, 2002. 240 с.

*Михайлов К.Л., Гуцин В.А., Тараканов А.М.* Организация сбора и переработки лесосечных отходов и дров на лесосеке // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2016. № 6 (354). С. 98–109. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.6.98

Мясищев Д.Г. Потенциал малой механизации в лесохозяйственных технологических процессах // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2018. № 1 (361). С. 70–79. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.1.70

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

Силаев Г.В. Машины и механизмы в лесном и лесопарковом хозяйстве. В 2 ч. Ч. 2. М.: Изд-во Юрайт, 2020. 229 с.

Шегельман И.Р., Скрыпник В.И., Галактионов О.Н. Техническое оснащение современных лесозаготовок. СПб.: ПРОФИ-ИНФОРМ, 2005. 344 с.

Сюнёв В.С. Энергетическое использование древесной биомассы: заготовка, транспортировка, переработка и сжигание: учеб. пособие. Петрозаводск: Издательство ПетрГУ, 2014. 123 с.

Coleman G.R.Y., Stead A., Rigter M.P., Xu Z., Brooker G.M., Sukkarieh S., Walsh M.J. Using energy requirements to compare the suitability of alternative methods for broadcast and site-specific weed control // Weed Technology. Vol. 33. Iss. 4. 1 August 2019. P. 633–650. DOI: 10.1017/wet.2019.32

Ersson B.T., Platonov A., Zimarin S.V. Analysis of the information content of tenders for the removal of unwanted vegetation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Forestry Forum «Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions». 2020. С. 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/595/1/012022.

Karpachev S.P., Zaprudnov V.I., Bykovskiy M.A., Karpacheva I.P. Simulation studies on line intersect sampling of residues left after cut-to-length logging // Croatian Journal of Forest Engineering. 2020. Vol. 41. no 1. pp. 95-107. DOI: 10.5552/crojfe.2020.531

Yoshida T. Concepts Constituting Performance-Based Contracting for Road Maintenance and Multiple Effects of it // Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. F4 (Construction and Management). 2012. Vol. 69, no 3. P. 176–189. DOI: 10.2208/jscejcm.69.176

## References

Bartenev I.M., Drapalyuk M.V., Kazakov V.I. Improvement of technologies and means of reforestation mechanization: monograph. M.: FLINTA-Nauka, 2013. 208 p. (In Russ.)

Bazarov S.M., Belenkiy Yu.I., Svoykin F.V., Svoykin V.F., Balde T.M.D. Systematic analysis of the technological efficiency of assortment production based on VSRM. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2020, no. 233, pp. 177–188. DOI: 10.21266 / 2079-4304.2020.233.177-188. (In Russ.)

Coleman G.R.Y., Stead A., Rigter M.P., Xu Z., Brooker G.M., Sukkarieh S., Walsh M.J. Using energy requirements to compare the suitability of alternative methods for broadcast and site-specific weed control. *Weed Technology*, 2019, vol. 33, iss. 4, 1 August 2019, pp. 633–650. DOI: 10.1017/wet.2019.32

Ersson B.T., Platonov A., Zimarin S.V. Analysis of the information content of tenders for the removal of unwanted vegetation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. *International Forestry Forum «Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions»*, 2020, p. 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/595/1/012022.

Glinsky V.V., Ionin V.G. Statistical analysis. M.: Infra-M, 2002. 240 p. (In Russ.)

Karpachev S.P., Zaprudnov V.I., Bykovskiy M.A., Karpacheva I.P. Simulation studies on line intersect sampling of residues left after cut-to-length logging. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2020, vol. 41, no 1, pp. 95–107. DOI: 10.5552/crojfe.2020.531

Mikhailov K.L., Gushchin V.A., Tarakanov A.M. Organization of collection and processing of felling waste and firewood at the cutting area. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*, 2016, no. 6 (354), pp. 98–109. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.6.98 (In Russ.)

Myasishchev D.G. Potential of small mechanization in forestry technological processes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*, 2018, no. 1 (361), pp. 70–79. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.1.70 (In Russ.)

Technology and machines of logging operations: textbook / V.I. Patyakin [and others]; edited by V.I. Patyakin. SPb.: SPbGLTU, 2012. 362 p. (In Russ.)

Silaev G.V. Machines and mechanisms in forestry and forestry: in 2 hours. Part 2. M.: Yurayt Publishing House, 2020. 229 p. (In Russ.)

Shegelman I.R., Skrypnik V.I., Galaktionov O.N. Technical equipment for modern logging. SPb.: PROFI-INFORM, 2005. 344 p. (In Russ.)

Syunev V.S. Energy use of woody biomass: harvesting, transportation, processing and combustion: textbook. allowance. Petrozavodsk: PetrSU Publishing House, 2014. 123 p. (In Russ.)

Yoshida T. Concepts Constituting Performance-Based Contracting for Road Maintenance and Multiple Effects of it. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. F4 (Construction and Management)*, 2012, vol. 69, no 3, pp. 176–189. DOI: 10.2208/jscejcm.69.176

Материал поступил в редакцию 02.09.2021

---

**Платонов А.А.** Математическое моделирование и классификация технических средств для сбора порубочных остатков // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 240. С. 149–162. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.240.149-162

Технологический процесс удаления нежелательной древесно-кустарниковой растительности с территорий ряда инфраструктурных объектов нередко предусматривает технологическую операцию сгребания и/или сбора порубочных

остатков механизированным способом с помощью таких средств механизации, как лесные грабли. Ввиду многообразия указанных технических средств (различающихся по назначению, области применения, способам агрегатирования с базовым транспортным средством, а также конструктивным особенностям) их классификация по некоторым классификационным признакам (в частности – ширине захвата и густоте) затруднена ввиду значительного влияния субъективной составляющей, оказывающей воздействие на непосредственное отнесение классифицируемых лесных граблей к тому или иному элементу соответствующего классификационного ряда. На основе анализа основных конструктивных параметров более 500 моделей лесных граблей отечественного и зарубежного производства установлена система уравнений, описывающих положение границ характерных зон распределения ширины захвата лесных граблей от количества их зубьев. Для оценки ширины захвата лесных граблей в качестве классификационного признака предложено использовать критерий удельной ширины граблей, определяемый как функция соотношения ширины захвата граблей и ширины одного зуба. Для оценки густоты распределения зубьев лесных граблей по ширине их захвата в качестве классификационного признака предложено использовать критерий густоты зубьев, учитывающий соотношение интервала между двумя соседними зубьями и ширины лесных граблей, предложены граничные значения данного критерия. Показаны результаты математического моделирования критической (минимальной) ширины лесных граблей в зависимости от их количества зубьев и ширины одного зуба, характеризующие момент перехода лесных граблей в категорию «лесные щётки». Рассмотренная в работе математическая модель позволяет с достаточной степенью точности выполнить классификацию лесных граблей в части разделения существующих и/или перспективных технических средств для сбора и сгребания порубочных остатков по таким классификационным признакам, как «ширина граблей» и «густота распределения зубьев».

**Ключевые слова:** порубочные остатки, лесные грабли, классификация, моделирование, система уравнений, критерий.

**Platonov A.A.** Mathematical modeling and classification of technical means for collection of cutting residues. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2022, iss. 240, pp. 149–162 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.240.149-162

The technological process of removing unwanted tree and shrub vegetation from the territories of a number of infrastructure facilities often provides for a technological operation of raking and / or collecting chopped residues in a mechanized way using such mechanization tools as forest rakes. Due to the variety of these technical means (differing in purpose, scope, methods of aggregation with the base vehicle, as well as design features), their classification according to some classification criteria (in

particular, working width and density) is difficult due to the significant influence of the subjective component, which affects direct assignment of classified forest rakes to one or another element of the corresponding classification series. Based on the analysis of the main design parameters of more than 500 models of forest rakes of domestic and foreign production, the author has established a system of equations describing the position of the boundaries of the characteristic zones of the distribution of the width of the forest rake from the number of their teeth. To assess the width of the forest rake as a classification features, it is proposed to use the criterion of the specific width of the rake, defined as a function of the ratio of the width of the rake to the width of one tooth. To assess the density of the distribution of forest rake teeth along the width of their capture, it is proposed to use the criterion of the teeth density as a classification features, taking into account the ratio of the interval between two adjacent teeth and the width of the forest rake, the boundary values of this criterion are proposed. The results of mathematical modeling of the critical (minimum) width of a forest rake, depending on their number of teeth and the width of one tooth, characterizing the moment of transition of a forest rake into the category of «forest brushes» are shown. The mathematical model considered in the work allows with a sufficient degree of accuracy to classify forest rakes in terms of separating existing and / or promising technical means for collecting and raking chopped residues according to such classification features as «rake width» and «teeth distribution density».

**Key words:** chopped residues, forest rake, classification, modeling, system of equations, criterion.

---

**ПЛАТОНОВ Алексей Александрович** – доцент Ростовского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук, доцент. ResearcherID: AAA-2931-2020, ORCID 0000-0003-4114-4636

344038, пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, д. 2, г. Ростов-на-Дону, Россия. E-mail: paa7@rambler.ru

**PLATONOV Alexey A.** – PhD (Technical), associate professor of Rostov State Transport University, ResearcherID: AAA-2931-2020, ORCID 0000-0003-4114-4636

344038, Rostov Rifle Regiment of the People's Militia, 2, Rostov-on-Don, Russia. E-mail: paa7@rambler.ru