

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ЛЕСНОГО ДЕЛА

УДК 630*232.211

С. В. Фокин

К ОБОСНОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПОРУБОЧНЫХ ОСТАТКОВ

Приводятся теоретическое обоснование основных конструктивно-технологических параметров устройства для измельчения порубочных остатков и результаты лабораторных исследований его работы.

Ключевые слова: порубочные остатки, устройство для измельчения порубочных остатков, нераскорчеванные вырубki, щепa.

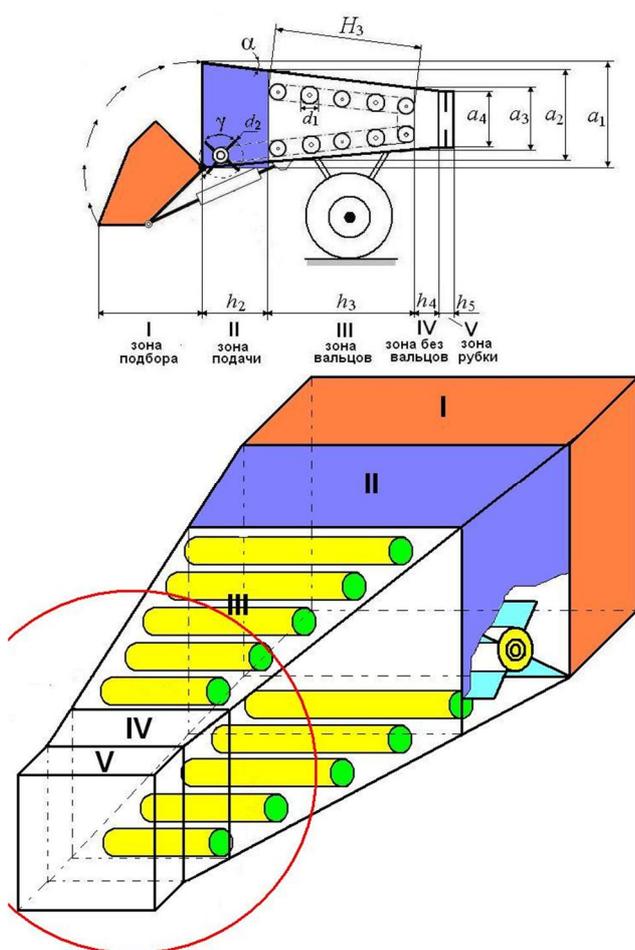
Введение. В Концепции развития лесного хозяйства Российской Федерации на 2003–2010 годы [1] и Лесном кодексе Российской Федерации ставится задача качественного воспроизводства лесов. В России естественным путем восстанавливается около 1/3 ежегодно вырубаемых лесов, остальные требуют специальных мер по их возобновлению. На 50 % площади достаточно только содействия естественному возобновлению, а на остальной нужны посев и посадка деревьев. Причем данные работы должны проводиться с учетом требований экологии и пожарной безопасности выполняемых работ, которые отмечены в приказах Федерального агентства лесного хозяйства РФ № 377 от 17 мая 2011 г. и № 376 от 17 мая 2011 г. В настоящее время при проведении лесосечных работ порубочные остатки после сбора в валы или кучи остаются на вырубке в качестве органического удобрения и в первые годы после рубок представляют собой пожароопасный горючий материал [2], часто мешающий выполнению отдельных технологических операций производства лесовосстановительных работ [3], поэтому ставится **задача** совершенствования технологии расчистки нераскорчеванных вырубok в степной и лесостепной климатических зонах Поволжья, путем переработки горючих материалов на щепу, тем самым снижая вероятность возникновения пожара на вырубках.

Целью работы является разработка технологической операции и средств механизации для измельчения порубочных остатков.

Математическую модель рассматриваемого устройства для измельчения порубочных остатков [4] можно разбить на пять звеньев-зон в зависимости от технологического назначения (рис. 1).

Зона I представляет собой подборщик порубочных остатков с последующей подачей его к измельчающему диску **зона V**. Транспортировка порубочных остатков в **зону V** осуществляется с помощью цепочки, состоящей из **зоны подачи II** с подающим звеном и **зоны III**, снабженной двумя рядами подающих вальцов с зубцами. Зоне рубки предшествует **зона IV** без вальцов, где осуществляется дополнительное уплотнение порубочных остатков.

Ведущим звеном устройства для измельчения порубочных остатков является измельчающее устройство, параметры которого определяют режим функционирования устройств транспортировки сырья в рубильную машину. К таким параметрам относятся: угловая скорость диска с ножами – ω_3 ; число ножей – S ; радиус барабана с ножами – R_5 ; толщина срезаемого слоя древесины – h_5 ; размеры окна, в которое сырье поступает в рубильную машину – a_4 .



Обозначение	Наименование	Величина
h_5	Толщина срезаемого слоя в рубильной машине	0,005...0,03 м
a_4	Размер окна, в которое сырье поступает в рубильную машину	0,2...0,7 м
R_5	Радиус барабана с ножами	0,48...0,76 м
S	Число ножей в рубильной машине	2...7
ω_3	Угловая скорость барабана с ножами рубильной машины	42,4...104,6 1/с
α	Угол конусности цепочки подачи сырья	0...30°
a_3	Размер границы зоны IV: $a_3 = a_4 + 2h_4 \operatorname{tg}\alpha$	м
a_2	Размер границы зоны III: $a_2 = a_3 + 2h_3 \operatorname{tg}\alpha$	м
a_1	Размер границы зоны II: $a_1 = a_2 + 2h_2 \operatorname{tg}\alpha$	м
d_2	Диаметр подающего звена	0,4...0,7 м
h_2	Длина зоны II: $h_2 = d_2 + 30 \text{ см}$	м
h_3	Длина зоны III: $h_3 = 3h_2$	м
h_4	Длина зоны IV: $h_4 = 0,5h_2$	м
d_1	Диаметр вальцов в зоне III	0,08...0,15 м
P_1	Зазор между вальцами в зоне III	$\leq 0,15$ м
ρ_D	Плотность пород древесины	450...770 кг/м ³

Рис. 1. Схема построения математической модели устройства для измельчения порубочных остатков и его параметры

От этих параметров (рис. 1), а также от геометрических параметров цепочки подачи сырья в рубильную машину зависят угловая скорость звена подачи в зоне II: ω_2 и угловая скорость вальцов в зоне III: ω_3 .

Таким образом, ставится задача определить зависимости угловых скоростей ω_2 и ω_3 не только как функции параметров рубильной машины (параметры 1...5), но и как функции варьируемых параметров цепочки подачи порубочных остатков (параметры 6...16). При решении данной задачи можно выделить следующие этапы расчета.

Этап I – вычисление числа вальцов в зоне III и их объема

Вычисление длины зоны h_2 и зоны h_3 :

$$h_2 = d_2 + 30 \text{ см}; \quad h_3 = 3h_2. \quad (1)$$

Вычисление длины поверхностей зоны III, на которых расположены вальцы:

$$H_3 = \frac{h_3}{\cos \alpha}, \quad (2)$$

где H_3 – длина поверхности с вальцами; α – угол конусности цепочки подачи.

Вычисление числа вальцов N_2 :

$$N_2 = \frac{H_3 - P_1}{(d_1 + P_1)}, \quad (3)$$

где d_1 – диаметр вальцов в зоне III; P_1 – зазор между вальцами (d_1 и P_1 нужно изменять так, чтобы число N_2 было целым).

Вычисление средней длины вальца L_{cp} :

$$L_{cp} = \frac{a_2 + a_3}{2}, \quad (4)$$

где a_2, a_3 – размеры границ зоны III.

Вычисление объема, занимаемого вальцами для двух рядов:

$$V_6 = \pi \frac{d_1^2}{2} N_2 L_{cp}. \quad (5)$$

Этап II – вычисление объемов зон в цепочке подачи, в зоне рубки и в зоне подбора порубочных остатков (объем ковша подборки)

Вычисление объема в зоне подачи порубочных остатков (II) V_2 :

$$V = \frac{1}{3} h_2 (a_1^2 + a_2^2 + a_1 a_2), \quad (6)$$

где h_2 – длина зоны II; $a_1 a_2$ – размеры границ зоны II (объем усеченной пирамиды V вычисляется как: $V = \frac{1}{3} h (S_1^2 + S_2^2 + \sqrt{S_1^2 S_2^2})$, где S_1, S_2 – площадь оснований, h – высота пирамиды).

Вычисление объема зоны с вальцами (III):

$$V_3 = \frac{1}{3} h_3 (a_2^2 + a_3^2 + a_1 a_2) - \pi \frac{d_1^2}{2} N_2 L_{cp}, \quad (7)$$

где h_3 – длина зоны III; a_2, a_3 – размер границ зоны III.

Вычисление объема зоны без вальцов (IV):

$$V_4 = \frac{1}{3} h_4 (a_3 + a_4 + a_3 a_4), \quad (8)$$

где h_4 – длина зоны IV; a_3, a_4 – размеры границ зоны IV.

Вычисление объема зоны рубки порубочных остатков (V):

$$V_5 = h_5 a_4^2, \quad (9)$$

где: h_5 – толщина срезаемого слоя в рубительной машине; a_4 – величина границы в зоне рубки.

Вычисление объема подбора порубочных остатков (зона I):

$$V_{II} < k_n V_2, \quad (10)$$

где: $k_{II} < 1$ – коэффициент заполнения ковша (объем зоны II должен быть больше, чем объем ковша; $k_{II} \approx 0,8...0,95$).

Этап III – вычисление плотности порубочных остатков и их уплотнения в зонах цепочки механизма подачи

Вычисление плотности порубочных остатков в зоне (I) подбора:

$$\rho_{II} = \rho_D \cdot k_c, \quad (11)$$

где ρ_{II} – плотность порубочных остатков в зоне подбора; ρ_D – плотность пород древесины порубочных остатков; k_c – коэффициент плотности порубочных остатков; $k_c \approx 0,5...0,75$.

Вычисление плотности подаваемых порубочных остатков в зоне подачи (зона II).

При условии близкого к равенству объемов зоны подбора (ковша) и зоны подачи (II) полагаем:

$$\rho_2 = \rho_{II}, \quad (12)$$

где ρ_2 – плотность подаваемых порубочных остатков в зоне (III) с вальцами.

Полагаем, что в среднем плотность подаваемых порубочных остатков в зоне III пропорциональна отношению объема зоны II – V_2 к объему зоны III – V_3 ($V_2 > V_3$), а именно:

$$\rho_3 = \rho_2 \frac{V_2}{V_3}, \quad (13)$$

где ρ_3 – плотность подаваемых порубочных остатков в зоне III.

Плотность подаваемых порубочных остатков в зоне без вальцов (зона IV): так как в зоне IV отсутствуют движители подаваемых порубочных остатков, полагаем, что:

$$\rho_4 = \rho_3, \quad (14)$$

где ρ_4 – плотность подаваемых порубочных остатков в зоне (IV) без вальцов.

Плотность порубочных остатков в зоне рубки, ограниченной площадью окна подачи в рубительной машине ρ_5 , мало отличается от ρ_4 , поэтому

$$\rho_5 = \rho_4. \quad (15)$$

Этап IV – вычисление количества движения $Q_i = m_i U_i$, порубочных остатков в зонах цепочки подачи и в зоне рубки

В качестве механической меры расхода с течением времени сырья в каждой из зон МПТ может служить количество движения порубочных остатков в каждой из зон, т.е. произведение массы порубочных остатков в зоне на ее среднюю скорость.

Масса порубочных остатков в зоне $m_i = V_i \rho_i$.

Вычисление количества движения порубочных остатков в зоне подачи (зона II):

$$Q_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} \cdot \frac{a_1 + a_2}{2} \rho_2 \frac{d_2}{2} k_2 \omega_2, \quad (16)$$

где d_2 – диаметр подающего звена; a_1, a_2 – размеры границ зоны II; ρ_2 – плотность порубочных остатков в зоне II; k_2 – коэффициент потерь в зоне II ($k_2 \approx 0,85...0,9$); ω_2 – угловая скорость подающего звена.

Вычисление количества движения порубочных остатков в зоне (III) с вальцами:

$$Q_3 = \rho_3 V_3 \frac{d_1}{2} k_3 \omega_3, \quad (17)$$

где ρ_3 – плотность порубочных остатков в зоне III; V_3 – объем зоны III; d_1 – диаметр вальцов; k_3 – коэффициент потерь в зоне III ($k_3 \approx 0,85...0,9$); ω_3 – угловая скорость вальцов.

Вычисление количества движения порубочных остатков в зоне без вальцов (IV).

В зоне IV отсутствует свой движитель массы порубочных остатков

$$Q_4 = \rho_4 V_4 U_4 k_4, \quad (18)$$

где $U_4 = \omega_3 \frac{d_1}{2}$ – средняя скорость движения порубочных остатков в зоне IV; ρ_4 – плотность порубочных остатков в зоне IV; V_4 – объем зоны IV; k_4 – коэффициент потерь массы порубочных остатков в зоне IV ($k_4 \approx 0,9...1,0$).

Тогда:

$$Q_4 = \rho_4 V_4 \frac{d_1}{2} k_4 \omega_3. \quad (19)$$

Обозначим $Q^* = Q_3 + Q_4$ суммарное количество движения исходного материала в зонах III и IV.

$$Q^* = (\rho_3 V_3 k_3 + \rho_4 V_4 k_4) \frac{d_1}{2} \omega_3. \quad (20)$$

Вычисление количества движения порубочных остатков в зоне рубки (зона IV):

$$Q_5 = \rho_5 h_5 a_4^2 S R_5^{cp} k_5 \omega_5, \quad (21)$$

где ρ_5 – плотность порубочных остатков в зоне V; h_5 – толщина срезаемого слоя; a_4 – размер подающего окна в зоне V; S – число ножей; $R_5^{cp} = (R_5 - \frac{a_4}{2})$ – средний радиус ножей; k_5 – коэффициент потерь массы порубочных остатков в зоне V ($k_5 \approx 0,9...1,0$); ω_5 – угловая скорость диска с ножами.

Этап V – вычисление угловой скорости ω_3 вальцов и угловой скорости ω_2 подающего звена

Из условия непрерывности процесса получения щепы в рубительной машине следует:

$$Q^* = Q_5 \text{ и } Q_2 = Q^* \quad (22)$$

Тогда из соотношений (15–20) имеем:

$$\omega_3 = \frac{2(\rho_5 h_5 a_4^2 R_5^{cp} k_5 S)}{(\rho_3 V_3 k_3 + \rho_4 V_4 k_4) d_1} \omega_5, \quad (23)$$

где $R_5^{cp} = R_5 - \frac{a_4}{2}$.

$$\omega_2 = \frac{(\rho_3 V_3 k_3 + \rho_4 V_4 k_4) \frac{d_1}{2}}{\frac{\pi d_2^2}{2} \cdot \frac{a_1 + a_2}{2} \rho_2 \frac{d_2}{2} k_2} \omega_3. \quad (24)$$

Научной новизной данной разработки является получение математических моделей, позволяющих производить расчет основных конструктивно-технологических параметров устройства для измельчения порубочных остатков. Данные модели реализованы в компьютерной программе [5].

Обоснование основных конструктивно-технологических параметров выполнено с использованием методики планирования эксперимента, реализованной в программе «Statgraf». За поверхность отклика принималась масса измельченного сырья, подаваемая в загрузочный патрон за один рабочий ход подъемного устройства.

За переменные факторы принимались следующие показатели: угол конусности загрузочного патрона, диаметр подающих вальцов, диаметр подающего звена, размер окна в зоне рубки, расстояние (зазор) между вальцами.

Анализ полученных результатов теоретических исследований показал, что при максимальной производительности рубительной машины, равной 100 кг/мин, исследуемые конструктивно-технологические параметры имеют следующие значения:

d_1 (диаметр вальцов с шипами, м) = 0,1...0,18;

d_2 (диаметр подающего звена, м) = 0,5...0,8;

a_4 (размер окна в зоне рубки, м) = 0,6...0,7;

P_1 (зазор между вальцами, м) = 0,06...0,18;

α (угол конусности измельчителя, град.) = 15...40.

Для получения окончательных конструктивно-технологических параметров устройства для измельчения порубочных остатков при помощи компьютерной программы целесообразно взять среднее значение рассчитанных величин.

Проверка полученных результатов проводилась в процессе лабораторных исследований технологических параметров устройства для измельчения порубочных остатков, влияющих на ее производительность. Изучение технологических параметров осуществлялось при помощи лабораторной тензометрической станции ZET 017-T8, которая была смонтирована на базе макетного образца устройства для измельчения порубочных остатков. Подключение тензостанции к ПЭВМ осуществляется по шине USB 2.0. Питание лабораторной установки производится от внешней аккумуляторной батареи напряжением 12 В (рис. 2).



Рис. 2. Общий вид лабораторной установки для изучения технологических параметров устройства для измельчения порубочных остатков

Теоретическими исследованиями установлено, что угловая скорость вращения узлов (устройства пальчикового типа, подающих вальцов), входящих в состав механизма привода, оказывает наибольшее влияние на производительность машины для измельчения порубочных остатков, поэтому методикой эксперимента предусматривалось изучение закономерности влияния скорости вращения узлов механизма подачи на производительность и фракционный состав получаемой щепы. Измерение частоты вращения производится при помощи бесконтактного оптического датчика оборотов ВС 401, производимого ЗАО «Электронные технологии и метрологические системы» (рис. 3). Обработка результатов исследований производилась на персональном компьютере при помощи программного обеспечения «Тахометр», входящего в состав тензометрической станции ZET 017-T8, и Statistica 6,0 [6].

Теоретические исследования показали, что они находятся в следующих пределах: угловая скорость в зоне подачи, 1/мин- ω_2 (110...200); угловая скорость в зоне вальцов, 1/мин- ω_3 (40...160). При проведении лабораторных испытаний изменение технологических

параметров устройства для измельчения порубочных остатков проводилось в соответствии с конструктивными возможностями клиноременного вариатора с диапазоном регулирования скоростей 4 и технологических условий измельчения порубочных остатков.



Рис. 3. Вид закрепленного бесконтактного оптического датчика для измерения числа оборотов

Исходя из этого, принимались следующие диапазоны скоростей: угловая скорость в зоне подачи, 1/мин- ω_2 (50...125); угловая скорость в зоне вальцов, 1/мин- ω_3 (20...100).

В целях определения влияния технологических параметров устройства для измельчения порубочных остатков на его производительность проводились лабораторные исследования по методике многофакторного планирования эксперимента. Для этого реализовывался полный факторный эксперимент 2^3 , который проводился в соответствии со сводкой и планом многофакторного эксперимента [7].

В результате реализации плана многофакторного эксперимента изучения влияния технологических параметров на массу измельченных порубочных остатков получена следующая зависимость:

$$M = 0,083 + 0,639 \text{ LOG } W_2 + 0,292 \text{ LOG } W_3, \quad (25)$$

$(30,0 < W_2, 1/\text{мин} < 160,0; 30,0 < W_3, 1/\text{мин} < 130,0)$

Оценка коэффициентов уравнений показала, что коэффициенты факторов, влияющих на производительность устройства для измельчения порубочных остатков, тесно связаны между собой (коэффициент корреляции $R > 0,94$). Данными уравнениями описывается свыше 89 % значений (коэффициент детерминации $R^2 > 0,89$). Анализ коэффициентов уравнения по t-критерию показывает значимость на 5 % факторов угловой скорости в зоне подачи (ω_2) и угловой скорости в зоне вальцов (ω_3).

Проанализировав зависимость факторов, влияющих на производительность устройства для измельчения порубочных остатков, можно сделать вывод, что с увеличением угловой скорости в зоне подачи с 50 до 87,5 1/мин и уменьшением угловой скорости в зоне вальцов с 20 до 3,5 1/мин соотношение данных скоростей изменяется с 25,0 (87,5/3,5) до 2,5 (50/20) (1,87 раза), что приводит к увеличению массы произведенной щепы с 25,1 до 32,4 кг (1,3 раза).

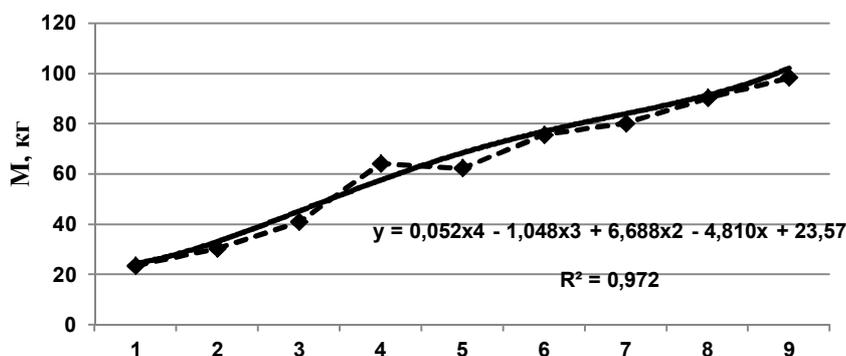
При уменьшении угловой скорости в зоне подачи до 34,6 1/мин и увеличении угловой скорости в зоне вальцов до 116,6 1/мин соотношение данных скоростей изменяется с 0,75 (87,5/116,6) до 0,5 (50/100). При этом масса полученной щепы возрастает с 40,2 до 68,2 кг (1,69 раза).

При соотношениях угловых скоростей в зоне подачи и в зоне вальцов, находящихся в пределах, определенных в результате теоретических исследований (125/100 и 140,5/60), масса произведенной щепы имеет максимальное значение 101,5 кг. При этом соотношение скоростей изменилось с 1,25 до 2,4 (1,9 раза).

Из рис. 4 видно, что экспериментальная кривая (пунктир) практически не отличается от теоретической, так как проходит в границах 5 % доверительного интервала теоретической линии [8]. Этот факт свидетельствует о хорошей сходимости результатов, полученных в результате теоретических и экспериментальных исследований факторов, влияющих на производительность устройства для измельчения порубочных остатков.

Характерными чертами представляемой конструкции устройства для измельчения порубочных остатков является простота использования, технического обслуживания и ремон-

та, так как она состоит из незначительного количества унифицированных узлов и деталей. Подготовку устройства к работе (присоединение устройства к тяговому агрегату) и измельчение порубочных остатков осуществляют два человека, что значительно снижает трудозатраты производства работ. Безопасность производства работ обеспечена технологической схемой устройства путем применения механизма подъема порубочных остатков в загрузочный патрон.



№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9
соотношение W2/W3, 1/мин.	87,5/3,5	50/20	34,5/60	87,5/116,5	50/100	87,5/60	125/20	140,5/60	125/100

Рис.4. Сравнение результатов исследования зависимости массы измельченных порубочных остатков M (кг) от угловой скорости подающего устройства в зоне подачи (W_2 , 1/мин) и от угловой скорости вальцов (W_3 , 1/мин)

Выводы. На территории степной и лесостепной климатических зон отсутствует промышленная заготовка древесины. В этих областях основным видом рубок являются санитарные рубки и рубки ухода. Для этих видов рубок характерны: малая площадь производства работ, труднодоступность и рассредоточенность по территории хозяйства, поэтому применение лесохозяйственной техники для измельчения порубочных остатков, выпускаемых серийно отечественными и зарубежными производителями, нецелесообразно, особенно в условиях экономического кризиса. Так как приобретение зарубежных аналогов не выгодно с точки зрения стоимости (более 30 тыс. евро для зарубежных аналогов и более 400 тыс. руб. для отечественных) и при одинаковых диапазонах производительности (4...25 м³/час), при одинаковых условиях обеспечения экологичности и техники безопасности.

Рассматривая ближайшие конструктивные аналоги ИДО-150 (Россия), можно отметить, что серийный вариант машины на рассматриваемой территории вследствие особенности ведения лесовосстановительных работ малопригоден, так как шасси рубительной машины имеет малый дорожный просвет, что не позволяет двигаться по нераскорчеванным вырубкам, а размеры загрузочного патрона недостаточны для загрузки порубочных остатков.

Предлагаемая конструкция устройства для измельчения порубочных остатков наполнителем позволяет избежать данных недостатков. Для повышения его проходимости предусмотрено шасси, имеющее большой дорожный просвет и оснащенное пневматическими колесами большого диаметра (0,7 м). Ввиду специфичности перерабатываемого материала размер загрузочного патрона устройства адаптирован к размерам порубочных остатков и составляет 600×1200×1800 мм.

Полученные результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что разработанная конструкция устройства для измельчения порубочных остатков работоспособна и необходимо проводить мероприятия по его внедрению в производство.

Список литературы

1. Концепция развития лесного хозяйства Российской Федерации на 2003–2010 годы. Одобрена распоряжением Правительства Российской Федерации от 18 января 2003 г. № 69-р. – 22 с.
2. Залесов, С.В. Лесная пирология: учеб. пособие / С.В. Залесов. – Екатеринбург: Изд-во Уральской лесотехнической академии, 1998. – 296 с.
3. Производство культуртехнических работ : учеб. пособие / Н. А. Будников [и др.] ; ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2002. – 52 с.
4. Устройство для измельчения порубочных остатков: Пат. 2354545 Рос. Федерация : А 01 G 23/06 / Цыплаков В. В., Шпортко О. Н., Фокин С.В. ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – № 2007147160 ; заявл. 18.12.2007 ; опубл. 10.05.2009, Бюл. № 13.
5. Расчет конструктивно-технологических параметров устройства для измельчения порубочных остатков: программа для ЭВМ / Цыплаков В. В., Фокин С. В. ; правообладатель ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Заявка № 2009613441. – Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2009614670; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 01.09.2009.
6. Боровиков, В. П. Программа СТАТИСТИКА для студентов и инженеров / В. П. Боровиков. – М. : Компьютер пресс, 2001. – 301 с.
7. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М. : Мир, 1980. – 610 с.
8. Демиденко, Е. З. Оптимизация и регрессия / Е. З. Демиденко. – М. : Наука, 1989. – 292 с.

Статья поступила в редакцию 11.11.11.

S. V. Fokin

**TO THE PROBLEM OF SUBSTANTIATION OF PARAMETERS AND MODES OF WORK
OF THE DEVICE FOR FOREST RESIDUES CHOPPING**

A theoretical substantiation of the basic structurally-technological parameters of the device for forest residues chopping and results of laboratory researches of its work are presented.

Key words: *felling residues, a device for forest residues chopping, non-grubbed out clearings, chips.*

ФОКИН Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и лесомелиорации Саратовского государственного аграрного университета им. Н. И. Вавилова. Область научных интересов: разработка средств механизации в лесном хозяйстве. Автор 106 научных и учебно-методических работ.
E-mail: feht@mail.ru