

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины

Научная статья

УДК 614.846.6

doi: <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i3pp118-124>

**О влиянии конструктивных и технологических параметров механизма
резания дисковой рубительной машины на выброс щепы**

Ольга Александровна Фомина¹, Сергей Владимирович Фокин², Анастасия Владимировна Касторнова¹

¹Государственный аграрный университет Северного Зауралья, г. Тюмень, Россия

²Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, г. Саратов, Россия

e-mail: os-stolbova@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований конструктивных и технологических параметров механизма резания и рабочего процесса удаления щепы из кожуха дисковой рубительной машины, с верхним расположением щепопровода с помощью лопастей и рубительного диска. Особенность процесса данного способа перемещения щепы основана на использовании кинетической энергии, вращающегося с определенной скоростью рубительного диска и расположенных на нем лопастей, от которых щепы, получая определенный запас энергии, стремится в воздушном потоке через верхний отвод в пункт ее сбора. Несмотря на всю технологичность данного способа, он имеет определенные несовершенства, одно из самых значимых – процесс удаления щепы порой не стабилен, ввиду оседания ее на дне кожуха и застревания в пазухах диска. Весьма стесненные условия в кожухе диска снижают скорость полета частиц щепы и, вероятно, изменяют их траекторию движения, оказывая тормозящее влияние на движение щепы что снижает эффективность работы узла данного механизма. Установлено, что конструктивные и технологические параметры кожуха, диска и лопастей рубительной машины оказывают значительное воздействие на удаление мелкой фракции щепы из кожуха рубительной машины, которая образуется в значительных количествах в результате измельчения в процессе движения от ударов о неподвижные и подвижные элементы машины, что снижает производительность работы всего механизма.

Ключевые слова: кожух; рубительный диск; лопасти; технологические параметры; конструктивные параметры; щепы; дисковая рубительная машина

Для цитирования: Фомина О. А., Фокин С. В., Касторнова А. В. О влиянии конструктивных параметров механизма резания дисковой рубительной машины на выброс щепы // Аграрный научный журнал. 2024. № 3. С. 118–124. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i3pp118-124>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

**On the influence of design and technological parameters of the cutting mechanism
of a disk chipper on the release of chips**

Olga A. Fomina¹, Sergey V. Fokin², Anastasiya V. Kastornova¹

¹State Agrarian University of Northern Trans-Urals, Tyumen, Russia

Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia

e-mail: os-stolbova@mail.ru

Abstract. The results of studies of the design and technological parameters of the cutting mechanism and the working process of removing chips from the casing of a disk chipper, with an upper location of the chip line using blades and a chipping disk, are presented. The peculiarity of the process of this method of moving chips is based on the use of kinetic energy, a chipping disk rotating at a certain speed, and blades located on it, from which the chips, receiving a certain amount of energy, tend in the air flow through the upper outlet to its collection point. Despite all the manufacturability of this method, it still has certain imperfections, one of the most significant is that the process of removing chips is sometimes not stable, due to its settling at the bottom of the casing and getting stuck in the sinuses of the disk. Very cramped conditions in the disc casing reduce the flight speed of the chips and, probably, change their trajectory, as a result, they have a decelerating effect on the movement of the chips, which reduces the efficiency of the unit of this mechanism. It has been established that the design and technological parameters of the casing, disc and blades of the chipper have a significant effect



on the removal of fine chips from the casing of the chipper, which is formed in significant quantities as a result of grinding during movement, from impacts on the fixed and moving elements of the machine, which reduces the performance of the entire mechanism.

Keywords: casing; chipping disk; blades; technological parameters; design parameters; wood chips; disk chipper

For citation: Fomina O. A., Fokin S. V., Kastornova A. V. On the influence of design and technological parameters of the cutting mechanism of a disk chipper on the release of chips // *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2024;(3):118–124. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i3pp118-124>.

Введение. Движение щепы в кожухе рубительного диска происходит в результате ее взаимодействия с пневматическими и механическими силами, создаваемыми окружающими движениями механизма резания, а именно рубительного диска и закрепленными на его фронтальной части лопастями [10]. Из литературных источников известно, что на скорость перемещения щепы, траекторию ее движения влияет расположение конструктивных элементов механизма (размеры кожуха рубительного диска, подножевые щели, угол наклона лопаток, форма и длина трубопровода) [1, 4].

Авторами ставится задача исследования конструктивно-технологических параметров механизма выброса щепы, многие из которых ранее не изучены, и провести мониторинг их влияния на эффективность процесса движения щепы в кожухе рубительной машины. Были выбраны следующие конструктивные параметры узла механизма резания: $Z_{\text{л}}$ – число лопаток, $h_{\text{л}}$ – превышение лопатки над торцевой поверхностью диска, $b_{\text{л}}$ – ширина направляющей поверхности, $\alpha_{\text{л}}$ – численное значение угла наклона направляющей к поверхности кожуха, L_3 – расстояние между боковой поверхностью зоны кожуха и лопаткой, расположенной на поверхности измельчителя.

Результатом исследования являются предельные значения, при которых возможно изменения численных значений этих факторов. При этих предельных значениях скорость элемента стружки $v_{\text{в}}$ и вероятность выброса $p_{\text{п}}$ в начале движения диска имеют максимальные значения, поэтому составляющая мощности $N_{\text{в}}$ имеет минимальное значение и производительность P механизма увеличивается.

Показатели эффективности работы рубильной машины можно улучшить, грамотно скорректировав показатели рабочих параметров ее узла механизма резания. Из этого следует, что разработка корректирующих мер изменения контрольных параметров данного узла, позволит устранить несовершенства работы механизма, возникающие из-за недостаточного и приближенного характера исследований данных факторов.

Установлено, что изменение рабочих параметров механизма резания улучшает траекторию и скорость движения щепы тем самым, увеличивая эффективность всего устройства и, что не мало важно, фракционный состав, полученной щепы характеризуется более стабильными параметрами и целостностью.

Целью данной работы является подбор наилучших конструктивных параметров и наиболее благоприятных технологических значений узла механизма резания, позволяющих скорректировать технологический процесс выброса щепы, повысить эксплуатационные возможности всего устройства и рассмотреть корреляцию выбранных параметров с производительностью рубительной машины.

Материалы и методы. Объектом исследования является конструктивная схема кожуха, рубительного диска и лопастей. Для достоверного представления в модели сложных конфигураций различных частей механизма применяется МКЭ (метод конечных элементов) [5, 6].

Динамика движения конечного продукта в идее щепы может быть описана с помощью одного из видов метода динамики частиц, который способен воспроизвести сложные процессы, происходящие в потоке (рекомбинация кинетической энергии, природа турбулентного потока, смешение потоков с неравномерными параметрами движения) [7, 9].

Результаты исследований. Простейшие поверхности механизма выброса конечного продукта моделируются выражением, определяющим линейный размер $r_{\text{ип}j}$, который является расстоянием от центра элемента i до элементарной поверхности j .



Уравнения (1) являются дифференциальными выражениями второго порядка, вычисленные путем математического моделирования при помощи решения дифференциальных уравнений второго порядка [2, 3, 8]:

$$\begin{aligned}x_i^{\tau+1} &= x_i^{\tau} + v_{xi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{xi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2; v_{xi}^{\tau+1} = v_{xi}^{\tau} + a_{xi}^{\tau} \cdot \Delta t; \\y_i^{\tau+1} &= y_i^{\tau} + v_{yi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{yi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2; v_{yi}^{\tau+1} = v_{yi}^{\tau} + a_{yi}^{\tau} \cdot \Delta t; \\z_i^{\tau+1} &= z_i^{\tau} + v_{zi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{zi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2; v_{zi}^{\tau+1} = v_{zi}^{\tau} + a_{zi}^{\tau} \cdot \Delta t,\end{aligned}\quad (1)$$

где i – порядковый номер элементарной частицы измельченного продукта, τ и $\tau+1$ – показатели t промежутка; Δt – временная граница взаимодействия; (x_i, y_i, z_i) , (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}) и (a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}) – координаты элементарной частицы измельченного продукта.

При воссоздании геометрических параметров конструктивных частей механизма эвакуации измельченного сырья, в модели использовалась угловая индексация, которое реализовывалось, в частности, для измельчителя с помощью 16 треугольных призм (рисунок 1). Его центр вращения определялся т. C , имеющей координаты x_c, y_c, z_c , а местоположение на оси диска точек 1 и 2 выражалось следующим образом:

$$\begin{aligned}x_1 &= x_c; y_1 = y_c - B_d / 2; z_1 = z_c; \\x_2 &= x_c; y_2 = y_c + B_d / 2; z_2 = z_c,\end{aligned}\quad (2)$$

где B_d – ширина диска.

16 прямоугольных фигур составляют торцевую часть измельчителя, а фигурирующие точки имеют следующую закономерность распределения:

$$\begin{aligned}x_{2+i} &= x_c + R_d \cos(2\pi i / 16); \\y_1 &= y_c - B_d / 2; \\z_1 &= z_c + R_d \cos(2\pi i / 16); \\x_{2+16+i} &= x_c + R_d \cos(2\pi i / 16); \\y_1 &= y_c + B_d / 2; \\z_1 &= z_c + R_d \cos(2\pi i / 16),\end{aligned}\quad (3)$$

где i – индикация точки прямоугольника; R_d – радиус измельчителя.

32 элементарных треугольника $(P_{2+i} P_{2+i+1} P_{18+i} \dots P_{2+i+1} P_{18+i} P_{18+i+1})$ составляют внешнюю поверхность диска, а 16 треугольников составляют его фронтальную поверхность со следующей индикацией точек: $P_1 P_{2+i} P_{2+i+1}$ и $P_2 P_{18+i} P_{18+i+1}$.

Чтобы воспроизвести в модели лопасти измельчителя задаются координатами одной лопасти, которые переносятся на заданное число лопастей симметричных оси рубильного диска. Лопатка включает в себя шесть треугольников (рисунок 2).

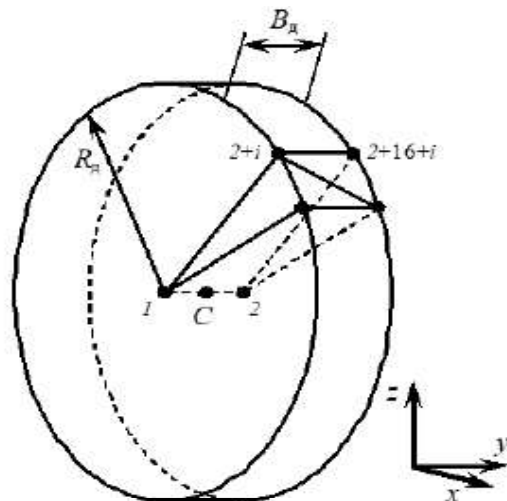


Рисунок 1 – Вид измельчителя в модельном отображении
Figure 1 – View of the chopper in the model display

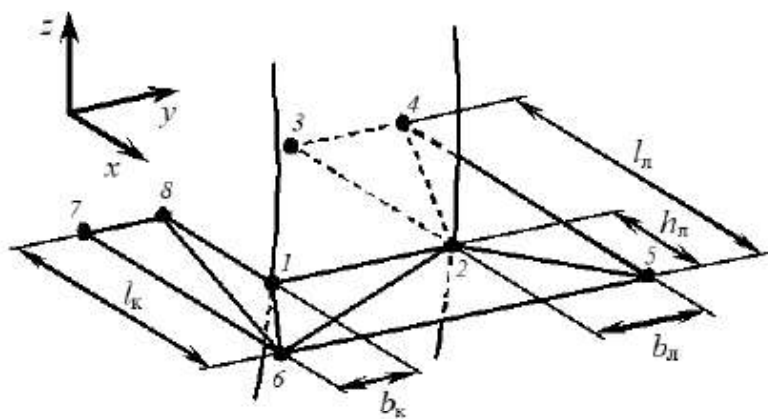


Рисунок 2 – Модельное отображение лопатки измельчителя
Figure 2 – Model display of the chopper blade



Первая лопатка располагается в плоскости $z = z_C$:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= x_C + R_d; & y_1 &= y_C - B_d / 2; & z_1 &= z_C; \\
 x_2 &= x_C + R_d; & y_2 &= y_C + B_d / 2; & z_2 &= z_C; \\
 x_3 &= x_C + R_d - l_n; & y_3 &= y_C + B_d / 2; & z_3 &= z_C; \\
 x_4 &= x_C + R_d - l_n; & y_4 &= y_C + B_d / 2 + b_n; & z_4 &= z_C; \\
 x_5 &= x_C + R_d + h_n; & y_5 &= y_C + B_d / 2 + b_n; & z_5 &= z_C; \\
 x_6 &= x_C + R_d + h_n; & y_6 &= y_C - B_d / 2 - b_k; & z_6 &= z_C; \\
 x_7 &= x_C + R_d - l_k; & y_7 &= y_C - B_d / 2 - b_k; & z_7 &= z_C; \\
 x_8 &= x_C + R_d - l_k; & y_8 &= y_C - B_d / 2; & z_8 &= z_C,
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

где l_n, b_n, h_n, b_k, l_k – геометрические значения компонентов лопасти, показанные на рисунке 2. Нумерация начинается с 1 для каждого элемента с дальнейшим сквозным обозначением точек. Поверхность лопасти включает в себя 6 треугольных фигур с обозначением точек следующего вида: $P_1P_2P_6, P_2P_5P_6, P_2P_3P_4, P_2P_4P_5, P_1P_6P_8, P_6P_7P_8$.

Координаты остальных лопастей формируются до значения N_d путем переноса созданных на основе базовых точек треугольников и преобразования их координат при движении диска относительно оси вращения (x_C, z_C) :

$$\begin{aligned}
 x_{i+8k} &= x_C + (x_i - x_C) \cos(2\pi \cdot k / N_d) - (z_i - z_C) \sin(2\pi k / N_d); \\
 y_{i+8k} &= y_i; \\
 z_{i+8k} &= z_C + (x_i - x_C) \sin(2\pi \cdot k / N_d) + (z_i - z_C) \cos(2\pi k / N_d),
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

где k – номер лопатки ($k = 0 \dots N_d - 1$).

Формирование поверхность кожуха производится аналогично поверхности диска, с единственным отличием в том, что проводится изменение формы верхней правой четверти цилиндра (рисунок 3), являющейся переходной. В соответствии с моделью поверхность кожуха состоит из 26 точек, расположенных противоположно друг к другу с равномерным угловым шагом по окружности. Точки 16, 17, 31 и 32 являются переходными.

Результатом проектирования поверхности кожуха стало ее разбиение на 58 треугольников (30 треугольников расположенных противоположно друг другу на фронтальной поверхности кожуха, 28 треугольников на его торцевых поверхностях):

- $P_1P_iP_{i+1}, i = 3 \dots 16;$
- $P_1P_3P_{17};$
- $P_2P_iP_{i+1}, i = 18 \dots 31;$
- $P_2P_{18}P_{32};$
- $P_iP_{i+1}P_{i+15+1}, P_iP_{i+15}P_{i+15+1}, i = 3 \dots 15;$
- $P_3P_{17}P_{18}, P_{17}P_{18}P_{32}.$

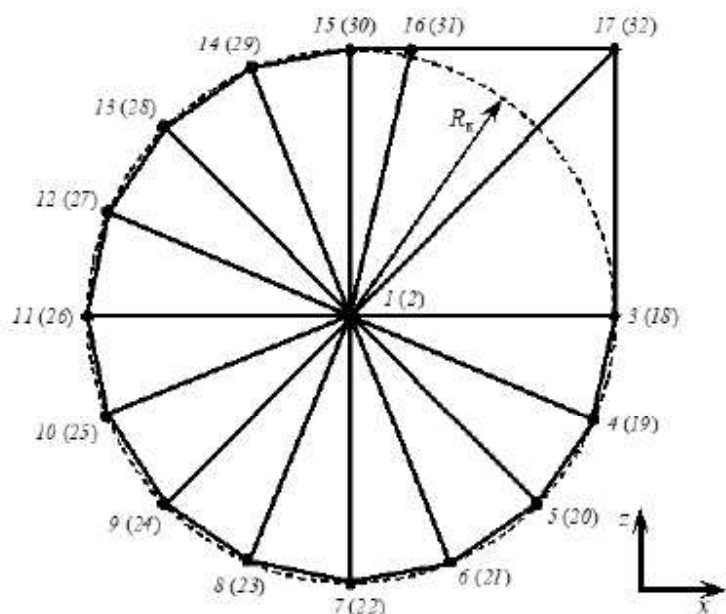


Рисунок 3 – Модель кожуха измельчителя
Figure 3 – Model of the chopper casing

Количественный состав лопастей Z_d на измельчителе определяет объем конечного продукта, захватываемого одной лопастью и перемещаемого в щепопровод. При проведении компьютерного исследования рабочего процесса выброса щепы параметр Z_d изменялся от 2 до 6 штук с шагом



варьирования, равным 1. Построенные графическим путем зависимости указывают на то, что большее количество лопастей снижает скорость выброса конечного продукта (рисунок 4, а).

Данный факт связан с тем, что снижение объема захватываемой лопастями приводит к уменьшению объема транспортируемой щепы и приводя тем самым к рассеиванию энергии выброса при возрастающих соударениях элементов потока измельченной древесины с внутренней поверхностями кожуха рубильного диска и щепопровода.

Вероятность передачи скорости щепе при первом обороте измельчителя p_1 несколько возрастает, вероятно, за счет захвата стружки последующими ножами (рисунок 4 б), а потребляемая мощность увеличивается по мере уменьшения размера фракции щепы и возрастания частоты перемещения, захватываемых лопастями объемов щепы (см. рис. 4 в). При этом производительность механизма выброса конечного продукта P увеличивается незначительно (с 76 до 87 кг/мин), рисунок 5.

Зависимость от $P(Z_d)$ постепенно усиливается при увеличении Z_d , поэтому для улучшения очистки нижней части кожуха от выпадающих из потока элементов измельченной древесины число ножей должно быть не менее четырех, при этом производительность машины будет составлять менее 84 кг/мин.

Изучение численного значения расстояния L_3 , представляющего промежуток между фронтальными частями кожуха и расположенными над поверхностью диска режущими кромками ножей, характеризует параметры эвакуации конечного продукта в его динамическом взаимодействии со стенками кожуха непосредственно перед перемещением в щепопровод.

Кроме того, L_3 влияет на затраты энергии необходимой для ввода элементов измельченной древесины потока щепы в кожухе, имеющего сложную траекторию. При проведении компьютерного эксперимента расстояние L_3 изменялось от 0 до 20 мм с шагом варьирования 5 мм.

Проведение экспериментов показало следующие результаты. Сокращение параметра L_3 до значения менее 10 мм не ска-

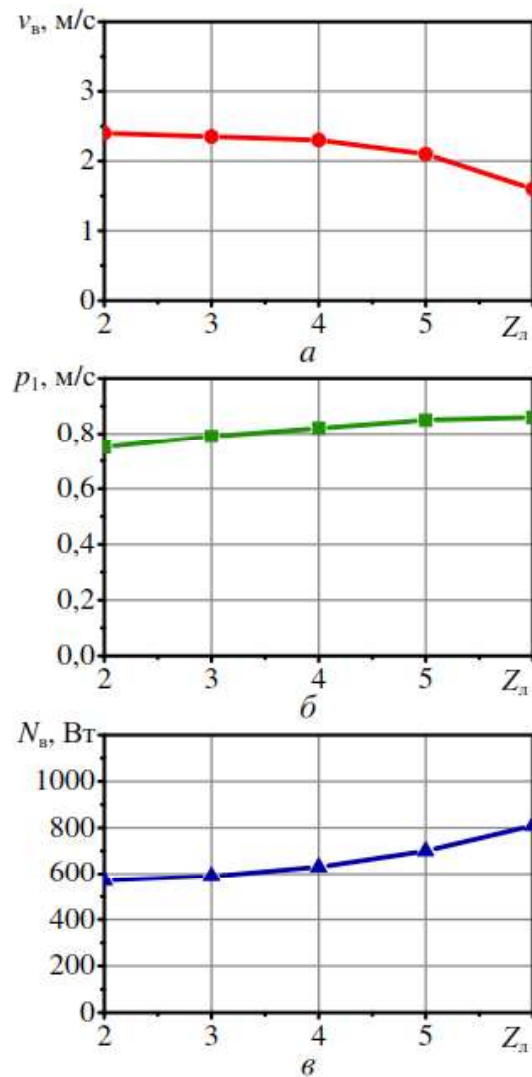


Рисунок 4 – Взаимосвязь числа лопастей на измельчителе Z_d со скоростью движения щепы v_b на выходе щепопровода (а), вероятностью выброса конечного продукта с первого оборота диска p_1 (б) и потерями мощности на транспортирование щепы N_b (в)

Figure 4 – Relationship between the number of blades on the chopper Z_d with the speed of movement of chips v_b at the exit of the chip pipeline, the probability of ejection of the final product from the first revolution of the disk p_1 (b) and power losses for transporting chips N_b (c)

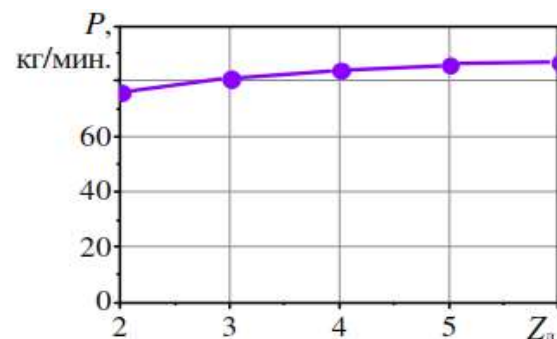


Рисунок 5 – Взаимосвязь производительности механизма выброса конечного продукта P с числом лопастей измельчителя Z_d

Figure 5 – Relationship between the performance of the final product ejection mechanism P and the number of chopper blades Z_d



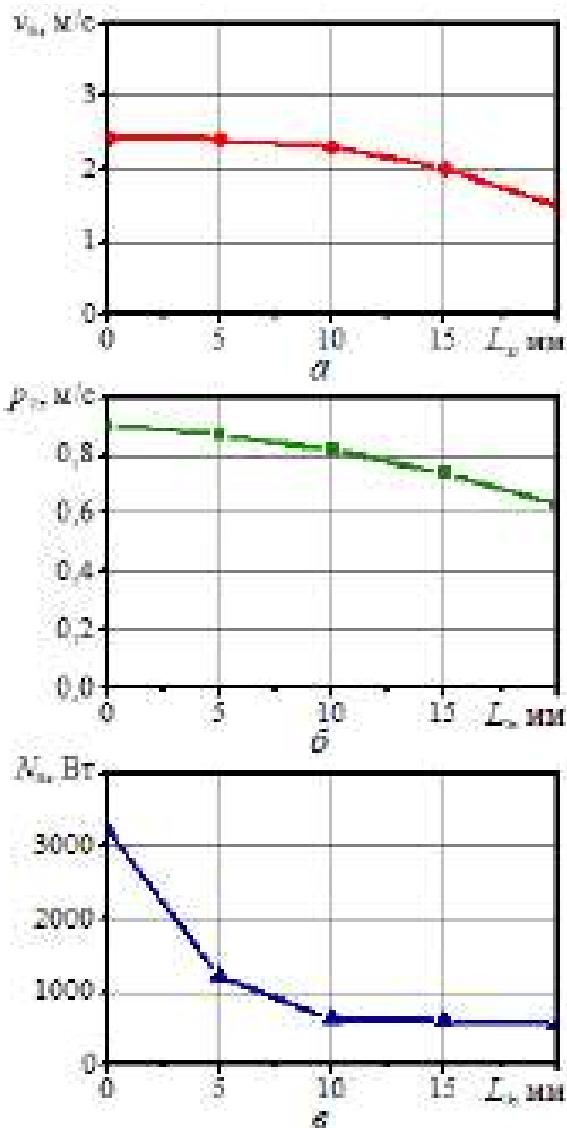


Рисунок 6 – Показатели взаимодействия параметра L_3 со значениями скорости эвакуации продукта v_e (а), вероятностью выброса щепы за один оборот диска p_1 (б) и мощностью, потребляемой на транспортирование щепы N_e (в)

Figure 6 – Indicators of the interaction of the parameter L_3 with the values of the product evacuation speed v_e (a), the probability of chips being released per one revolution of the disk p_1 (b) and the power consumed for transporting chips N_e (c)

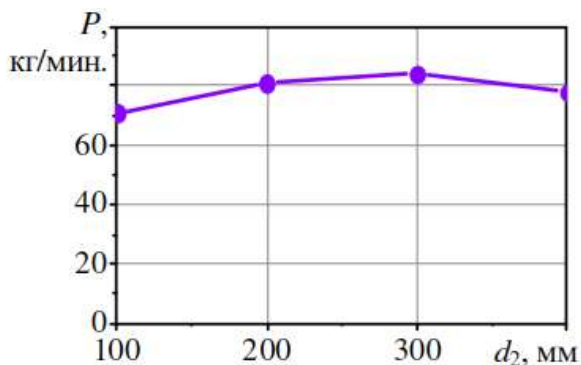


Рисунок 7 – Зависимость производительности механизма P от зазора между лопастями и кожухом L_3

Figure 7 – Dependence of mechanism performance P on the gap between the blades and the casing L_3

зывается на значительном изменении скорости эвакуации продукта и вероятности выброса щепы за один оборот диска (рисунок 6, а, б). Но при этом увеличивается мощность, потребляемая на транспортирование щепы (рисунок 6, в) ввиду того, что поток измельченной древесины имеет сложную траекторию движения в кожухе.

При $L_3 = 10$ мм и более эффективность работы механизма выброса щепы ухудшается, т.е. снижаются значения параметров v_e и p_1 (см. рисунок 6, а, б) при незначительном изменении потребляемой мощности N_e . Следует отметить, что в этом случае происходит ослабление зависимости $P(L_3)$ (рисунок 7), так как увеличение расстояния L_3 способствует ухудшению показателей рабочего процесса эвакуации конечного продукта. Увеличение численных значений параметра L_3 с 10 до 20 мм приводит к снижению производительности рубильной машины P с 84 кг/мин до 63 кг/мин.

При значениях $L_3 < 10$ мм его влияние на производительность незначительно (снижение P с 88 до 84 кг/мин). Поэтому наилучшим значением для параметра L_3 должно быть равное 10 мм.

Заключение. Анализ зависимостей показывает, что наилучшее число ножей для измельчающих дисков составляет 3–4 шт. В этом случае скорость транспортирования конечного продукта v_e равна 2,3 ... 2,4 м/с, а вероятность выброса щепы из щепопровода за первый оборот измельчителя p_1 равна 0,79...0,82. При этом мощность N_e , необходимая для эвакуации щепы, составляет 530 ... 595 Вт при производительности машины P более, чем 84 кг/мин. Допустимый зазор между режущей кромкой и боковой стенкой кожуха определен в размере около 10 мм. При этом скорость транспортирования конечного продукта v_e составляет около 2,3 м/с, а вероятность выброса щепы из



щепопровода за первый оборот измельчителя $p_1 = 0,82$ при потребляемой на транспортирование щепы мощностью $N_b = 630$ Вт и производительностью машины P порядка 84 кг/мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончаров В. Н., Гаузе А. А., Аввакумов М. В. Основы теории и расчета оборудования для подготовки бумажной массы. Ч. 2. Рубительные машины: учеб. пособие. СПб., 2012. 50 с.
2. Расчет и проектирование строительных и дорожных машин на ЭВМ / под ред. Е. Ю. Малиновского. – М.: Машиностроение, 1980. С. 216.
3. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем: учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1998. 319 с.
4. Фокин С. В., Фомина О. А. О конструктивных усовершенствованиях механизма выброса щепы из дисковых рубительных машин // Сквозные технологии промышленных производств и экономическая безопасность: материалы Всерос. науч.-практ. конф. 2019. С. 42–43.
5. Фокин С. В., Фомина О. А. О применении метода конечных элементов при проектировании рабочих элементов рубительных машин // Научная жизнь. 2017. № 12. С. 66–68.
6. Фокин С. В., Фомина О. А. Об использовании математических методов моделирования рубительных машин // Фундаментальные исследования, методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике: материалы 17-й Междунар. молодежной науч.-практ. конф. Новочеркасск, 2018. С. 158–159.
7. Фомина О.А., Фокин С.В., Касторнова А.В. К обоснованию конструктивных параметров щепопровода рубительной машины для измельчения отходов лесозаготовок // Аграрный научный журнал. 2023. № 3. С. 154–159.
8. Фокин С. В., Фомина О. А. Представление в модели рабочих поверхностей механизма выброса щепы из кожуха дисковой рубительной машины // Современные ресурсосберегающие технологии и технические средства лесного комплекса: материалы Всерос. науч.-практ. конф. Воронеж, 2021. С. 289–294.
9. Фокин С. В., Фомина О.А. Влияние конструктивно-технологических параметров на эффективность рабочего процесса выброса щепы из дисковой рубительной машины // Новый взгляд на развитие аграрной науки: сб. материалов науч.-практ. конф. аспирантов и молодых ученых. 2021. С. 150–156.
10. Фокин С.В., Фомина О. А. К обоснованию конструктивно-технологических параметров механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины // Лесной вестник. 2021. Т. 25. № 2. С. 99–107.

REFERENCES

1. Goncharov V. N., Gause A. A., Avvakumov M. V. Fundamentals of the theory and calculation of equipment for the preparation of paper pulp. Part 2. Chipping machines. St. Petersburg, 2012. 50 p. (In Russ.).
2. Calculation and design of construction and road machines on a computer. Moscow, 1980. 216 p. (In Russ.).
3. Sovetov B. Ya., Yakovlev S. A. Systems Modeling Moscow, 1998. 319 p. (In Russ.).
4. Fokin S. V., Fomina O. A. On constructive improvements in the mechanism for ejecting chips from disk chippers. *End-to-end Technologies of Industrial Production and Economic Security*. 2019:42–43 (In Russ.).
5. Fokin S. V., Fomina O. A. On the application of the finite element method in the design of working elements of chippers. *Scientific Life*. 2017;(12):66–68. (In Russ.).
6. Fokin S. V., Fomina O. A. On the use of mathematical methods for modeling chippers. *Fundamental Research, Methods and Algorithms of Applied Mathematics in Engineering, Medicine and Economic*. Novocherkassk, 2018:158–159. (In Russ.).
7. Fomina O. A., Fokin S. V., Kastornova A. V. On the substantiation of the design parameters of the chipping machine for crushing logging waste. *Agrarian Scientific Journal*. 2023;(3):154–159. (In Russ.).
8. Fokin S. V., Fomina O. A. Representation in the model of working surfaces of the mechanism for ejecting chips from the casing of a disk chipper. *Modern Resource-saving Technologies and Technical Means of the Forestry Complex*. Voronezh, 2021:289–294. (In Russ.).
9. Fokin S. V., Fomina O. A. Influence of constructive and technological parameters on the efficiency of the working process of chip ejection from a disk chipper. *A new Look at the Development of Agrarian Science*. 2021:150–156. (In Russ.).
10. Fokin S. V., Fomina O. A. To substantiate the design and technological parameters of the mechanism for ejecting wood chips from a disk chipper. *Forestry Bulletin*. 2021;25(2):99–107. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 7.07.2023; одобрена после рецензирования 19.08.2023; принята к публикации 21.08.2023.

The article was submitted 7.07.2023; approved after reviewing 19.08.2023; accepted for publication 21.08.2023.

