

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК629.464

doi: 10.30987/2782-5957-2022-3-42-52

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ФРЕЗЫ СНЕГООЧИСТИТЕЛЯ ОТБРАСЫВАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ВЗАВИСИМОСТИ ОТ УГЛА ЗАХОДА ЛЕНТЫ ФРЕЗЫ И РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ

Денис Сергеевич Алешков^{1✉}, Михаил Владимирович Суковин²

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Россия

¹denisaleshkov@mail.ru, ORCID0000-0003-4204-7221

²sukovin_8@mail.ru, ORCID0000-0002-3151-4341

Аннотация

Целью исследования является оценка влияния угла захода ленты фрезы на мощность необходимую для транспортирования снежной массы фрезой питателя фрезерно-роторного снегоочистителя и его производительность с учетом взаимодействия снежных частиц между собой.

Задача, решению которой посвящена статья - установить характер влияния угла захода, размеров транспортируемых частиц на производительность фрезы питателя и мощность, затрачиваемую на перемещение снежной массы как группы взаимодействующих частиц конечного размера

Методы исследования: теоретические исследования и имитационное моделирование работы фрезы питателя при транспортировании снежной массы, как группы взаимодействующих частиц конечного размера.

Новизна работы заключается в том, что в результате имитационного моделирования впервые было получено теоретическое описание характера изменения производительности питателя фрезерно-роторного снегоочистителя и затрат мощности на транспортирование снежной массы в зависимости от угла захода ленты фрезы и характерного размера снежных частиц, в условиях их взаимодействия между собой, а также впервые получены аппроксимирующие уравнения изменения производительности и затрат мощности в зависимости от угла захода фрезы и характерного размера снежных частиц.

В результате исследований установлено, что увеличение угла захода ленты фрезы приводит к нелинейному росту затрат мощности на транспор-

тирование снежных частиц, описываемым полиномом четвертой степени. Увеличение характерного размера частиц транспортируемого снежного потока в питателе фрезерно-роторного снегоочистителя так же вызывает нелинейное увеличение затрат мощности на транспортирование снежной массы, которое описывается полиномом второй степени. Характер увеличения производительности при увеличении угла захода ленты фрезы описывается полиномом четвертой степени, а при увеличении характерного размера частиц третьей степени. Области максимальных затрат мощности и максимальной производительности имеют смещение друг относительно друга в координатах характерного размера частиц и угла захода ленты фрезы.

Выводы: определены характеры влияния угла захода ленты фрезы и размера транспортируемых снежных частиц на основные параметры работы фрезы питателя. Результаты теоретических исследований достаточно хорошо коррелируются с результатами практических наблюдений, что говорит о целесообразности использования математической модели, учитывающей взаимодействие транспортируемых снежных частиц, в дальнейших исследованиях, направленных на повышение эффективности работы фрезерно-роторных снегоочистителей.

Ключевые слова: фрезерно-роторный снегоочиститель; фреза питателя; снежная частица; затраты мощности; производительность питателя.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Ссылка для цитирования:

Алешков Д.С. Теоретическая оценка параметров работы фрезы снегоочистителя отбрасывающего действия в зависимости от угла захода ленты фрезы и размеров частиц / Д. С. Алешков, М. В. Суковин // Транспортное машиностроение. – 2022. - № 3. – С. 42 – 52. doi: 10.30987/2782-5957-2022-3-42-52.

THEORETICAL PREDICTION OF THE OPERATION PARAMETERS OF THE BOUNCING SNOWPLOW CUTTER DEPENDING ON THE CUTTER BAND ANGLE AND FLAKE SIZES

Denis Sergeevich Aleshkov^{1✉}, Mikhail Vladimirovich Sukovin²

^{1,2}The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

¹denisaleshkov@mail.ru, ORCID 0000-0003-4204-7221

²sukovin_8@mail.ru, ORCID 0000-0002-3151-4341

Abstract

The work objective is to assess the effect of cutter band angle on the power required for transporting the snow by the cutter feeder of the rotary snowplow and its performance, taking into account the interaction of snowflakes with each other.

The problem to which the paper is devoted is to find out the influence of the angle, the size of the transported particles on the productivity of the feeder cutter and the power spent on moving the snow as a group of interacting flakes of finite size.

Research methods: theoretical studies and simulation of the feeder cutter operation during transportation of snow as a group of interacting flakes of finite size.

The novelty of the work lies in the fact that simulation, for the first time, gives theoretical description of changes in the productivity of a cutter and rotary snowplow feeder of and the power costs for transporting snow depending on the cutter band angle and the typical size of snowflakes in conditions of their interaction with each other, and also approximating equations of changes in productivity and power costs depending on the cutter band angle and typical size of snowflakes.

The study results show that an increase in the cutter band angle leads to a nonlinear increase in power

costs for transporting snowflakes, described by a fourth degree polynomial. An increase in the typical flake size of the transported snow in the cutter feeder of the rotary snowplow also causes a nonlinear increase in the power costs for transporting snow, which is described by a second degree polynomial. The increase in productivity with an increase in the cutter band angle is described by a fourth degree polynomial, and with an increase in the typical flake size by the third degree one. The areas of maximum power consumption and maximum productivity have an offset relative to each other in the coordinates of the typical flake size and the cutter band angle.

Conclusions: the influence of the cutter band angle and the size of transported snowflakes on the main parameters of the cutter feeder operation are defined. The results of theoretical studies correlate with the results of practical studies, which indicates the feasibility of using a mathematical model that takes into account the interaction of transported snowflakes in further studies aimed at improving the efficiency of feeder of the rotary snowplows.

Keywords: feeder of the rotary snowplow; feeder cutter; snowflakes; power costs; feeder productivity.

Acknowledgements: the authors thank the reviewers for their paper evaluation.

Reference for citing:

Aleshkov D.S. Theoretical prediction of the operation parameters of the bouncing snowplow cutter depending on the cutter band angle and flake sizes / D. S. Aleshkov, M. V. Sukovin // *Transport Engineering*. - 2022. - no. 3. - p.42 – 52. doi: 10.30987/2782-5957-2022-3-42-52.

Введение

В работе [1] дается описание патента (Bucher, 2021) на фрезу питателя фрезерно-роторного снегоочистителя (далее ФРС) с переменным углом захода, однако указываются технологические сложности, связанные с использованием такой формы фрезы и энергетической не оптимальности совмещения процессов резания и транспортирования снежной массы в область загрузочного окна метательного аппарата. Тем самым постулируется факт наличия оптимального угла захода для каждого из перечисленных процессов в отдельности.

Сложившаяся практика производства фрез питателей ФРС использует значения угла захода ленты фрезы в диапазоне $\theta=25...30^{\circ}$, что для одношаговых фрез маломощных ФРС обеспечивает наименьшее время нахождения вырезанной снежной массы в питателе.

В работах [2, 3] был проведен сравнительный анализ затрат мощностей, получаемых при использовании (1), (2), в зависимости от шага шнека при фиксированном значении радиуса шнека.

$$N_p = \frac{2 \cdot 10^6 \pi^2 k_{рез} R_\phi B_\phi V_{пер} z_n}{\omega_\phi n_\phi T_\phi \cos \theta} 10^{-3} \left(R_\phi \omega_\phi - \frac{\pi V_{пер}}{n_\phi} \right) \operatorname{tg}(\theta + \delta_{ch}), \quad (1)$$

где T_ϕ – шаг ленты фрезы, для маломощных ФРС $T_\phi=1$; z_n – число винтовых рабочих органов питателя, для ФРС, $z_n=1$; $k_{рез}$ – удельное сопротивление резанию снега,

$$N_m = 1,39 \cdot 10^{-3} B_\phi \omega_\phi^2 R_\phi \Pi_{mex} \frac{(f_{mp.c}^{вн} + f_{mp.c}^н) \operatorname{tg}(\theta + \delta_{ch})}{\operatorname{tg} \theta}, \quad (2)$$

где $\Pi_{тех}$ – техническая производительность питателя ФРС, т/час; $f_{тр.с}^{вн}$ – коэффициент внешнего трения снега; $f_{тр.с}^н$ – коэффициент внутреннего трения снега.

В результате было установлено, что величина мощности резания является доминирующей относительно затрат мощности на транспортирование вырезанной снежной массы. С увеличением шага шнека (T_ϕ) суммарные затраты мощности на привод шнекового питателя имеют тенденцию к снижению, что благоприятно для малогабаритных снегоочистителей, оптимальным значением шага шнека будет являться $T_\phi = 2 \cdot R_\phi$. Однако определение поведения многопараметрической функции посредством прямых вычислений является нерациональным и охватывает часть всего многообразия возможных значений следящей функции.

Большинство исследований связанных с определением функциональных зависимостей потребляемой мощности и производительности питателя снегоочистителя базируются на результатах экспериментальных исследований, например, в работе [4] исследуется сопротивление резанию и перемещению снега шнеком, в работе [5] уделено внимание роли ФРС в формировании снежных валов. В случае проведения теоретических исследований широко используются инструменты теории резания, так в [6] установлено, что процесс сепарации пласта роторами зависит от скорости подачи пласта, окружной скорости роторов, кривизны расположения продольных осей роторов, степени задернелости и толщины пласта. В [7] определены функциональные зависимости производительности

Па; δ_{ch} – угол внешнего трения снега; R_ϕ – радиус фрезы (шнека).

Затраты мощности на транспортирование вырезанной снежной массы, могут быть найдены по формуле [2, 3]:

сти и поступательной скорости фрезы земснаряда от толщины затупленной режущей кромки ножа при различных значениях потребляемой мощности для различных видов грунтов.

Оптимальное значение угла наклона винтовой линии последнего витка шнека волчка-измельчителя к его оси находится в зависимости от производительности, которая является аргументом обратной тригонометрической функции, что позволяет сделать вывод о монотонности изменения возможных значений производительности. При этом теоретические исследования определения характеристик рабочего такого процесса выделяют следующие основные характеристики рабочей среды: коэффициент Пуассона; коэффициент трения [8]. Что касается определения характеристик экструдеров, то здесь теоретические исследования проводятся с использованием законов механики сплошной среды, а мощность, потребляемая приводом шнековой мешалки, находится в кубической зависимости от угловой скорости вращения и в пятой степени от диаметра шнековой мешалки [9].

В работе [10] представлены зависимости влияния шага и высоты ленты шнекового барабана на производительность и затраты мощности работы такого рабочего органа, при фиксированных кинематических характеристиках шнековых рабочих органов, из которых следует наличие экстремумов таких функциональных параметров как производительность, так и затраты мощности. При этом использовался метод дискретных элементов [11]. Необходимо отметить, что данный метод так же применяется в исследовании

дованиях, где требуется моделирование снега, благодаря своей наглядности и простоты аналитических выражений. В работе [12] частицы снега рассматривались как сферы с одинаковыми диаметрами 0,15 мм [13] и плотностью 250 кг/м³ [13]. В работе [14] исследуется взаимодействие двух сфер по закону Герца.

Таким образом, вопрос резания и транспортирования шнеко-фрезерными рабочими органами внешней среды достаточно хорошо изучен, однако данные результаты могут быть применимы лишь для отдельных состояний снега, что не позволит в полной мере оценить эффективность работы фрезерно-роторного снегоочистителя. Таким образом, необходимо провести дополнительные теоретические исследования по оценке влияния конструктивных и технологических

параметров фрезы питателя ФРС на эффективность процесса транспортирования вырезанной снежной массы.

Основной целью данной работы является оценка влияния конструктивных параметров фрезы питателя в зависимости от свойств снега на производительность и потребляемую мощность фрезой в процессе транспортирования вырезанной снежной массы в область загрузочного окна.

Для достижения поставленной цели решалась задача сравнения затрат мощности на транспортирование снежной массы в случае ее представления как отдельного кускового образования и представления группы взаимодействующих между собой частиц.

Основная часть

Проведем исследование функций (1) и (2) на предмет наличия экстремумов. Для этого необходимо найти произ-

водные, по θ , и определить критические точки, указанных функций.

Производные функции (1) и (2), соответственно, имеют вид:

$$\frac{dN_P}{d\theta} = 2,712 \cdot 10^3 k_{\text{pez}} \left(\sin(2\theta + 2\delta_{\text{CH}}) + \frac{\sin 2\theta}{1 + \sin^2 \theta} \right);$$

$$\frac{dN_T}{d\theta} = \frac{20,29 \cdot 10^{-8} \Pi_{\text{тех}}}{\cos^2(\theta + \delta_{\text{CH}})}.$$

Точки локальных экстремумов для (1), (2) определяются из выражений:

$$2,712 \cdot 10^3 k_{\text{pez}} \left(\sin(2\theta + 2\delta_{\text{CH}}) + \frac{\sin 2\theta}{1 + \sin^2 \theta} \right) = 0;$$

$$\frac{20,29 \cdot 10^{-8} \Pi_{\text{тех}}}{\cos^2(\theta + \delta_{\text{CH}})} = 0.$$

Локальный экстремум функции (2) находится в точке:

$$\cos^2(\theta + \delta_{\text{CH}}) = 0,$$

решением которого является:

$$\theta = \frac{\pi}{2} n - \delta_{\text{CH}}, \text{ где } n \in 1, 2, 3 \dots$$

Для поиска точки локального экстремума функции (1) необходимо решить уравнение:

$$\sin(2\theta + 2\delta_{\text{CH}}) + \frac{\sin 2\theta}{1 + \sin^2 \theta} = 0,$$

Данное уравнение является трансцендентным. В результате приближенных вычислений, у выражения (1) была найдена критическая точка, совпадающая с точкой локального экстремума выражения (1). На рис.1 представлено графическое решение уравнение нахождения точки локального экстремума функции (1). Решение данного уравнения записывается в аналогичном виде:

$$\theta = \frac{\pi}{2} n - \delta_{\text{CH}}, \text{ где } n \in 1, 2, 3 \dots$$

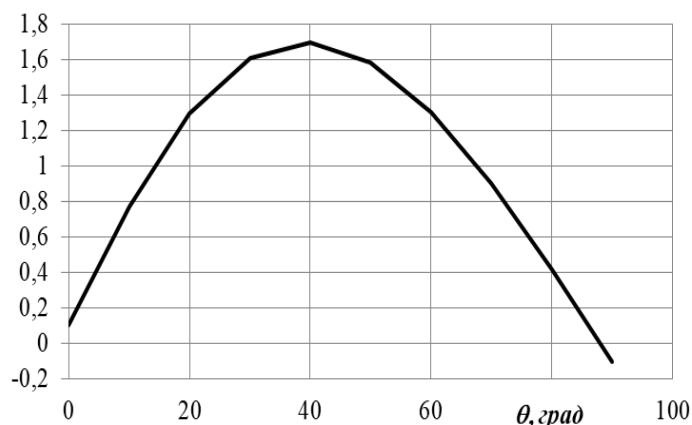


Рис.1. Графическое решение уравнения поиска локального экстремума функции (1)

Fig. 1. Graphical solution of the equation for finding the local extremum of the function (1)

Точки локальных экстремумов функций (1) и (2) совпадают, из чего можно сделать вывод о монотонном изменении производительности и затрат мощности на транспортирование снежной массы во всем диапазоне значений углов захода ленты фрезы, которые реализованы в существующих конструкциях фрез питателей ФРС.

В работе [15] даны уравнения работы фрезы питателя ФРС. Рассмотрим, как влияет угол захода ленты фрезы, θ , на направление действия сил нормальных реакций элементов фрезы питателя ФРС. Из представленных уравнений получаем условия, при которых происходит изменения направления действия силы нормальной реакции ленты фрезы, N_f , при транспортировании снежной частицы:

$$\sin\theta - f_\phi \cos\theta = 0, \quad (4)$$

$$\cos\theta + f_\phi \sin\theta = 0. \quad (5)$$

Решение, при котором происходит изменение направление действия силы нормальной реакции ленты фрезы в уравнениях движения тривиально и имеет вид:

$$\theta = \arctg(f_\phi + \pi n/2),$$

$$\theta = \text{arcctg}(-f_\phi + \pi n/2),$$

где $n \in 1, 2, 3, \dots$

Существующие ФРС имеют угол захода больший, чем результат решения уравнения (4) и (5) и угол захода постоянный по всей ширине питателя, что говорит о том, что практически во всем диапазоне углов захода, направление действия силы

нормальной реакции ленты фрезы не меняет своего направления, в случае безотрывного движения по ленте фрезы и по поверхности отвала снежной частицы, как отдельного крупнокускового образования, так и при ее представлении материальной частицей.

Рассмотрим, как изменяется производительность и затраты мощности на транспортирование снежной массы фрезой питателя ФРС, при ее представлении группой взаимодействующих между собой снежных частиц. Конструктивные и технологические параметры фрезы питателя ФРС, при которых производились вычисления, представлены в таблице. Загрузка питателя моделировалась непрерывным поступлением частиц за полный оборот фрезы питателя. Радиус частиц варьировался в диапазоне 0,005...0,03 м с шагом 0,005. Угол захода фрезы, изменялся от 10^0 до 50^0 с шагом варьирования 10^0 .

В результате проведенного имитационного моделирования на ЭВМ были получены траектории и скорости движения снежных частиц, мгновенные значения сил нормальных реакций элементов фрезы питателя и затрачиваемых мощностей.

Изменение мгновенных текущих значений затрачиваемых мощностей на перемещение группы частиц в зависимости от их характерного радиуса представлено на рис. 2.

Исходные данные определения параметров работы фрезы питателя
при транспортировании снежной массы

Table

Initial data for determining the operating parameters of the feeder cutter
when transporting the snow mass

Параметр	Значение
R_{ϕ} – радиус фрезы, м	0,3
ω_{ϕ} – угловая скорость вращения фрезы, c^{-1}	8
V – скорость снегоочистителя, м/с	0,55
$B/2$ – половина ширины захвата питателя ФРС, м	0,69
f_{ψ} – коэффициент трения снежной частицы о поверхность отвала	0,03
f_{ϕ} – коэффициент трения снежной частицы о ленту фрезы	0,03
ρ – плотность снежной частицы, $кг/м^3$	500
E – модуль Юнга, Н/м	2000
η – коэффициент Пуассона	0,3

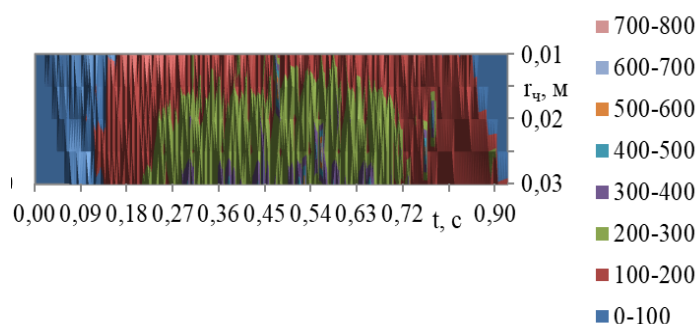


Рис. 2. Изменение суммарной мощности, N_{sum} , затрачиваемое на перемещение группы снежных частиц, во времени, в зависимости от радиуса частиц (вид сверху), при угле захода ленты фрезы $\theta = 20^{\circ}$
Fig. 2. Change in the total power, N_{sum} , spent on the movement of a group of snow particles, in time, depending on the radius of the particles (top view), at an angle of approach of the cutter belt $\theta = 20^{\circ}$

На рис. 3 представлены значения мгновенных текущих значений затрачиваемых мощностей на перемещение группы

частиц характерного радиуса, для углов захода $\theta = 20$ и 30° .

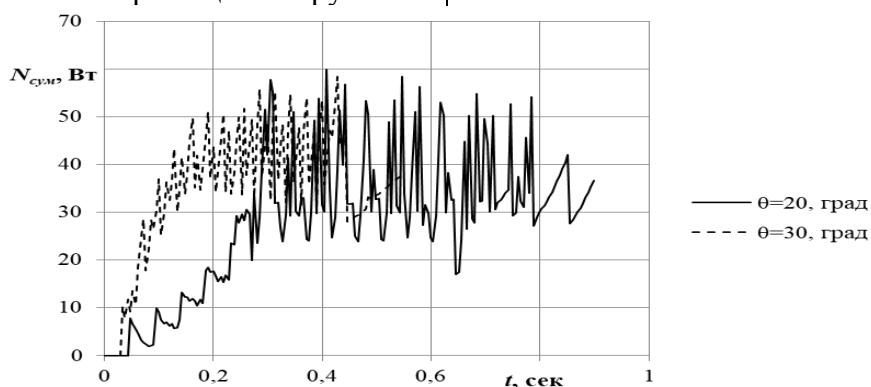


Рис. 3. Изменение суммарной мощности, N_{sum} , в процессе транспортирования снежных частиц в питателе в зависимости от времени при $r_{ch} = 0,025$ м
Fig. 3. Change in the total power, N_{sum} , in the process of transporting snow particles in the feeder, depending on time at $r_{ch} = 0.025$ m

В результате последующего осреднения полученных результатов была построена зависимость средних значений мощно-

стей по всем транспортируемым частицам, N_{cp} , в зависимости от их радиуса, r_{ch} , и угла захода ленты фрезы, θ (рис. 4).

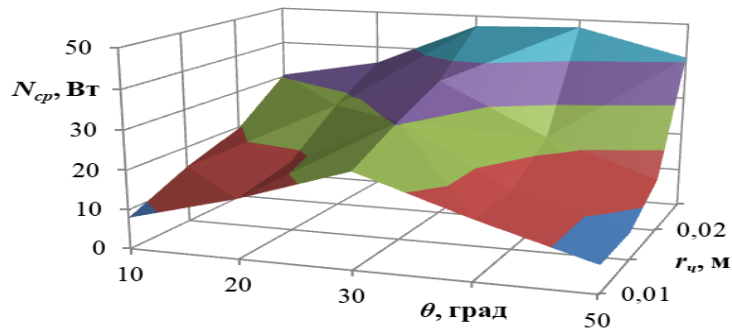


Рис. 4. Изменение средних значений мощностей по всем транспортируемым частицам, N_{cp} , в зависимости от их радиуса, r_{ch} , и угла захода ленты фрезы, θ , за один загрузочный цикл для однозаходной фрезы

Fig. 4. Change in the average power values for all transported particles, N_{sr} , depending on their radius, r_{ch} , and the angle of entry of the cutter belt, θ , in one loading cycle for a single-pass cutter

Общая масса, m_s , поступившая в питатель ФРС, определялась как сумма масс отдельных частиц, представляющих собой сферы одного радиуса, r_q . При достижении заданной границы загрузочного окна металлического аппарата ФРС фрезой питателя, рассчитывалась общая потерянная масса, $m_{птр}$, как сумма масс отдельных частиц, которые оказались вне питателя ФРС. Относительная потерянная масса определялась по формуле:

$$O_{птр} = \frac{m_{птр}}{m_s},$$

где

$$m_{птр} = \sum_{i=0}^{n_{птр}} m_{птр_i} = \frac{4}{3} \pi \rho \sum_{i=0}^{n_{птр}} r_{птр_i}^3, \quad (6)$$

$$\Pi_{п} = \frac{4}{3} \pi \rho \frac{\sum_{i=0}^{n_s} r_q^3 - \sum_{i=0}^{n_{птр}} r_q^3}{t_{п}} = \frac{4}{3} \pi \rho r_q^3 \frac{n_s - n_{птр}}{t_{п}}.$$

На рис. 5 представлена зависимость производительности фрезы питателя, $\Pi_{п}$, от угла захода ленты фрезы, θ , и характерного размера транспортируемых частиц, r_q .

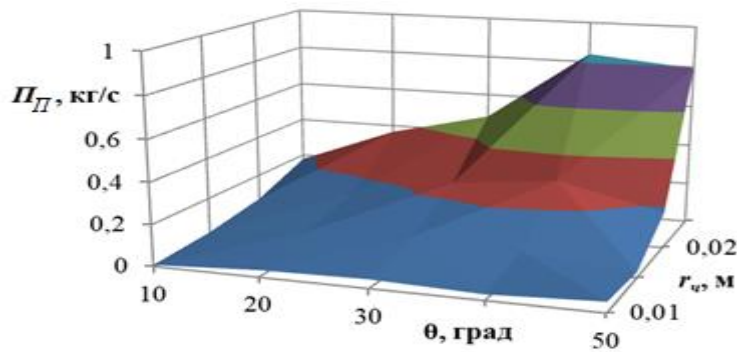
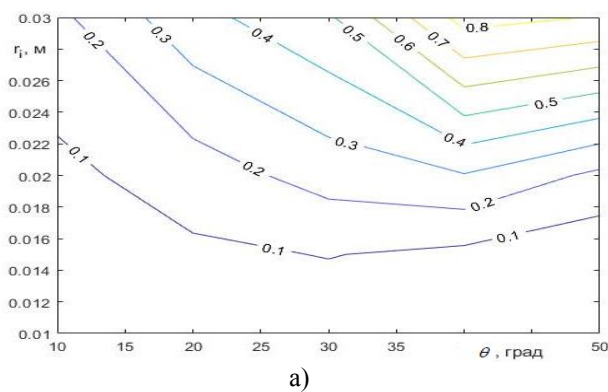


Рис. 5. Зависимость производительности фрезы питателя, $\Pi_{п}$, от угла захода ленты фрезы, θ , и размера транспортируемых частиц, r_q

Fig. 5. Dependence of the productivity of the feeder cutter, $\Pi_{п}$, on the angle of entry of the cutter belt, θ , and the size of the transported particles, r_{ch}

Из рис. 6 видно, что с увеличением характерного размера частиц мощность, которую необходимо сообщить фрезе питателя ФРС, монотонно возрастает. Что касается угла захода ленты фрезы, то максимальные затраты мощности приходятся на диапазон углов захода, $25^{\circ} < \theta < 45^{\circ}$, для случая транспортирования снежных частиц, и чем больше характерный размер частиц, тем более выражена данная область.

В свою очередь производительность, Π_{Π} , возрастает, как при увеличении ха-



рактерного радиуса снежных частиц, $r_{ч}$, так и при увеличении угла захода, θ (см. рис. 6). Увеличение производительности имеет ярко выраженный нелинейный характер. Однако, при углах захода более 45° начинает проявляться тенденция к снижению производительности фрезы питателя ФРС. Таким образом, область максимальных затрат мощности и максимальной производительности имеют смещение друг относительно друга в координатах характерного размера частиц, $r_{ч}$, и угла захода ленты фрезы, θ , по оси θ .

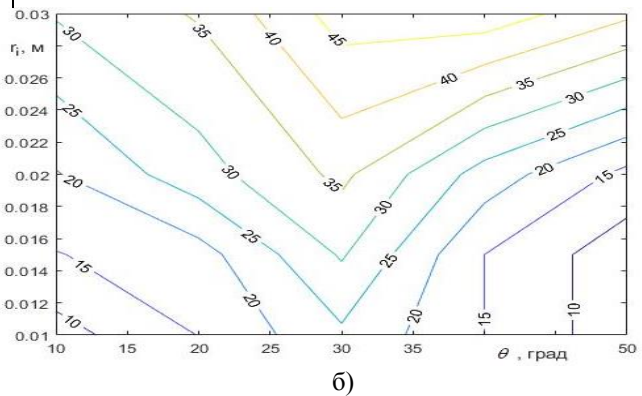


Рис. 6. Картограмма изменения производительности фрезы питателя, Π_{Π} , кг/с (а) и мощности, N_{cp} , Вт, (б) в зависимости от характерного размера частиц, $r_{ч}$, м, и угла захода ленты фрезы, θ , град
 Fig. 6. Cartogram of changes in the productivity of the feeder cutter, Π_{Π} , kg / s (a) and power, N_{cp} , W, (b) depending on the characteristic particle size, r_{ch} , m, and the angle of entry of the cutter belt, θ , deg

Аналитические формулы, полученные аппроксимацией результатов имитационного моделирования на ЭВМ работы

$$\Pi_{\Pi} = 0,19 + 0,08\theta + 0,24r_{ч} + 0,03\theta^2 + 0,16\theta r_{ч} + 0,05r_{ч}^2 + 0,05\theta^3 - 0,02\theta^2 r_{ч} + 0,05\theta r_{ч}^2 - 0,03r_{ч}^3 - 0,04\theta^4 - 0,04\theta^3 r_{ч} - 0,01\theta^2 r_{ч}^2 - 0,02\theta r_{ч}^3 \quad (8)$$

$$N_{cp} = 33,59 - 1,47\theta + 9,27r_{ч} - 25,68\theta^2 + 3,11\theta r_{ч} + 0,95r_{ч}^2 - 0,82\theta^3 + 0,32\theta^2 \cdot r_{ч} + 2,78\theta r_{ч}^2 + 8,29\theta^4 - 1,26\theta^3 r_{ч} + 1,12 \cdot \theta^2 r_{ч}^2. \quad (9)$$

Коэффициенты детерминации составили 0,973 и 0,97, соответственно. На рис.

фрезы питателя ФРС, производительности и затрачиваемой мощности, имеют вид:

7 и 8 представлены поверхности, описываемые формулами (8) и (9), соответственно.

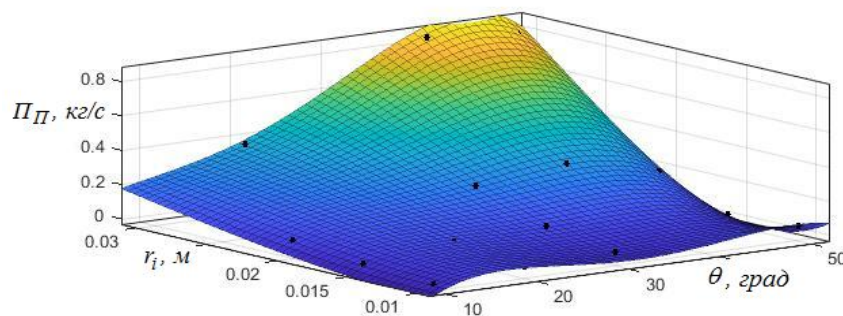


Рис. 7. Аппроксимирующая поверхность зависимости производительности фрезы питателя, Π_{Π} , кг/с, от характерного размера частиц, $r_{ч}$, м и угла захода ленты фрезы, θ , град
 Fig. 7. Approximating surface of the dependence of the productivity of the feeder cutter, Π_{Π} , kg / s, on the characteristic particle size, r_{ch} , m and the angle of entry of the cutter belt, θ , deg

Максимальная производительность достигается за счет увеличения угла захода ленты фрезы, что минимизирует время транспортирования снежных частиц на заданное расстояние и увеличением размера транспортируемых снежных частиц, обеспечивающих большую массу. Увеличение размера транспортируемых частиц приводит к необходимости обеспечения минимального расстояния между соседними

витками фрезы, обеспечивающего возможность транспортирования снежных частиц. Таким образом, можно сделать вывод о необходимости ограничения числа заходов фрезы питателя ФРС. Для транспортирования снежных частиц диаметром 0,06 м и геометрических параметрах питателя ФРС, представленных в таблице, предельное количество заходов у фрезы будет равно 11.

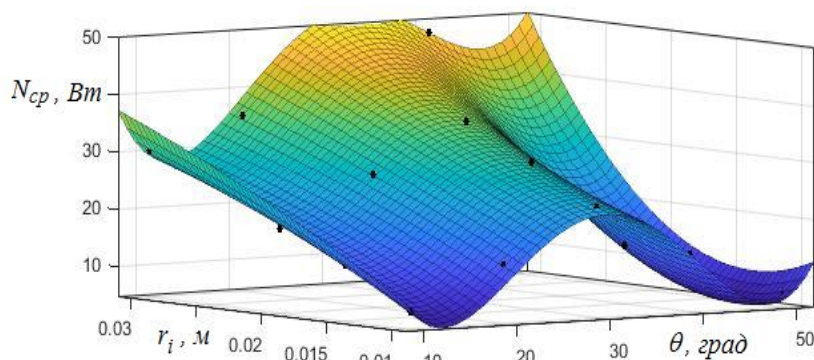


Рис. 8. Аппроксимирующая поверхность зависимости мощности фрезы, N_{cp} , Вт, от характерного размера частиц, r_i , м, и угла захода ленты фрезы, θ , град.

Fig. 8. Approximating surface of the dependence of the power of the cutter, N_{sp} , W, on the characteristic particle size, r_{ch} , m and the angle of entry of the cutter belt, θ , deg

Анализ полученных результатов показывает, что величина силы нормальной реакции ленты фрезы во многом обусловлена результатом взаимодействия частиц между собой, т.о. необходимы дополнительные исследования влияния характеристик поведения частиц при ударе на вели-

чину силы нормальной реакции ленты фрезы. Так же лента фрезы испытывает воздействие со стороны транспортируемых снежных частиц практически по всей своей длине, за исключением начального участка, длина которого ограничена углом порядка 20° .

Заключение

Проведены теоретические исследования влияния угла захода ленты фрезы при различных характерных размерах снежных частиц на производительность работы питателя ФРС и потребляемую мощность фрезой в процессе транспортирования снежной массы. Установлен характер изменения производительности и потребляемой мощности. Полученные ре-

зультаты с учетом взаимодействия частиц друг с другом в процессе их транспортирования. Теоретические результаты достаточно хорошо коррелируются с результатами практических наблюдений, что говорит о целесообразности использования математической модели в практических исследованиях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Иванов А.Н., Мишин В.А. Снегоочистители отбрасывающего действия. Москва: Машиностроение, 1981. 159 с.

2. Закиров М.Ф. Исследование влияния шага шнека на мощность привода питателя малогабаритного шнекороторного снегоочистителя. *Интел-*

- лектуальные системы в производстве. 2015. № 2(26). С. 56-57.
3. Xingzhihui1a L. Structure design of small road snow remover. *Journal of Physics: Conference Series*. 1939;2021:012054.
 4. Zakirov M.F. The research of resistance to snow cutting and moving with an auger of a small-sized rotary-auger snowplow. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific Conference Interstroyemeh - 2019*, ISM 2019, Kazan, 12–13 сентября 2019 года. Kazan: Institute of Physics Publishing, 2020:012043. DOI 10.1088/1757-899X/786/1/012043.
 5. Aleshkov D.S., Sukovin M.V., Banket M.V. et al. Experimental investigations of snow bank formation during milling and rotary snow blower operation. *Journal of Applied Engineering Science*. 2021;19(1): 9-16. DOI 10.5937/jaes0-28018.
 6. Орловский С.Н. Методика расчета рабочего органа машины для послойного фрезерования лесных почв. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2019. № 3(369). С. 97-109. DOI 10.17238/issn0536-1036.2019.3.97.
 7. Согин А.В., Арефьев Н.Н. Исследование режимов резания вязких и сыпучих грунтов фрезой земснаряда проекта 2000 М. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009. № S1. С. 194-198.
 8. Пеленко В.В., Малявко Д.П., Усманов И.И. и др. Оптимизация процесса измельчения пищевых материалов в волчках. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств*. 2016. № 2. С. 32-39.
 9. Коновалов В.В., Новиков В.В., Азиаткин Д.Н., Грецов А.С. Моделирование процесса непрерывного приготовления смеси смесителем-дозатором экструдера. *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии*. 2013. № 3. С. 72-78.
 10. Bartenev I., Malyukov S., Malyukov M. Forest fire extinguishing: theoretical study of the screw drum parameter influence on the efficiency of a forest fire soil-sweeping machine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;595:012013. 10.1088/1755-1315/595/1/012013.
 11. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 640 с.
 12. Ziad B. Two-way coupled Eulerian-Eulerian finite volume simulation of drifting snow [Disertacija]. *Zagreb: Sveučilišteu Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje*; 2018 [pristupljeno 23.12.2021.] Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:198563>.
 13. Zhao L., Yu Z., Zhu F., Qi X., Zhao S. CFD-DEM modeling of snowdrifts on stepped at roofs. *Wind and Structures*. 2016;23(6):523542.
 14. Balevičius R., Mróz Z. A finite sliding model of two identical spheres under displacement and force control. *Part I: Static analysis. Acta Mechanica*. 2013;224:1659-1684. DOI: 10.1007/s00707-013-0839-9.
 15. Аleshkov Д.С., Урусова Н.Ю. Влияние кинематических характеристик питателя и базовой машины фрезерно-роторного снегоочистителя на процесс отделения стружки. *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*. 2012. № 5(27). С. 7-10.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Buche, E.** 2021. *US2751697A - Snowplow - Google Patents*. [online] Patents.google.com. Available at: <https://patents.google.com/patent/US2751697?oq=us2751697a> [Accessed 9 December 2021].
1. Ivanov A.N., Mishin V.A. Bouncing snowplows. Moscow: Mashinostroenie, 1981. 159 p.
2. Zakirov M.F. Study of the screw pitch effect on the drive power of a small-sized screw and rotor snowplow feeder. *Intelligent Systems in Production*. 2015. no. 2(26). pp. 56-57.
3. Xingzhihui1a L. Structure design of small road snow remover. *Journal of Physics: Conference Series*. 1939;2021:012054.
4. Zakirov M.F. The research of resistance to snow cutting and moving with an auger of a small-sized rotary-auger snowplow. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific Conference Interstroyemeh - 2019*, ISM 2019, Kazan, 12–13 сентября 2019 года. Kazan: Institute of Physics Publishing, 2020:012043. DOI 10.1088/1757-899X/786/1/012043.
5. Aleshkov D.S., Sukovin M.V., Banket M.V. et al. Experimental investigations of snow bank formation during milling and rotary snow blower operation. *Journal of Applied Engineering Science*. 2021;19(1): 9-16. DOI 10.5937/jaes0-28018.
6. Orlovskiy S.N. Method of calculating a machine body of for layer-by-layer milling of forest soils. News of higher educational institutions. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*. 2019. no. 3(369). pp. 97-109. DOI 10.17238/issn0536-1036.2019.3.97.
7. Sogin A.V., Arefyev N.N. Study of cutting modes of viscous and loose soils with a dredger cutter of 2000M project. *Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2009. no. S1. pp. 194-198.
8. Pelenkov V.V., Malyavko D.P., Usmanov I.I. et al. Optimization of the grinding process of raw materials in grinders. *Scientific Journal NRU ITMO. Processes and Food Production Equipment*. 2016. no. 2. pp. 32-39.
9. Konovalov V.V., Novikov V.V., Asiatkin D N.N., Gretsov A.S. Modeling of continuous mixture preparation by an extruder mixer. *Proceedings of Sama-*

- ra State Agrarian University. 2013. no. 3. pp. 72-78.
10. Bartenev I., Malyukov S., Malyukov M. Forest fire extinguishing: theoretical study of the screw drum parameter influence on the efficiency of a forest fire soil-sweeping machine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;595:012013. 10.1088/1755-1315/595/1/012013.
 11. Hockney R., Eastwood J. Numerical modeling by the particle method. Trans. from English M.: Mir, 1987. 640 p.
 12. Ziad B. Two-way coupled Eulerian-Eulerian finite volume simulation of drifting snow [Disertacija]. Zagreb: Sveučilišteu Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2018 [pristupljeno 23.12.2021.]

BIBLIOGRAPHIC LIST

1. **Buche, E.** 2021. *US2751697A - Snowplow - Google Patents*. [online] Patents.google.com. Available at:

Информация об авторах:

Алешков Денис Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техносферная и экологическая безопасность» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета, тел.: +7-904-324-34-41.

Aleshkov Denis Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technosphere and Environmental Safety in the Siberian State Automobile and Highway University, phone: +7-904-324-34-41.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.12.2021; одобрена после рецензирования 29.12.2021; принята к публикации 18.02.2022. Рецензент – Рассоха В.И., доктор технических наук, доцент, декан Транспортного факультета Оренбургского государственного университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 10.12.2021; approved after review on 29.12.2021; accepted for publication on 18.02.2022. The reviewer is Rossokha V.I., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Transport Department at Orenburg State University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.

- Dostupno na:
<https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:198563>.
13. Zhao L., Yu Z., Zhu F., Qi X., Zhao S. CFD-DEM modeling of snowdrifts on stepped at roofs. *Wind and Structures*. 2016;23(6):523542.
 14. Balevičius R., Mróz Z. A finite sliding model of two identical spheres under displacement and force control. *Part I: Static analysis. Acta Mechanica*. 2013;224:1659-1684. DOI: 10.1007/s00707-013-0839-9.
 15. Aleshkov D.S. Urusova N.Yu. The influence of kinematic characteristics of the feeder and the base machine of the cutter and rotary snowplow on chip separation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2012. No. 5(27). pp. 7-10.

<<https://patents.google.com/patent/US2751697?oq=us2751697a>> [Accessed 9 December 2021].

Суковин Михаил Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техносферная и экологическая безопасность» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета, тел.: +7-913-324-34-41.

Sukovin Mikhail Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technosphere and Environmental Safety in the Siberian State Automobile and Highway University, phone: +7-913-324-34-41.