



МАШИНА ЖАСАУ
МАШИНОСТРОЕНИЕ
MECHANICAL ENGINEERING

DOI 10.51885/1561-4212_2023_1_175
MPHTI 55.55.31

Б.А. Молдаханов¹, М.В. Дудкин¹, Е.Л. Дудкина¹, В.В. Роговский¹, М. Mlynczak²

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,

г. Усть-Каменогорск, Казахстан

E-mail: bek_m78@mail.ru*

E-mail: doudkin@mail.ru,

E-mail: vas_dud@mail.ru,

E-mail: gerat1302@mail.ru,

²Вроцлавский университет науки и технологии, г. Вроцлав, Польша

E-mail: marek.mlynczak@pwr.edu.pl

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ
СНЕЖНОЙ МАССЫ ОТ ВИНТОВОГО ПИТАТЕЛЯ В МЕТАТЕЛЬ
ФРЕЗЕРНО-РОТОРНОГО СНЕГООЧИСТИТЕЛЯ**

**ҚАР МАССАСЫН БҰРАНДАЛЫ ҚОРЕКТЕНДІРГІШТЕН ФРЕЗЕРЛІК-РОТОРЛЫ
ҚАР ТАЗАЛАҒЫШ ЛАҚТЫРҒЫШЫНА ЖЫЛЖЫТУ ПРОЦЕСІН ТЕОРИЯЛЫҚ ЗЕРТТЕУ**

**THEORETICAL STUDY OF THE PROCESS OF MOVING SNOW MASS FROM A SCREW
FEEDER TO A THROWER OF A MILLING-ROTARY SNOWPLOW**

Аннотация. В статье на основе анализа рабочего процесса фрезерно-роторного снегоочистителя (ФРС) определены оптимальные условия транспортировки снега от винтовой лопасти питателя в метательный аппарат, позволяющие минимизировать энергоемкость процесса разгона снега метательным аппаратом. Установлено, что при определении величины тягового сопротивления и оценке технической производительности фрезерно-роторного снегоочистителя необходимо учитывать толщину разрабатываемого снежного покрова и увеличение высоты снежного забоя вследствие выброса вперед снега винтовым питателем ФРС.

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP09260192 «Разработка инновационного фрезерно-роторного снегоочистительного рабочего оборудования с повышенной эффективностью работы»)

Ключевые слова: снежная масса, лопастной метатель, винтовой привод, трение снега, выброс снега, призма волочения.

Аңдатпа. Мақалада, фрезерлік-роторлы қар тазалағыштың (ФРҚ) жұмыс процесін талдау негізінде қарды бұрандалы фидер қалақшасынан лақтырғышқа дейін тасымалдаудың оңтайлы шарттары анықталады, бұл қардың энергия сыйымдылығын барынша азайтуға мүмкіндік береді. лақтырушының тарату процесі. Сондай-ақ, тартылыс кедергісінің мәнін анықтау және фрезерлік-роторлы қар тазалағыштың техникалық көрсеткіштерін бағалау кезінде игерілген қар жамылғысының қалыңдығын және қар жамылғысының биіктігінің ұлғаюын ескеру қажет екендігі анықталды. FRS бұрандалы қоректендіргіш арқылы қарды алға шығаруға.

Зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті (грант № AP09260192 «Жұмыс тиімділігі жоғары, инновациялық фрезерлі-роторлы қар тазалағыш

жұмыс жабдығын әзірлеу») қаржыландырады.

Түйін сөздер: қар массасы, қалақ лақтырғыш, бұрандалы жетек, қардың үйкеліс күші, қарды лақтыру, сүйреу призмасы.

Abstract. In the article, based on the analysis of the workflow of a milling-rotor snowplow (FRS), the optimal conditions for transporting snow from the screw feeder blade to the thrower are determined, which make it possible to minimize the energy intensity of the snow dispersal process by the thrower. It was also found that when determining the value of traction resistance and evaluating the technical performance of a milling-rotor snowplow, it is necessary to take into account the thickness of the developed snow cover and the increase in the height of the snow face due to the forward ejection of snow by the FRS screw feeder.

«This research has been/was/is funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP09260192 Development of innovative milling-rotary snow-clearing working equipment with increased efficiency»).

Keywords: snow mass, paddle thrower, screw drive, snow friction, snow ejection, drag prism.

Введение. Оценка перемещения снежной массы от винтового питателя в метательный аппарат ФРС важна с точки зрения энергозатрат рабочего процесса ФРС в целом, так как затраты мощности на работу ротора-метателя составляют в общем мощностном балансе машины до 80 % и существенно зависят от пространственных геометрических координат потока снега, поступающего с винтовой лопасти фрезерного питателя в метательный аппарат [1, 2].

Снег, находящийся на лопастях ротора-метателя, совершает сложное движение, одновременно перемещаясь вдоль лопасти и вращаясь вместе с ней. Чем выше относительная скорость снега вдоль лопасти, тем упорядоченнее сход снега с лопасти, при этом основная порция снега сходит с лопасти в момент прохождения начала выбросного патрубка, а абсолютная скорость снега равна окружной скорости ротора и направлена перпендикулярно радиусу [3, 6]. Таким образом, снег выбрасывается ротором метателя в патрубок по касательной к окружности вращения ротора, при этом работа на отбрасывание снега должна быть минимальна.

Для выполнения этого условия необходимо подавать снег от питателя в ротор-метатель таким образом, чтобы не происходил удар снега о лопасть в направлении, перпендикулярном плоскости вращения ротора, так как в этом случае снег образует в центре ротора призму, препятствующую нормальному режиму относительного перемещения снега вдоль лопасти, либо вызывает ухудшение захватывающей способности снега ротором, что ведет к возврату снежной массы на питатель и образованию зоны циркуляционного перемешивания снега между питателем и метательным аппаратом. Это приведет к резкому росту тягового сопротивления, соответствующему снижению производительности фрезерно-роторного снегоочистителя и непроизводительным затратам энергии ротора на осуществление рабочего процесса. Увеличение мощностных затрат на перемалывание накопленной фрезерным питателем снежной призмы на каждой лопасти ротора метательного аппарата до момента подхода к началу выбросного патрубка способствует повышению затрат энергии на транспортирование снежной массы по внутренней поверхности кожуха ротора. Преждевременное (до момента подхода к началу выбросного окна патрубка) накопление максимальной снежной массы на лопасти является причиной повышенных затрат энергии ротором-метателем на транспортирование «снежной массы по внутренней поверхности кожуха метательного аппарата. Известно [4, 7], что основная масса снега поступает с питателя в зону работы ротора-метателя не по всему поперечному сечению приемного окна метателя, а образуется зона наибольшей насыщенности, где накапливается до 70 % отбрасываемой снежной массы.

Материал и методы исследования. Рассмотрим схему процесса транспортировки снега

лопастным ротором метательного аппарата снегоочистителя (рис. 1). Можно сделать следующие допущения:

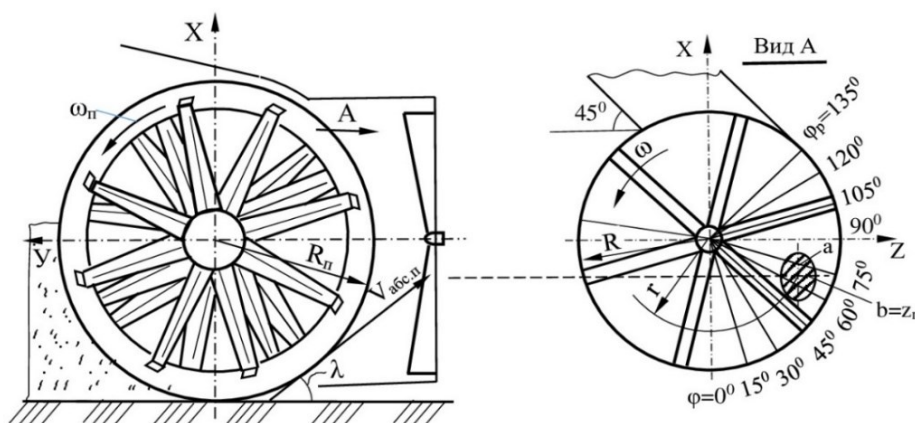


Рисунок 1. Схема процесса транспортировки снега лопастным ротором метательного аппарата снегоочистителя

– движение снега по лопасти рассматривается как перемещение материальной точки, соответствующей центру масс призмы, без учета ее геометрических размеров и конфигурации;

– вбрасывание снега винтовыми лопастями фрезерного питателя в вертикальную плоскость вращения ротора происходит непрерывным потоком под углом к этой плоскости в вертикальном направлении и перпендикулярно к ней в горизонтальном направлении. Указанный угол определяется параметрами и режимом работы фрезерного питателя, а также физико-механическими характеристиками снега;

– скорость снежного потока, вбрасываемого винтовым питателем в метательный аппарат, постоянна по всему поперечному сечению этого потока.

Так как расстояние между плоскостями вращения фрезерного питателя и метательного аппарата составляет не более 0,3...0,4 м, то можно принять, что поперечное сечение потока снега, вбрасываемого винтовыми лопастями фрезерного питателя в ротор-метатель, близко к эллипсу с большой осью, вытянутой вдоль оси ординат. Следует отметить, что переформирование эллиптического поперечного сечения потока материала, поступающего в метательный аппарат, в призму волочения треугольного сечения перед лопастью не сказывается существенным образом на времени перемещения материала вдоль лопасти. Это время в основном определяется расстоянием между центрами масс эллиптического сечения потока снега и треугольного сечения призмы снега перед лопастью в радиальной плоскости вращения ротора, а также средней скоростью перемещения снега вдоль лопасти.

Для определения полуосей эллипса воспользуемся графической схемой (рис. 2), где r_n – радиус пятна контакта потока снега с вертикальной плоскостью вращения ротора; a – большая полуось эллипса; b – малая полуось эллипса, $b = r_n$; λ – угол наклона к горизонту потока снега, поступающего от винтового питателя в метательный аппарат; ψ – угол при вершине конуса, характеризующего поток снега.

$$\begin{aligned} 2a &= r_n \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \lambda\right) + r_n \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \lambda\right) \cdot \operatorname{tg}\left(\lambda + \frac{\psi}{2}\right) + \\ &+ r_n \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \lambda\right) + r_n \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \lambda\right) \cdot \operatorname{tg}\left(\lambda - \frac{\psi}{2}\right) = \\ &= 2r_n \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \lambda\right) + r_n \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \lambda\right) \left[\operatorname{tg}\left(\lambda + \frac{\psi}{2}\right) + \operatorname{tg}\left(\lambda - \frac{\psi}{2}\right)\right] \end{aligned} \quad (1)$$

После ряда преобразований

$$2a = \frac{2r_n}{\cos\lambda \cdot (1 - \operatorname{tg}^2\lambda \cdot \operatorname{tg}^2\frac{\psi}{2})}. \quad (2)$$

Как уже отмечалось, поскольку расстояние между плоскостями вращения фрезерного питателя и метательного аппарата незначительно, можно считать, что поток снега не расширяется, то есть угол $\psi \rightarrow 0$, и эллипс превращается в овал, тогда, согласно формуле (2), большая полуось

$$a = \frac{r_n}{\cos\lambda}. \quad (3)$$

Радиус пятна вбрасывания снега в метатель можно определить через производительность винтового питателя:

$$r_n = \sqrt{\frac{P_r \cdot K_p}{V_{a.n.} \cdot \gamma \cdot \pi}}, \text{ м.} \quad (4)$$

где P_r – техническая (секундная) производительность винтового питателя, кг/с; $V_{a.n.}$ – абсолютная скорость снежного потока, отбрасываемого винтовым питателем, м/с; K_p – коэффициент разрежения, учитывающий рассредоточение снежной массы относительно центра пятна контакта, $K_p = 1,1 \dots 1,25$; γ – плотность снега, кг/м³.

Площадь пятна вбрасывания определяется следующим образом:

$$F = \pi \cdot a \cdot b, \text{ м}^2. \quad (5)$$

С целью определения рациональной зоны вбрасывания потока снега винтовой лопастью питателя в метательный аппарат оценим мощностные затраты на рабочий процесс ротора-метателя. Будем рассматривать метательный аппарат с радикально установленными лопастями при длине лопасти, равной радиусу вращения ротора. Расход энергии ротором можно представить суммой затрачиваемых энергий на различные виды работ [4, 8, 11].

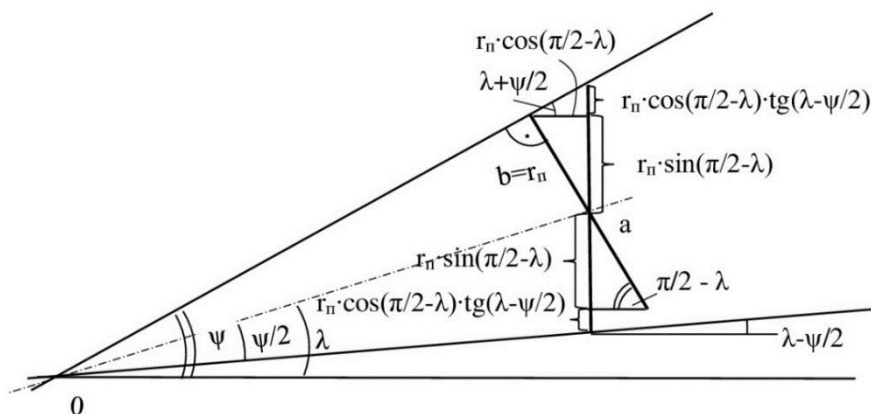


Рисунок 2. Схема определения площади поперечного сечения потока снега, вбрасываемого винтовым питателем в метательный аппарат снегоочистителя

Работа A_1 , затрачиваемая на сообщение кинетической энергии потоку снега, поступающему в ротор, складывается из работы A'_1 , затрачиваемой на сообщение снегу скорости лопасти, и работы A''_1 , затрачиваемой на сообщение снегу относительной скорости вдоль лопасти:

$$A_1 = A'_1 + A''_1 = \frac{Wk\gamma}{2g(V_{\Pi}^2 + V_{o,cp}^2)}, \text{ Нм}, \quad (6)$$

где: W – объем ротора шириной B и радиусом R , $W = \pi R^2 B$;

K – коэффициент заполнения ротора, $k=0,7 \dots 0,8$;

V_{Π} – переносная скорость снега, находящегося в роторе, $V_{\Pi} = \omega R$;

$V_{o,cp}$ – средняя относительная скорость снега, находящегося в роторе.

Из работы [3, 4] следует, что

$$V_{o,cp} = \frac{R \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \omega}{2(k_1 + k_2)} (e^{\omega k_1 t} - e^{\omega k_2 t}), \text{ м/с}, \quad (7)$$

где $k_1 = \sqrt{f_1^2 + 1} - f_1$; $k_2 = \sqrt{f_1^2 + 1} + f_1$; f_1 – коэффициент внешнего трения, $f_1 = 0,085$.

Для более точного расчета $V_{o,cp}$ следует учитывать скорость вбрасывания снежной массы винтовыми лопастями фрезерного питателя в ротор-метатель, так как в зависимости от направления и проекции вектора абсолютной скорости снежного потока на лопасть метателя рассмотренные выше составляющие работы будут либо уменьшаться, либо увеличиваться.

Абсолютная скорость снежного потока, отбрасываемого винтовым питателем, определяется по известной формуле:

$$V_{a,\Pi} = \sqrt{V_p^2 + V_{o,cp}^2} = \omega_{\Pi} R_{\Pi} \sqrt{1 + tg^2 \alpha}, \text{ м/с}, \quad (8)$$

где ω_{Π} – угловая скорость питателя, c^{-1} ; R_{Π} – радиус питателя, м; α – угол подъема винтовой ленты питателя.

Тогда проекцию скорости $V_{a,\Pi}$ на лопасть метательного аппарата можно представить следующим образом:

$$V_{a,\Pi}^n = \omega_{\Pi} \cdot R_{\Pi} \cdot \sqrt{1 + tg^2 \alpha} \cdot \sin \lambda \cdot \cos \varphi, \text{ м/с}. \quad (9)$$

Работа A_2 сил трения снега, находящегося в роторе, о неподвижный кожух

$$A_2 = \frac{Wk\gamma}{g} \omega^2 l^2 f_1 \left[2\pi - \varphi_p - \left(\varphi + \frac{\omega \cdot l}{V_{o,cp}} \right) \right], \quad (10)$$

где: l – путь, проходимый точкой, характеризующей центр масс пятна вбрасывания, по лопасти ротора, $l=R-r$, м;

r – радиальная координата точки, характеризующей центр масс пятна вбрасывания, м;

φ – угол поворота лопасти ротора-метателя, отсчитываемый от оси абсцисс (рис. 1);

φ_p – угол, характеризующий начало разгрузки лопастей.

Исходя из условия максимальной дальности отбрасывания снега метательным аппаратом, выбросной патрубок должен быть расположен относительно горизонта под углом 45° , при этом значение $\varphi_p = 135^\circ$.

Работа A_3 сил трения снега о лопасти ротора

$$A_3 = \frac{Wk\gamma}{2g} \cdot l \cdot f_1 \cdot \omega \cdot V_{o,cp}, \text{ Нм.} \quad (11)$$

Работой сил резания входящего в ротор потока снега лопастями и работой, затрачиваемой на подъем снега в метателе до выбросного патрубка, пренебрегаем, вследствие их малой величины в общем энергетическом балансе [4, 11].

Для возможности комплексной оценки энергозатрат на рабочий процесс метательного аппарата целесообразно использовать величину удельной работы, эквивалентной импульсу силы, который передает метательный аппарат потоку снега:

$$A_{уд} = \frac{A_{\Sigma}}{V_{a,p}}, \text{ Нс,} \quad (12)$$

где A_{Σ} – суммарная работа метательного аппарата, Нм; $V_{a,p}$ – абсолютная скорость выброса снега метательным аппаратом, м/с.

$$A_{уд} = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{\sqrt{V_{o,cp}^2 + (\omega \cdot R)^2}}, \text{ Нс.} \quad (13)$$

Результаты и их обсуждение. Для оценки составляющих A_1 , A_2 и A_3 плоскость вращения ротора-метателя, представленная в виде круга (рис. 1), разделялась на сегменты по 150 (за начало отсчета принята ось ординат), длина лопасти разделялась на равные участки по 0,1 м, тригонометрическая функция угла λ в формуле (9) для каждой точки, характеризующей на плоскости вращения ротора координатами r и φ , определялась графическим путем (рис. 1). На рис. 3, 4 и 5 приведены графики, выражающие зависимости $A_1 = f\left(\frac{r}{R}\right)$; $A_2 = f\left(\frac{r}{R}\right)$; $A_3 = f\left(\frac{r}{R}\right)$ для конкретных параметров снегоочистителя производительностью 1100...1200 т/ч: $\omega_n = 12,56 \text{ с}^{-1}$; $R_n = 0,64 \text{ м}$; $\alpha = 28^\circ$; $\omega = 33,4 \text{ с}^{-1}$; $R = 0,6 \text{ м}$.

Анализ графика, представленного на рис. 3, показывает, что работа, затрачиваемая на сообщение кинетической энергии потоку снега, поступающему в ротор-метатель, падает с уменьшением параметра r/R , вследствие уменьшения пути, проходимого центром масс пятна вбрасывания вдоль лопасти.

С увеличением угла φ наблюдается рост работы A_1 , затрачиваемой на сообщение кинетической энергии потоку снега. Причем уменьшение работы A_1 с уменьшением угла φ неоднозначно. При $0^\circ < \varphi < 90^\circ$ величина A_1 увеличивается менее интенсивно, так как вектор скорости $V_{a,п}^n$ не совпадает с направлением вектора скорости $V_{o,cp}$, а при $\varphi > 90^\circ$ векторы этих скоростей совпадают, т.е. скорости $V_{o,cp}$ и $V_{a,п}^n$ суммируются, что вызывает быстрый рост

величины A_1 . Следует отметить, что чем меньше величина r/R , тем значительнее разница работы A_1 при $00 < \varphi < 900$ по сравнению с работой A_1 при $\varphi \geq 900$.

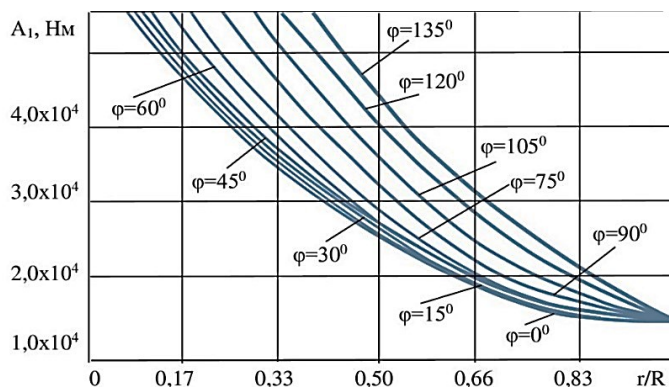


Рисунок 3. Изменение работы A_1 на сообщение кинетической энергии потоку снега от координат точки вбрасывания снежного потока в метательный аппарат

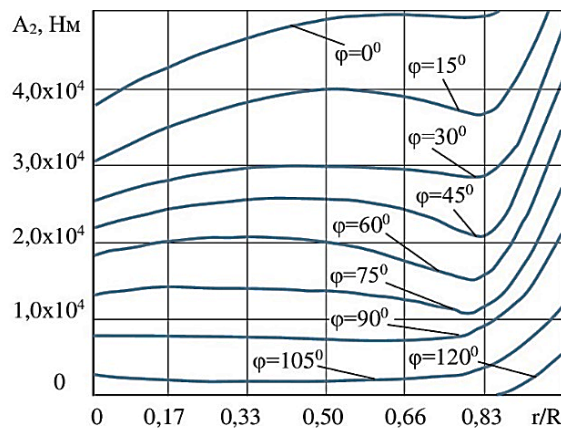


Рисунок 4. Изменение работы A_2 сил трения снега о кожух ротора от координат точки вбрасывания снежного потока в метательный аппарат

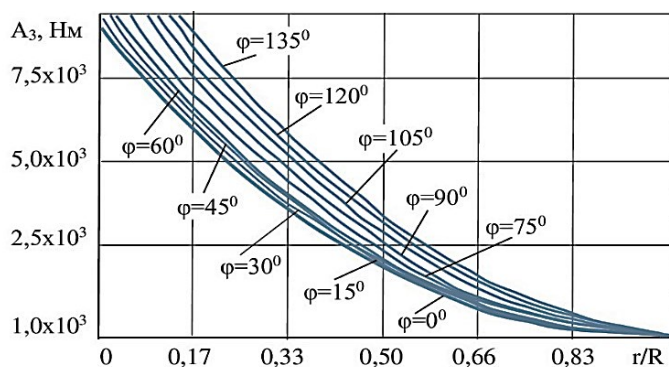


Рисунок 5. Изменение работы A_3 сил трения о лопасть ротора от координат точки

вбрасывания снежного потока в метательный аппарат

Аналогичные выводы можно сделать при анализе графика зависимости работы A_3 сил трения снега о лопасти ротора в функции параметра r/R (рис. 5), где также наблюдается рост величины A_3 с уменьшением величины r/R .

Из анализа изменения работы A_2 сил трения снега, находящегося в роторе, о неподвижный кожух при различных значениях r/R и φ , следует, что чем меньше путь, проходимый частицей снега по лопасти, т.е. чем меньше φ , тем выше величина A_2 , при этом наблюдается некоторая волнообразность изменения A_2 при изменении параметра r/R в диапазоне $00 < \varphi < 900$, что, в зависимости от φ , в большей или меньшей степени вызвано изменением величины скорости $V_{a.п}$ по отношению к величине скорости $V_{o.ср}$. Затраты работы A_2 при $r/R=0,83$ резко возрастают по причине практического отсутствия пути, проходимого частицей снега по лопасти метательного аппарата.

На рис. 6 и 7 представлены зависимости удельной работы на совершенствование рабочего процесса метательного аппарата в функции изменения соответственно параметров r/R и φ .

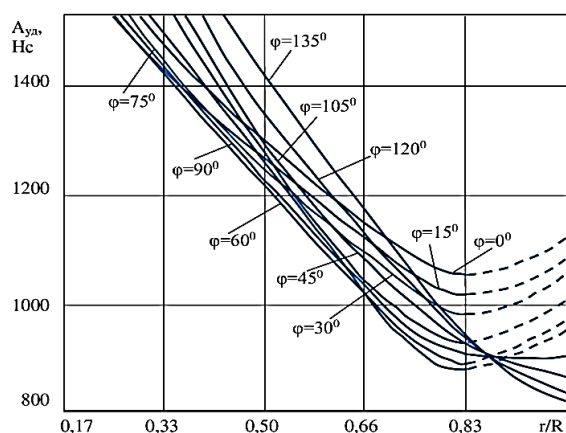


Рисунок 6. Изменение удельной работы $A_{уд}$ от радиальной координаты r/R точки вбрасывания снежного потока в метательный аппарат

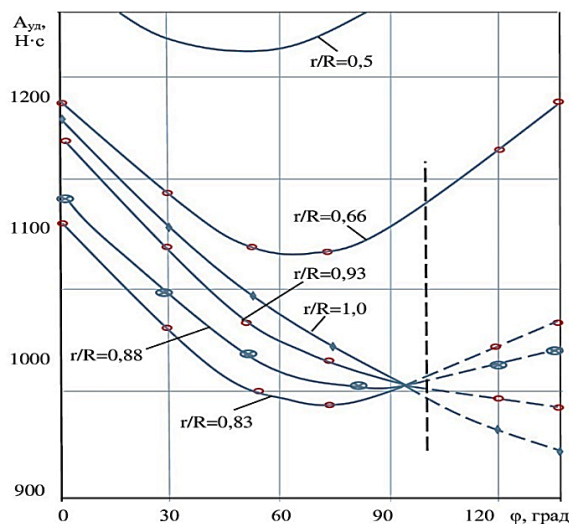


Рисунок 7. Изменение удельной работы $A_{уд}$ от угловой координаты φ точки

вбрасывания снежного потока в метательный аппарат

Данные графики позволяют выявить рациональную зону вбрасывания снега в метательный аппарат, которой соответствуют координаты $r/R = 0,78...0,83$, $\varphi = 650...750$. Невыгодно рассматривать оптимизацию при $\varphi > 750$ и $r/R > 0,83$ с точки зрения условия разгрузки, так как величина скорости $V_{o,cp}$ при этом такова, что лопасть метательного аппарата не успевает разгрузиться от снега в процессе прохождения мимо выбросного патрубка. Кроме этого, угол вбрасывания снега винтовой лопастью питателя в ротор имеет ограничение не только по центральному углу окна между питателем и метателем, но и по условию максимального угла выброса. Этот максимальный угол выброса материала ограничен максимальной высотой относительно дороги точки попадания снега в метательный аппарат, т.е. координаты центра масс овального сечения потока снега, площадь которого определяется по формуле (5). Другими словами, пятно вбрасывания, образуемое снежным потоком при движении от винтового питателя в метательный аппарат, не должно выходить за пределы ротора-метателя, иначе согласованная работа питателя и метательного аппарата нарушается, что ведет к непроизводительным энергетическим затратам на рабочий процесс фрезерно-роторного снегоочистителя.

Сравнительная оценка удельной работы $A_{уд}^{opt}$ при оптимизации полярных координат r/R и φ и удельной работы $A_{уд}^{trad}$ при координатах, характеризующих традиционную зону вбрасывания снежного потока от винтового питателя в метательный аппарат ($r/R \sim 0,17...0,25$; $\varphi \sim 00...100$), показывает, что $A_{уд}^{opt}$ меньше $A_{уд}^{trad}$ на 25...30 %. Следует отметить, что экспериментальная проверка данных положений не производилась в связи с тем, что рабочий процесс метателя хорошо изучен и адекватность используемых теоретических положений проверена экспериментально другими исследователями [4, 5, 9], т.е. разработанный метод оптимизации действует в заранее определенных корректных условиях.

Заключение:

1. На основе анализа рабочего процесса фрезерно-роторного снегоочистителя определены оптимальные условия транспортировки снега от винтовой лопасти питателя в метательный аппарат, позволяющие минимизировать выброс снега фрезой вперед с образованием призмы волочения, а также энергоемкость процесса разгона снега метательным аппаратом.

2. На примере фрезерно-роторного снегоочистителя производительностью 1100...1200 т/ч выявлена рациональная зона вбрасывания снега в метательный аппарат, которой соответствуют полярные координаты $r/R = 0,78...0,83$, $\varphi = 650...750$. Удельная работа для оптимальных значений полярных координат r/R и φ меньше на 25...30 % удельной работы при координатах, характеризующих традиционную зону вбрасывания снежного потока в метательный аппарат, которая выбирается на серийных снегоочистителях чисто из конструктивных соображений.

Список литературы

1. M. Doudkin, A. Kim, B. Moldakhanov, G. Kustarev, N. Andryukhov, V. Rogovsky, Y. Doudkina. Experimental Studies of the Physical Model of the Milling-Rotary Snow Cleaner // International Review of Mechanical Engineering. – 2021. – Vol. 15. – N. 9. – P. 453-463. – <https://doi.org/10.15866/ireme.v15i9.20952>.
2. M. Doudkin, A. Kim, B. Moldakhanov. Determination of Forces in the Working Unit of the Milling-Rotary Snow Cleaner // International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.). – 2021. – Vol. 15. – No. 2. – P. 96-105. – <https://doi.org/10.15866/ireme.v15i2.20859>
3. Bekbolat Moldakhanov, Mikhail Doudkin, Alina Kim, Valery Rogovsky, Nikita Andryukhov. Experimental study of the snow removal process by helical blade of the milling feeder // Journal of Applied

- Engineering Science. – 2022. – Vol. – 20. – No. 4.
4. Алешков Д.С. Повышение эффективности фрезерно-роторного снегоочистителя путем совершенствования его конструкции: дис. ... канд. техн. наук, 05.05.04, СибАДИ. – Омск, 2001. – 204 с.
 5. J. Gaume, G. Chambon, I. Reiweger, A.v. Herwijnen, J. Schweizer. On the failure criterion of weak-snow layers using the discrete element method. Proceedings // International Snow Science Workshop, Banff, – Canada, 2014. – P. 681- 688. – 10.1109/ICVRIS.2018.00106.
 6. Иванов А.Н., Востокова Е.А., Пономарева Р.Л. Новый ГОСТ на роторные снегоочистители // Строительные и дорожные машины. – 1982. – № 11.
 7. Абрамов Л.Н. Экспериментальные исследования эффективности фрезерного питателя снегоочистителя // Труды МАДИ. – М., 1985. – С. 88-94.
 8. Шалман Д.А. Снегоочистители. – Л.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
 9. Иванов А.Н., Мишин В.А. Снегоочистители отбрасывающего действия. – М.: Машиностроение, 1981. – 159 с.
 10. Yosida Z 1980 Theoretical studies on motion of snow kicked up by a snowplow Low Temp Sci Ser A 35 47-65.
 11. Voitkovskiy K F Golubev V N Lapteva N I Troshkina Ye S Ushakova L A and Pavlov A V 1975 Mass transfer and metamorphism in snow cover International Association of Hydrological Sciences Publication 114 (Symposium at Grindelwald 1971 – snow Mechanics) 16–24.
 12. Иванов А.Н., Мишин В.А. Снегоочистители отбрасывающего действия. – М.: Машиностроение, 1981. – 159 с.
 13. Дудкин М.В., Ким А.И., Млўńczak М., Дудкина Е.Л., Молдаханов Б.А., Аукунова Б.К. Вероятностная оценка снежного фона эксплуатации снегоочистительных машин на территории Республики Казахстан // Вестник ВКТУ им. Д. Серикбаева. – № 4, 2020. – С. 100-105.
 14. Aleshkov, D.S., Urusova N.Yu., Vliyanie osnovnykh parametrov frezerno-rotornogo snegoochistitelya na vyrezaemyj ob'em snezhnoj struzhki [Influence of base parameters of milling and rotary snowblower on the cut out volume of a snow chip] // Vestnik SibADI. – 2013. – No. 5 (33). – P. 10-14.
 15. Prusov A.U., Mavrin I.U. Statisticheskij analiz malogabaritnoj kommunal'noj snegouborochnoj tekhniki [Statistical Analysis of small-size municipal snow-removing technics] // Modernizaciya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse. – 2014. – V. 1. – P. 180-183.
 16. Егоров А.Л., Федотов В.В., Федотова Е.А. Обоснование рабочих параметров снегоуборочной машины с уплотняющим рабочим органом // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 1. – С. 103.

References

1. M. Doudkin, A. Kim, B. Moldakhanov, G. Kustarev, N. Andryukhov, V. Rogovsky, Y. Doudkina. Experimental Studies of the Physical Model of the Milling-Rotary Snow Cleaner // International Review of Mechanical Engineering. – 2021. – Vol. 15. – N. 9. – P. 453-463. – <https://doi.org/10.15866/ireme.v15i9.20952>.
2. M. Doudkin, A. Kim, B. Moldakhanov. Determination of Forces in the Working Unit of the Milling-Rotary Snow Cleaner // International Review of Mechanical Engineering (I.RE.M.E.). – 2021. – Vol. 15. – No. 2. – P. 96-105. – <https://doi.org/10.15866/ireme.v15i2.20859>.
3. Bekbolat Moldakhanov, Mikhail Doudkin, Alina Kim, Valery Rogovsky, Nikita Andryukhov. Experimental study of the snow removal process by helical blade of the milling feeder // Journal of Applied Engineering Science. – 2022. – Vol. 20. – No. 4.
4. Aleshkov D.S. Povyshenie effektivnosti frezerno-rotornogo snegoochistitelya putem sovershenstvovaniya ego konstrukcii: dis. ... kand. tekhn. nauk, 05.05.04, SibADI. – Омск, 2001. – 204 с.
5. J. Gaume, G. Chambon, I. Reiweger, A.v. Herwijnen, J. Schweizer. On the failure criterion of weak-snow layers using the discrete element method. Proceedings, International Snow Science Workshop, Banff, – Canada, 2014. – P. 681- 688. – 10.1109/ICVRIS.2018.00106.
6. Ivanov A.N., Vostokova E.A., Ponomareva R.L. Novyj GOST na rotornye snegoochistiteli // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. – 1982. – № 11.
7. Abramov L.N. Eksperimental'nye issledovaniya effektivnosti frezernogo pitatelya snegoochistitelya // Trudy MADI. – М., 1985. – С. 88-94.
8. SHalman D.A. Snegoochistiteli. – Л.: Mashinostroenie, 1973. – 216 s.
9. Ivanov A.N., Mishin V.A. Snegoochistiteli otrasyvayushchego dejstviya. – М.: Mashinostroenie, 1981. – 159 s.
10. Yosida Z 1980 Theoretical studies on motion of snow kicked up by a snowplow Low Temp Sci Ser A

- 35 47–65.
11. Voitkovskiy K F Golubev V N Lapteva N I Troshkina Ye S Ushakova L A and Pavlov A V 1975 Mass transfer and metamorphism in snow cover International Association of Hydrological Sciences Publication 114 (Symposium at Grindelwald 1971 – snow Mechanics) 16-24.
 12. Ivanov A.N., Mishin V.A. Snegochistiteli otrasyvayushchego dejstviya. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 159 s.
 13. Dudkin M.V., Kim A.I., Młyńczak M., Dudkina E.L., Moldahanov B.A., Aukenova B.K. Veroyatnostnaya ocenka snezhnogo fona eksploatacii snegochistitel'nyh mashin na territorii Respubliki Kazahstan // Vestnik VKTU im. D. Serikbaeva. –2020. – № 4. – S. 100-105.
 14. Aleshkov, D.S., Urusova N.Yu., Vliyanie osnovnyh parametrov frezerno-rotornogo snegochistitelya na vyrezaemyj ob'em snezhnoj struzhki [Influence of base parameters of milling and rotary snowblower on the cut out volume of a snow chip] // Vestnik SibADI. – 2013. – no. 5 (33). – Pp. 10-14.
 15. Prusov A.U., Mavrin I.U. Statisticheskij analiz malogabaritnoj kommunal'noj snegouborochnoj tekhniki [Statistical Analysis of small-size municipal snow-removing technics] // Modernizaciya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse. – 2014. – V. 1. – P. 180-183.
 16. Egorov A.L., Fedotov V.V., Fedotova E.A. Obosnovanie rabochih parametrov snegouborochnoj mashiny s uplotnyayushchim rabochim organom // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2013. – №1. – S. 103.