

Определение усилий на рабочем органе фрезерно-роторного снегоочистителя

¹ДУДКИН Михаил Васильевич, д.т.н., профессор, vas_dud@mail.ru,

^{1*}КИМ Алина Игоревна, PhD, ассоциированный профессор, alinakim3107@mail.ru,

¹МОЛДАХАНОВ Бекболат Аскерханович, докторант, bek_m78@mail.ru,

¹РОГОВСКИЙ Валерий Владимирович, старший преподаватель, gerat1302@mail.ru,

¹Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Казахстан, Усть-Каменогорск, ул. А.К. Протозанова, 69,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Цель работы – существенно увеличить эффективность работы фрезерно-роторного снегоочистителя и его производительность, не увеличивая энергозатрат на процесс работы (т.е. мощности), что позволит выполнить работы по расчистке снежных завалов меньшим количеством машин либо за существенно меньшее время. Установлено, что при работе фрезерно-роторного снегоочистителя возникает серьезная комплексная проблема, заключающаяся в том, что часть снега перебрасывается вперед винтовым питателем, образуя призму волочения, что повышает энергозатраты на разработку снега и на передвижение машины в снежном массиве и одновременно снижает производительность снегоочистителя. Устранение призмы волочения за счет применения интенсификатора, например, лопастного типа, позволит уменьшить энергозатраты на рабочее перемещение снегоочистителя. Таким образом, уменьшение энергоемкости разработки снега и повышение эффективности рабочего оборудования фрезерно-роторного снегоочистителя на основе интенсификации его рабочего процесса является в настоящее время наиболее перспективным направлением совершенствования машин этого типа. Исследование финансируется Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP09260192 «Разработка инновационного фрезерно-роторного снегоочистительного рабочего оборудования с повышенной эффективностью работы»).

Ключевые слова: снег, снежные завалы, фрезерно-роторные снегоочистители, призма волочения, винтовой питатель, лопастной интенсификатор.

Введение

Существует большое количество разнообразной техники для борьбы с СЛО (с плужными, фрезерными, щеточными и другими рабочими органами) [1-4], однако реально на рынке дорожной техники присутствует всего несколько решений, которые обеспечивают эффективную очистку СЛО, но они не всегда экономически выгодны.

Существующие фрезерно-роторные рабочие органы (рисунок 1) могут обеспечить разработку снежного покрова различной толщины при наименьших величинах тягового сопротивления и удельной энергоемкости. Однако и они без существенного увеличения энергозатрат (мощности) не могут обеспечить скоростную интенсивную уборку больших объемов снега.

В качестве объекта исследований рассмотрим наиболее применяемые фрезерно-роторные снегоочистители, используемые для разработки снега различной плотности, от рыхлого, плотностью 0,08-0,12 т/м³, до очень плотного 0,5-0,55 т/м³, при высоких рабочих скоростях, и на основании теоретического и экспериментального определения

их рациональных параметров и режимов работы, а также зависимостей показателей процесса взаимодействия элементов снегоочистительного оборудования с разрабатываемым материалом найдем конструктивные и эксплуатационные пути интенсификации их рабочего процесса.

Таким образом, совершенствование конструкции фрезерно-роторного рабочего органа снегоочистителя и его рабочего процесса с точки зрения повышения эффективности его работы, а именно интенсивности рабочего процесса, является актуальной задачей.

Актуальна данная проблема, кроме Казахстана, также для таких стран, как Россия, США, Канада (а также северный Китай, Финляндия и некоторые др.).

Аналитические исследования процесса взаимодействия снежкового питателя с разрабатываемой снежной массой

Схема механизма протекания процесса (ри-

сунок 3) разработки снега фрезерным питателем (рисунок 2) представляется следующим образом. Винтовой питатель совершает в снежном массиве высотой H_0 комбинированное движение, которое состоит из относительного движения фрезы и переносного движения машины. В процессе работы лопасть фрезы в относительном движении за один оборот вырезает из снежного массива стружку серповидного профиля, толщина которой в радиальном направлении равна h ($h = V_m \cdot 2\pi / \omega$), где V_m – рабочая скорость машины, м/с, при этом точка режущей кромки винтовой линии в абсолютном движении описывает циклоиду. Вырезаемый объем снега под действием центробежных сил формируется в призму волочения на винтовой ленте

фрезерного питателя, который транспортирует этот объем от периферии центральной части рабочего органа, а затем этот снег отбрасывается крайними лопастями фрезы в ротор-метатель. На поверхности лопасти фрезы образуется объем переменной массы, расчет которой будет произведен ниже. Согласно проведенному системному анализу работы снегоочистителя при оценке его рабочего процесса целесообразно рассматривать отдельные зоны взаимодействия винтового питателя со снегом, применяя при этом метод суперпозиции.

Расчетная схема для определения усилия и момента сопротивлений на фрезерном питателе снегоочистителя представлена на рисунке 3. На



Рисунок 1 – Роторный снегоочиститель Pronar

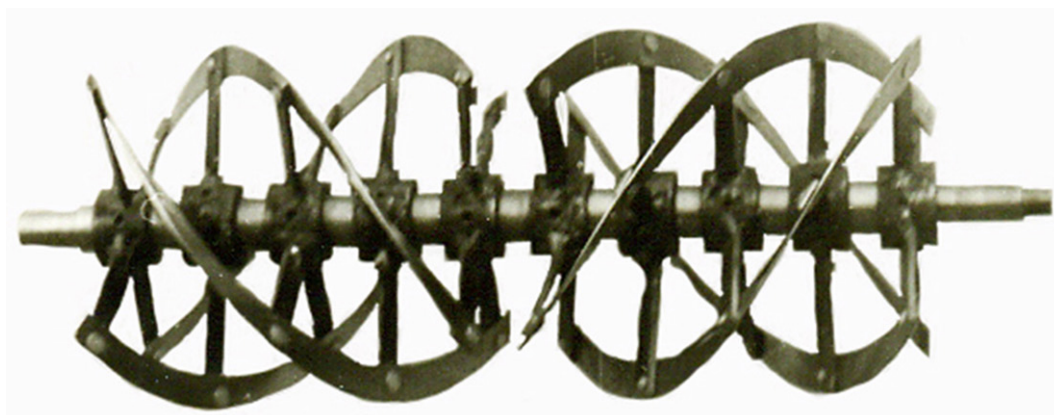


Рисунок 2 – Экспериментальная модель фрезерного питателя, разделенного на 2 полуфрезы, с углом подъема винтовой линии $\alpha = 28^\circ$

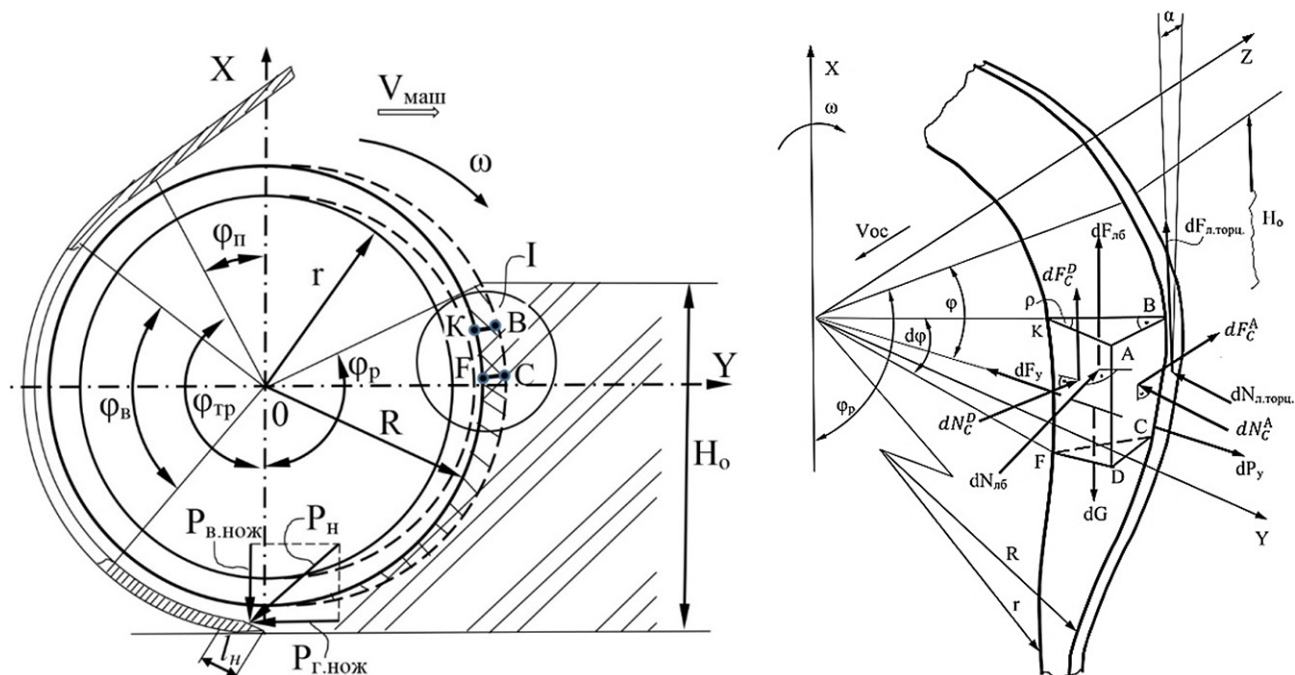


Рисунок 3 – Расчетная схема для определения усилия и момента сопротивлений на фрезерном питателе снегоочистителя

расчетной схеме представлен фрагмент винтовой линии питателя с элементарным объемом снега, находящимся на винтовой лопасти.

При составлении расчетной схемы были приняты следующие условные обозначения: α – угол винтовой линии; dN – нормаль к винтовой поверхности лопасти; x, y, z – оси центральной системы координат; dF_A – сила трения элементарного объема снега о винтовую лопасть; dF_C – сила трения элементарного объема снега о снежный массив; f_1 – коэффициент внешнего трения (трения снега о лопасть); f_2 – коэффициент внутреннего трения (трения снега о снег).

При исследовании процесса взаимодействия винтового питателя с разрабатываемым снежным массивом будем рассматривать следующие зоны, в совокупности характеризующие рабочий процесс в целом:

1 зона – зона взаимодействия питателя с массивом снега, или зона резания, характеризуется центральным углом φ_p , соответствующим высоте разрабатываемого снега;

II зона – зона транспортирования, характеризуется центральным углом $\varphi_{тр}$, соответствующим сектору, измеренному от вертикальной оси питателя до верхней точки кожуха рабочего органа (по направлению вращения питателя);

3 зона – зона выброса или загрузки винтового питателя, характеризуется центральным углом $\varphi_{в}$, соответствующим размеру приемного патрубка;

4 зона – зона перебрасывания снега винтовым питателем вперед на забой, характеризуется центральным углом $\varphi_{пв}$, соответствующим сектору, измеренному от верхней точки приемного патрубка

до вертикальной оси питателя, по направлению вращения последнего.

При определении составляющих горизонтального и вертикального усилий, возникающих в зоне резания, а также проекций вышеперечисленных сил на вертикальную и горизонтальную оси надо рассматривать два расчетных случая (рисунок 4).

Первый расчетный случай. Высота разрабатываемого снежного забоя больше или равна радиусу винтового питателя ($H_0 \geq R$).

Рассмотрим расчетную схему на рисунке 4 (а). Предположим, что высота снежного забоя равна H_0 , точка A – точка встречи частицы снега с рабочим органом. Тогда фиксированное значение угла поворота рабочего органа, измеренного от дневной поверхности (т. A) до горизонтальной оси (ось Y).

$$\beta = \arcsin \frac{H_0 - R}{R}. \quad (1)$$

Угол поворота φ_0 рабочего органа, измеренный от точки A до вертикальной оси (ось X) будет определяться

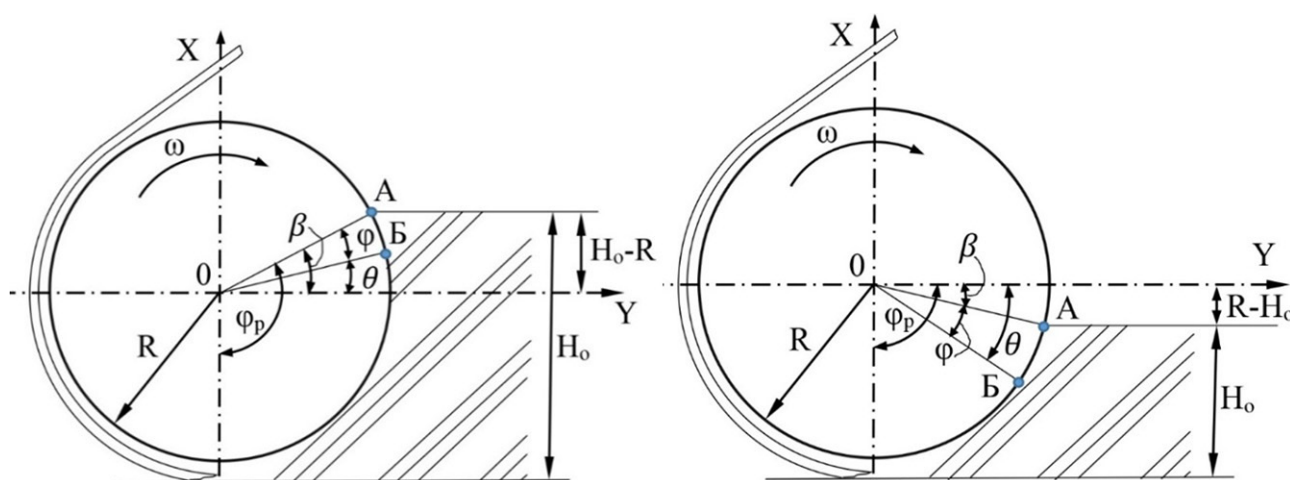
$$\varphi_0 = \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{H_0 - R}{R}. \quad (2)$$

Тогда текущее значение высоты разрабатываемого слоя снега

$$H = H_0 - R[1 + \sin(\beta - \varphi)]. \quad (3)$$

Соответственно текущее значение центрального угла φ , соответствующего текущей высоте H , считая от дневной поверхности

$$\varphi = \varphi_0 - \left(\frac{\pi}{2} + \theta \right), \quad (4)$$



а) 1-й расчетный случай; б) 2-й расчетный случай

Рисунок 4 – Схема определения составляющих P_r и P_b усилий на фрезерном питателе

где θ – угол от горизонтальной оси до текущего значения угла.

$$\theta = \arcsin \frac{H_0 - R - H}{R}. \quad (5)$$

Подставляя значение θ в предыдущее значение φ , получаем

$$\varphi = \varphi_0 - \left(\frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{H_0 - R - H}{R} \right). \quad (6)$$

Таким образом, полученные выражения позволяют определять значения исследуемых силовых параметров при рассмотрении рабочего процесса в зависимости от текущей высоты H разрабатываемого снега или центрального угла φ , соответствующего этой высоте.

Необходимо отметить, что при составлении математической модели рабочего процесса фрезерно-роторного снегоочистителя целесообразно рассматривать первый расчетный случай как наиболее энергоемкий, кроме этого, снегоочистители данного класса, к которым относится исследуемая машина, эффективнее использовать при разработке высоких снежных массивов, которые характерны для северных районов страны, где до сих пор применяются некогда очень распространенные и серийно выпускаемые фрезерно-роторные снегоочистители К-703МА-ОС-2.

В зоне взаимодействия питателя с массивом (1 зона) действуют следующие силы: а) сила трения, возникающая от трения торцевой кромки винтовой ленты о снежный массив $F_{л.торц}$ (другими словами – это сила резания); б) сила трения снега о боковые поверхности винтовой ленты фрезы $F_{л.бок}$; в) сила инерции – центробежная $P_{ц}$. Как указывалось выше, рабочий процесс снегоочистки включает совершение нескольких операций. При резании снега питателем происходит одновременно и транспортирование вырезанной массы винтовой фрезой вдоль питателя. В первой зоне транспор-

тирование этой массы осуществляется в массиве, в результате появляются сила трения призмы, сформированной на ленте фрезерного питателя, о массив разрабатываемого снега, являющаяся результатом действия центробежной силы и силы веса, а также появляется сила трения призмы волочения о снег в межвинтовом пространстве.

Оценим каждую из составляющих отдельно. Рассматриваем элементарный фрагмент снега, расположенный на винтовой лопасти фрезерного питателя, характеризуемый сектором с угловой координатой текущего угла φ .

Расчетная схема для определения усилия резания снега винтовой лентой фрезерного питателя представлена на рисунке 3.

Давление, действующее на торцевую поверхность ленты фрезы со стороны массива, определяется из зависимости

$$dN = \sigma \cdot b \cdot dl, \quad (7)$$

где σ – нормальное напряжение, кг/см²;

b – толщина ленты фрезы, м;

dl – длина элементарного участка винтовой лопасти.

$$dl = \frac{dH}{\cos \alpha}. \quad (8)$$

Элементарная сила трения торцевой поверхности витка о массив определяется по зависимости

$$dF_{л.торц} = dN \cdot f_1, \quad (9)$$

где f_1 – коэффициент внешнего трения.

Сила трения торцевой поверхности одной лопасти

$$F_{л.торц} = \int_0^{H_0} f_1 \sigma \cdot \frac{b}{\cos \alpha} dH = f_1 \sigma \frac{b}{\cos \alpha} H. \quad (10)$$

Тогда суммарная сила трения торцевой поверхности винтовой ленты фрезерного питателя о снежный массив будет определяться следующим образом:

$$F_{\text{л.торц } \Sigma} = F_{\text{л.торц}} \cdot K \cdot Z_i, \quad (11)$$

где K – количество полуфрез питателя;

Z_i – количество витков винтовой ленты фрезерного питателя, одновременно находящихся в забое.

Скорость движения частицы снега вдоль винтовой лопасти определяется как проекция ее абсолютной скорости движения на поверхность лопасти (рисунок 5)

$$V_{\text{лоп}} = V_a \cdot \sin(\theta - \alpha), \quad (12)$$

где θ – угол между направлением абсолютной и осевой скоростей

$$\theta = \arctg \frac{V_{\text{рад}}}{V_{\text{ос}}}, \quad (13)$$

где $V_{\text{ос}}$ – осевая скорость движения частицы снега; $V_{\text{рад}}$ – радиальная скорость движения частицы снега.

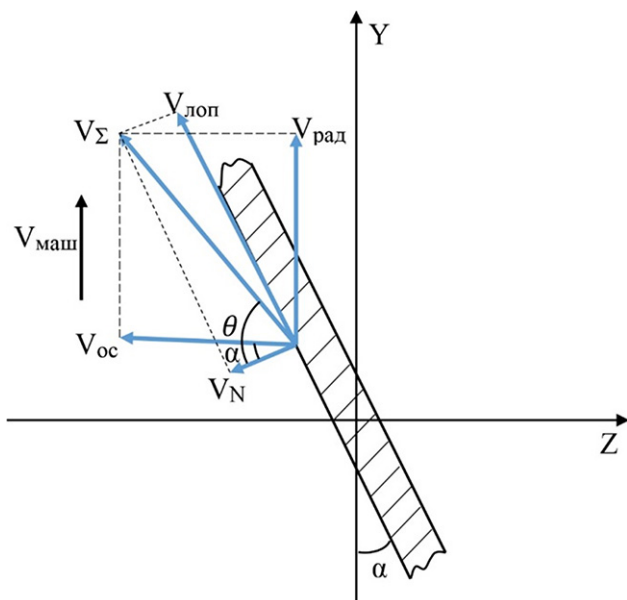


Рисунок 5 – Схема определения движения частицы снега вдоль винтовой лопасти

Абсолютная скорость движения частицы снега в зоне резания

$$V_a = \sqrt{V_{\text{рад}}^2 + V_{\text{ос}}^2} = \sqrt{(\omega R)^2 + (\omega R \operatorname{tg} \alpha)^2}. \quad (14)$$

Тогда с учетом (11) и (14)

$$V_{\text{лоп}} = \sqrt{(\omega R)^2 + (\omega R \operatorname{tg} \alpha)^2} \cdot \sin \left[\left(\arctg \frac{V_{\text{рад}}}{V_{\text{ос}}} \right) - \alpha \right]. \quad (15)$$

Масса элементарного объема призмы, транспортируемой винтовой лентой:

$$dm' = dV_{\text{пр}}' \cdot \gamma, \quad (16)$$

где γ – объемный вес снега.

Тогда масса снега, формируемая в процессе поворота лопасти:

$$m' = \int_0^{H_0} F_{\text{пр}} \cdot \frac{dH}{\cos \alpha} \gamma = \frac{F_{\text{пр}}}{\cos \alpha} H_0 \cdot \gamma. \quad (17)$$

С учетом (17) $N_{\text{л.бок}}$ будет определяться как

$$N_{\text{л.бок}} = \int_{X_1}^{X_2} \frac{F_{\text{пр}}}{\cos \alpha} dx \frac{\gamma}{g} R \omega^2 \cos \alpha f_2 - \frac{F_{\text{пр}} \gamma \sin(\beta - \varphi) f_2}{\cos \alpha} + \frac{F_{\text{пр}} R \omega^2 \sin \alpha \gamma}{\cos \alpha g} dx, \quad (18)$$

где X_1 и X_2 – пределы интегрирования для $dN_{\text{л.бок}}$; $X_1 = 0$; $X_2 = H_0$.

Подставляя вместо $\sin(\beta - \varphi)$ его значение (3.5), получаем

$$N_{\text{л.бок}} = \frac{F_{\text{пр}} H_0 \gamma R \omega^2}{g} (f_2 + \operatorname{tg} \alpha) - \frac{F_{\text{пр}} \gamma f_2}{\cos \alpha} \left(\frac{H_0^2 - 2H_0}{2R} \right). \quad (19)$$

Соответственно

$$F_{\text{л.бок}} = f_1 \frac{F_{\text{пр}} H_0 \gamma R \omega^2}{g} (f_2 + \operatorname{tg} \alpha) - \frac{F_{\text{пр}} \gamma f_2 f_1}{\cos \alpha} \left(\frac{H_0^2 - 2H_0}{2R} \right). \quad (20)$$

Выводы

При расчете усилий, возникающих на фрезерном питателе, необходимо учитывать переменную величину массы снега, образованную на винтовой лопасти фрезы в процессе взаимодействия последней со снежным забоем.

При оценке рабочего процесса фрезерного питателя целесообразно рассматривать отдельные зоны взаимодействия винтового питателя со снегом, учитывая при этом зону перебрасывания снега винтовым питателем вперед на забой, характеризующейся центральным углом $\varphi_{\text{пр}}$, соответствующим сектору, измеренному от верхней точки приемного патрубка до вертикальной оси питателя.

Горизонтальная составляющая усилия на фрезерном питателе оказывает двойное влияние на рабочий орган при рассмотрении зоны резания. В диапазоне высоты H от 0 до $H_0 - R$, горизонтальная составляющая направлена к рабочему органу, в нижней зоне взаимодействия фрезы со снегом от $H_0 - R$ до H_0 горизонтальная составляющая направлена от рабочего органа и тем самым разгружает его. Алгебраическая сумма двух этих составляющих дает в конечном итоге горизонтальное усилие на фрезерном рабочем органе.

Оптимизация функции транспортировки снега от винтовой лопасти питателя в метательный аппарат и рационализация процесса транспортировки снега фрезерным питателем, позволяющие устранить призмобразование снега перед рабочим органом, резко снижают тяговое сопротивление и непроизводительные затраты энергии ротора на осуществление рабочего процесса вследствие уменьшения расхода мощности на переработку накопленной фрезерным питателем снежной призмы и повышают возможности полной реализации мощности двигателя в рабочем режиме фрезерно-роторного снегоочистителя, а также существенно снижают расход топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баловнев В.И. Физическое моделирование строительно-дорожных машин. — Москва: Машиностроение, 1974.
2. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Поиск оптимальных условий и планирование эксперимента. — М.: Наука, 1976. — 391 с.
3. Завадский Ю.В. Планирование эксперимента в задачах автомобильного транспорта. — М.: МАДИ, 1978. — 156 с.
4. Иберла К. Факторный анализ. — М.: Статистика, 1980. — 398 с.
5. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. — М.: Мир, 1977. — 552 с.
6. Завадский Ю.В. Решение задач автомобильного транспорта и дорожно-строительных машин с помощью регрессионно-корреляционного анализа. — М.: МАДИ, 1981. — 115 с.
7. Иванов А.Н., Кузнецов Л.Н., Поливанов Ю.П. Интенсификация рабочего процесса метательного аппарата роторных снегоочистителей. — М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1981.

Фрезерлік және роторлық қар тазалаушы жұмыс органының күшін анықтау

¹**ДУДКИН Михаил Васильевич**, т.ғ.д., профессор, vas_dud@mail.ru,

¹***КИМ Алина Игоревна**, PhD, қауымдастырылған профессор, alinakim3107@mail.ru,

¹**МОЛДАХАНОВ Бекболат Аскерханович**, докторант, bek_m78@mail.ru,

¹**РОГОВСКИЙ Валерий Владимирович**, аға оқытушы, gerat1302@mail.ru,

¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан, Өскемен, А.К. Протозанов көшесі, 69,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Мақаланың мақсаты — жұмыс процесіне жұмсалатын энергия шығынын (қуатын) арттырмай, фрезерлі-роторлы қар тазалағыштың жұмыс тиімділігі мен оның өнімділігін едәуір арттыру. Яғни, бұл зерттеуде қар үйінділерін аз машиналар санымен тазалауға немесе сол қар тазалау жұмыстарына айтарлықтай аз уақыт жұмсауға мүмкіндік беретіні жайлы қарастырылады. Фрезерлі-роторлы қар тазалағыштың жұмысы кезінде әр түрлі күрделі мәселелер туындайды, яғни, бұл қардың бір бөлігі бұранда бергішімен алға қарай тартылып, қар үйіндісінің қалыптасуына әкеледі. Бұл қардың кедергісіз тазалануына және машинаның ары қарайғы қозғалысы үшін энергия шығынын арттырады, сонымен қатар қарлы массивте қар тазартқыштың өнімділігін төмендетеді. Мысалы, қалақшалар түрдегі интенсификаторды қолдану, қар үйіндісі призмасын жойып, қар тазартқыштың жұмыс қозғалысындағы энергия шығынын азайтуға мүмкіндік береді. Осылайша, қарды тазалау барысындағы энергия шығынын азайту және фрезерлік-роторлы қар тазартқыштың жұмыс процесінің қарқындылығын көбейтуге негізделген жұмыс жабдықтарының тиімділігін арттыру, қазіргі уақытта, осы типтегі машиналарды жетілдірудің ең перспективалық бағыты болып табылады. Зерттеуді Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады (грант № АР09260192 «Жұмыс тиімділігі жоғары инновациялық фрезерлік-роторлы қар тазалайтын жұмыс жабдығын әзірлеу»).

Кілт сөздер: қар, қардың бітелуі, фрезерлік-қарлы үрлегіштер, призманың призмасы, бұрандалы бергіш, қалақты күшейткіш.

Determination of Forces at the Working Unit of the Milling-Rotary Snow Cleaner

¹**DOUDKIN Mikhail**, Dr. of Tech. Sci., Professor, vas_dud@mail.ru,

¹***KIM Alina**, PhD, Associate Professor, alinakim3107@mail.ru,

¹**MOLDAKHANOV Bekbolat**, doctoral student, bek_m78@mail.ru,

¹**ROGOVSKY Valery**, Senior Lecturer, gerat1302@mail.ru,

¹D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Kazakhstan, Oskemen, A.K. Protozanov Street, 69,

*corresponding author.

Abstract. The aim of the article is significantly increasing the efficiency of the rotary-milling snow blower and its productivity without increasing the energy consumption for the work process (i.e. power), which will allow to perform work on clearing snow blockages with a smaller number of machines, or in significantly less time. It has been established that during the operation of a rotary-milling snowplow, a serious complex problem arises, which consists in the fact that part of the snow is thrown forward by a screw feeder, forming a drawing prism, which increases the energy consumption for the development of snow and for moving the machine in the snow mass and at the same time reduces the productivity of the snowplow. Elimination of the drawing prism due to the use of an intensifier, for example, of a blade type, will reduce the energy consumption for the working movement of the snowplow. Thus, a decrease in the energy intensity of snow development and an increase in the efficiency of the working equipment of a rotary-milling snowplow based on the

intensification of its working process is currently the most promising direction for improving machines of this type. The study is funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP09260192 «Development of innovative rotary-milling equipment for snow removal with increased efficiency»).

Keywords: snow, snow blockages, milling-rotary snow blowers, drawing prism, screw feeder, paddle intensifier.

REFERENCES

1. Balovnev V.I. Fizicheskoe modelirovanie stroitel'no-dorozhnykh mashin. – Moscow: Mashinostroenie, 1974.
2. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskij Yu.V. Poisk optimal'nykh uslovij i planirovanie e'ksperimenta. – Moscow: Nauka, 1976. – 391 p.
3. Zavadskij Yu.V. Planirovanie e'ksperimenta v zadachakh avtomobil'nogo transporta. – Moscow: MADI, 1978. – 156 p.
4. Iberla K. Faktornyj analiz. – Moscow: Statistika, 1980. – 398 p.
5. Khartman K. Planirovanie e'ksperimenta v issledovanii tekhnologicheskikh processov. – Moscow: Mir, 1977. – 552 p.
6. Zavadskij Yu.V. Reshenie zadach avtomobil'nogo transporta i dorozhno-stroitel'nykh mashin s pomosh'yu regressionno-korreljacionnogo analiza. – Moscow: MADI, 1981. – 115 p.
7. Ivanov A.N., Kuznecov L.N., Polivanov Yu.P. Intensifikaciya rabocheho processa metatel'nogo apparata rotnykh snegoochistitelej. – Moscow: CzNIITE'strojmash, 1981.