



МАШИНА ЖАСАУ
МАШИНОСТРОЕНИЕ
MECHANICAL ENGINEERING

DOI 10.51885/1561-4212_2023_1_161
MPHTI 55.55.31

Б.А. Молдаханов¹, М.В. Дудкин², Е.Л. Дудкина³, В.В. Роговский⁴, М. Млынчак⁵

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, Вроцлав, Польша

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

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ФРЕЗЕРНО-РОТОРНОГО СНЕГООЧИСТИТЕЛЯ И РАЗРАБОТКА
СТРУКТУРНОЙ БЛОК-СХЕМЫ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА РАЦИОНАЛЬНЫХ
ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЕГО РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**ФРЕЗЕРЛІК-РОТОРЛЫ ҚАР ТАЗАЛАҒЫШТЫ ЕСЕПТЕУ ӘДІСТЕМЕСІ ЖӘНЕ ОНЫҢ
ЖҰМЫС ЖАБДЫҒЫНЫҢ РАЦИОНАЛДЫ ПАРАМЕТРЛЕРІ МЕН ЖҰМЫС РЕЖИМДЕРІН
ЕСЕПТЕУ АЛГОРИТМІНІҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ СХЕМАСЫН ЖАСАУ**

**METHOD FOR CALCULATING A MILLING-ROTOR SNOWPLOW AND DEVELOPING
A BLOCK DIAGRAM OF AN ALGORITHM FOR CALCULATING RATIONAL PARAMETERS
AND MODES OF OPERATION OF ITS WORKING EQUIPMENT**

Аннотация. В статье исследована конструкция фрезерно-роторного снегоочистителя (ФРС) с лопастным интенсификатором винтового питателя, обладающая существенными техническими преимуществами, обуславливающими экономическую эффективность использования данной машины. Приведены методики расчета составляющих затрат мощности на процесс снегоочистки ФРС и определения зависимости составляющих затрат мощности на рабочий процесс ФРС от режимов и условий работы. Разработана структурная схема алгоритма компьютерного расчета рациональных параметров интенсификатора лопастного типа, мощности и режима работы снегоочистителя, которую можно легко адаптировать в Excel.

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: винтовой питатель, метательный аппарат, лопасть метателя, призма волочения, патрубок выбрасывателя, дальность отбрасывания снега.

Аңдатпа. Мақалада қалақшалы бұрандалы қоректендіргіш күшейткіші бар фрезерлік-роторлы қар тазалағыш машинаның (ФРҚМ) конструкциясы зерттеледі, ол осы станокты пайдаланудың экономикалық тиімділігін анықтайтын маңызды техникалық артықшылықтарға ие. ФРҚМ қар тазалау процесі үшін қуат шығындарының құрамдас бөліктерін есептеу және ФРҚМ жұмыс процесі үшін қуат шығындарының құрамдас бөліктерінің жұмыс режимдері мен шарттарына тәуелділігін анықтау әдістері келтірілген. Қалақша түріндегі күшейткіштің ұтымды параметрлерін, қар та-

залағыштың қуаты мен жұмыс режимін компьютерлік есептеу алгоритмінің блок-схемасы әзірленді, оны Excel бағдарламасында оңай бейімдеуге болады.

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: бұрандалы қоректендіргіш, лақтырғыш құрылғы, лақтырғыш қалақша, сүйреу призмасы, қар лақтырғыш құбыры, қар лақтыру қашықтығы.

Abstract. In the article, the design of a milling-rotor snowplow (FRS) with a bladed screw feeder intensifier is studied, which has significant technical advantages that determine the economic efficiency of using this machine. Methods are given for calculating the components of power costs for the FRS snow clearing process and determining the dependence of the components of power costs for the FRS working process on the operating modes and conditions. A block diagram of an algorithm for computer calculation of rational parameters of a blade-type intensifier, power and operating mode of a snow plow has been developed, which can be easily adapted in Excel.

«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: screw feeder, thrower, thrower blade, drag prism, ejector nozzle, snow throwing range.

Введение. Скорость вращения лопастного интенсификатора питателя является режимным параметром работы рабочего органа фрезерно-роторного снегоочистителя и оказывает существенное влияние на величину сопротивления при разработке снежного массива, энергоёмкость рабочего процесса и производительность снегоочистителя.

При построении теоретической модели была принята гипотеза о необходимости равенства производительности винтового питателя и производительности лопастного интенсификатора. В случае недостаточной производительности интенсификатора невозможно обеспечение полного удаления накопленной в центральной части винтового питателя снежной массы. Такое положение приводит к возрастанию составляющих усилия разработки снега и увеличению мощностных затрат на рабочий процесс.

При увеличении скорости вращения ω интенсификатора, производительность возрастает, но по достижению определенной величины наблюдается процесс перебрасывания через себя снега лопатками интенсификатора по причине неравенства окружной скорости интенсификатора и радиальной скорости схода снежной массы с лопаток. То есть лопатки не успевают полностью разгрузиться в процессе прохождения мимо приемного патрубка, вследствие этого происходит интенсивное скапливание снега перед рабочим органом в виде призмы волочения, что существенно повышает энергозатраты на рабочий процесс и снижает производительность снегоочистителя [1]:

Кроме того, с увеличением скорости вращения интенсификатора затраты мощности на привод винтового питателя с интенсификатором возрастают.

Материал и методы исследования. Для определения рациональных параметров фрезерного питателя (рис. 1) необходимо решить следующие основные комплексные задачи: выбор основных величин, характеризующих условия эксплуатации, и определение рациональных параметров питателя и метателя фрезерно-роторного снегоочистителя. Окружающая среда эксплуатации снегоочистителя определяет несколько групп требуемых параметров [1, 2]:

1) основные физико-механические показатели снега:

γ – плотность (объемная масса) снежного покрова, т/м³;

φ_1 – угол (град.) внешнего трения снежного покрова;

φ_2 – угол (град.) внутреннего трения снежного покрова;

$K_{рез}$ – коэффициент, оценивающий сопротивление резанию, кПа;

C – твердость снежного покрова, кПа;

t – температура снежного покрова, °С.

2) величины, определяющие тягово-сцепные свойства:

f_k – коэффициент сопротивления качению колес базовой машины;

$f_{сц}$ – коэффициент сцепления колес базовой машины.

3) параметры рельефа местности и разрабатываемого массива:

h – высота разрабатываемого снежного массива, м;

i – угол местности, %.

В качестве необходимых данных для расчета рациональных параметров питателя необходимо иметь основные характеристики базовой машины и условия ее работы:

P_T – производительность снегоочистителя техническая, т/ч;

B – ширина рабочего органа, м;

G_M – вес машины, т;

G_{po} – вес рабочего органа, т;

H_{max} – максимальная высота разрабатываемого снежного массива, м;

V_p – скорость движения снегоочистителя в рабочем режиме, м/с;

$V_{тр}$ – скорость движения снегоочистителя в транспортном режиме, м/с;

ω – угловая скорость питателя, с⁻¹;

α – угол подъема винтовой линии питателя, град.

При расчетах для новой техники с учетом физико-механических свойств снега удобнее воспользоваться методикой и результатами вероятностной оценки физико-механических свойств снега, изложенной в [3].

Основными конструктивными параметрами питателя являются:

α – угол подъема винтовой линии рабочего органа, град;

D – внешний диаметр рабочего органа, м;

d – диаметр вала рабочего органа, м;

b_d – ширина винтовой лопасти питателя, м.



Рисунок 1. Винтовой питатель фрезерно-роторного снегоочистителя с лопастным интенсификатором

Угол подъема винтовой линии рабочего органа [4]

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{S}{2\pi R}, \text{ град.} \quad (1)$$

где S – шаг винтовой линии, м.

Диаметр фрезы определяется [5]

$$D \geq 1,2 \dots 1,5 \cdot B \cdot \pi^{-1}, \text{ м.} \quad (2)$$

Диаметр вала рабочего органа

$$d = mD, \quad (3)$$

где m – коэффициент рационального соотношения наружного и внутреннего диаметров винтовой лопасти. Согласно [5, 6, 7] $m = 0,2 - 0,3$.

Согласно [4]

$$b_{л} \geq 2\sqrt{R \cdot b_z \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \rho} + b_z, \quad (4)$$

где b_z – подача на одну лопасть.

Определенные по формулам (1-4) параметры питателя обеспечивают достижение минимальной для данных условий эксплуатации величины горизонтальной и вертикальной сил крутящего момента на валу рабочего органа снегоочистителя. Для полной реализации мощности двигателя снегоочиститель должен работать в определенном ниже режиме.

Метод определения составляющих затрат мощности на процесс снегоочистки фрезерно-роторным снегоочистителем. Параметрами, влияющими на производительность снегоочистителя, являются высота разрабатываемого снежного массива и рабочая скорость передвижения машины. В целях повышения производительности снегоочистителя необходимо стремиться к максимальному увеличению этих параметров. Однако оба они имеют ограничения, связанные с возможно реализуемой энергией движителя на рабочий процесс, а именно: высота разрабатываемого снега имеет ограничения по тяговой способности базовой машины, рабочая скорость – по мощности энергетической установки снегоочистителя. Определение составляющих затрат мощности, задаваемой энергетической установкой машины в процессе взаимодействия питателя с разрабатываемым снежным массивом, является важной задачей при определении рационального режима работы снегоочистителя. Общий баланс мощности снегоочистителя, выполненного по одномоторной схеме:

$$N_{\Sigma} = N_{дв} = N_{пер} + N_{отн} + N_{рот} + N_{букс}, \text{ кВт,} \quad (5)$$

где: N_{Σ} – суммарная мощность энергетической установки снегоочистителя, кВт;

$N_{пер}$ – мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления передвижению снегоочистителя в процессе снегоочистки, кВт;

$N_{отн}$ – мощность, затрачиваемая на разработку снега винтовым питателем, кВт;

$N_{рот}$ – мощность, затрачиваемая на привод ротора-метателя, кВт;

$N_{букс}$ – мощность, затрачиваемая на буксование ведущих колес, кВт.

Мощность на преодоление сопротивления передвижению снегоочистителя в процессе снегоочистки определяется

$$N_{пер} = W_{\Sigma} \cdot V_p \cdot \eta_{тр\Sigma}^{-1} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт,} \quad (6)$$

где: W_{Σ} – суммарное сопротивление передвижению снегоочистителя в забое, Н;

V_p – действительная рабочая скорость, м/с;

$\eta_{тр\Sigma}^{-1}$ – суммарный к.п.д. трансмиссии.

$$V_p = V_T \left(1 - \frac{\delta}{100}\right), \quad (7)$$

где: V_T – теоретическая скорость, м/с;

Скорость перемещения частицы снега вдоль винтовой лопасти фрезы

$$V_{\text{лоп}} = (\omega R)^2 + (\omega R t g \alpha)^2 \sin \left[\left(\arctg \frac{1}{t g \alpha} \right) - 1 \right], \text{ м/с.} \quad (8)$$

$$W_{\Sigma} = W_{\text{пер}} + W_{\text{тр.р.о.}} + W_{\text{пер.пр.}} + W_{\text{в.м.}} + W_{\text{нож}} + W_{\text{п.п.}}, \text{ Н,} \quad (9)$$

где: $W_{\text{пер}}$ – сопротивление перекачиванию машины;

$W_{\text{тр.р.о.}}$ – сопротивление транспортированию рабочего органа;

$W_{\text{пер.пр.}}$ – сопротивление перемещению призмы волочения, Н;

$W_{\text{в.м.}}$ – сопротивление, возникающее при взаимодействии питателя с разрабатываемым снежным массивом, Н;

$W_{\text{нож}}$ – сопротивление резанию снега ножом кожуха питателя;

$W_{\text{п.п.}}$ – сопротивление внедрению пассивных конструкций снегоочистителя.

$$W_{\text{пер}} = (G_{\text{маш}} - G_{\text{р.о.}}) f_{\text{кач}} \pm i, \text{ Н,} \quad (10)$$

где: $G_{\text{маш}}$ – вес машины, Н;

$G_{\text{р.о.}}$ – вес рабочего органа, Н;

$$W_{\text{тр.р.о.}} = (G_{\text{р.о.}} - P_{\text{в}}) f_1 \pm i, \text{ Н,} \quad (11)$$

где $P_{\text{в}}$ – вертикальная составляющая сопротивлению разрабатываемого снега, Н.

$$P_{\text{в}} = \frac{F_{\text{пр}} \gamma R^2 \omega^2}{g} (\cos \alpha f_1 f_2 + f_1 \sin \alpha + f_2 + \cos \varphi_2 f_2) \cdot \left[\left(\frac{\beta}{2} + \frac{\sin 2\beta}{4} \right) + \frac{\varphi_0 - \beta}{2} + \frac{\sin(\varphi_0 - \beta)}{4} \right] + \frac{F_{\text{пр}} \gamma R f_2}{3} \cdot (f_1 + 1 + \cos \varphi_2) \{ (\cos^2 \beta - 1) + [1 - \cos^3(\varphi_0 - \beta)] \}, \quad (12)$$

$W_{\text{пер.пр.}}$ и $W_{\text{в.м.}}$ реализуются через горизонтальную составляющую сопротивления разработке снега

$$P_{\text{г}} = \frac{F_{\text{пр}} \gamma R \omega^2}{g} (f_1 f_2 \cos \alpha + \sin \alpha f_1 + f_2 \cos f_2 + f_2) \cdot \left[\frac{H_0^2 - 2H_0}{2R} - (1,5R - H_0) \right] + F_{\text{пр}} \gamma f_2 (f_1 + 1 + \cos f_2) \cdot \left[\frac{(H_0 - R)^2}{R} - \frac{(H_0 - R)^3}{3R^2} \right], \text{ Н,} \quad (13)$$

$$F_{\text{пр}} = \frac{\Pi_{\text{пит}}}{V_{\text{лоп}}}, \quad (14)$$

где $F_{\text{пр}}$ – площадь призмы волочения, накопленной на винтовой лопасти фрезы

$\Pi_{\text{пит}}$ – производительность питателя, м³/с.

$$W_{\text{нож}} = K_{\text{рез}} \cdot B \cdot h_{\text{ножа}}, \text{ Н,} \quad (15)$$

$$W_{\text{п.п.}} = K_{\text{вд}} \cdot F_{\text{п}}, \text{ Н} \quad (16)$$

где: $h_{\text{ножа}}$ – высота ножа, м.

$K_{\text{вд}}$ – коэффициент сопротивления вдавливаю, кПа;

$F_{\text{п}}$ – суммарная площадь пассивных поверхностей, м².

Мощность на привод винтового питателя

$$N_{\text{отн}} = M_c^{\Sigma} \cdot \omega \cdot \eta_{\Sigma}^{-1} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт,} \quad (17)$$

где: M_c^Σ – суммарный момент сопротивления на валу рабочего органа, Нм;
 ω – скорость вращения рабочего органа, с⁻¹;
 η_Σ^{-1} – суммарный к.п.д. привода рабочего органа.

Величина момента сопротивления на валу рабочего органа

$$M_c^\Sigma = M_p + M_{тр} + M_{разгр} + M_{перебр}, \quad (18)$$

где: M_p – момент сопротивления в зоне резания, Нм;
 $M_{тр}$ – момент сопротивления в зоне транспортирования, Нм;
 $M_{разгр}$ – момент сопротивления в зоне разгрузки, Нм;
 $M_{перебр}$ – момент сопротивления в зоне перебрасывания, Нм.

$$M_p = \left\{ \frac{F_{пр} H_0 \gamma R \omega^2}{g} f_1 (f_2 + tg\alpha) - \frac{F_{пр} \gamma}{\cos\alpha} \left(\frac{H_0^2 - 2H_0}{2R} \right) f_1 f_2 + \left[\frac{F_{пр} \gamma}{\cos\alpha} f_2 \left(\frac{R\omega^2 H_0}{g} - \frac{H_0^2 - 2H_0}{2R} \right) \right] (1 + \cos f_2) \right\} R \cdot z_i \cdot K, \quad (19)$$

где z_i – количество витков питателя в забое.

Согласно [2-5]

$$z_i = \frac{4}{\varphi_{рез} \cdot tg\alpha} \cdot \frac{B}{D}, \quad (20)$$

где K – количество полуфрез, $K = 2$.

$$M_{тр} = \frac{F_{пр} \gamma}{\cos\alpha} f_2 \left[\frac{H_0 R \omega^2}{g} \left(f_1 + \frac{f_1 tg\alpha}{f_2} \right) - \frac{(H_0^2 - 2H_0) f_1}{2R} + \left(\frac{R\omega^2 H_0}{g} - \frac{H_0^2 - 2H_0}{2R} \right) \cdot (1 + \cos\varphi_2) \right] R \cdot z_i \cdot K, \quad (21)$$

$$M_{разгр} = \frac{m_{отбр} V_0^2}{2\omega}, \quad (22)$$

где $m_{отбр}$ – масса снега, отброшенная в приемный патрубок в сек.

$$m_{отбр} = m_{пит} \cdot K_{эфф} = K_{эфф} \left[\frac{F_{пр} H_0 \gamma}{\cos\alpha} + \frac{\gamma 2\pi R h (1 - \cos\varphi_1)}{2} \cdot \frac{(R - r - h) tg\varphi_2}{2} \right], \quad (23)$$

где: φ_2 – угол внутреннего трения снега, град;

h – величина подачи, м;

$K_{эфф}$ – коэффициент эффективности питателя.

$$K_{эфф} = (G_\Sigma - G_{отбр}) \cdot G_\Sigma^{-1}, \quad (24)$$

где G_Σ , $G_{отбр}$ – соответственно вес снега, поступающего на рабочий орган и отброшенного вперед на забой, Н.

$$G_\Sigma = B \cdot H_0 \cdot V_p \cdot \gamma \cdot t \cdot k_n, \quad (25)$$

где: H_0 – высота разрабатываемого снежного забоя, м;

V_p – рабочая скорость снегоочистителя, м/с;

t – время до начала установившегося режима, с, $t = 5 \dots 10$ с;

k_n – коэффициент потерь, $k_n = 0,85$.

$$G_{отбр} = \frac{B h_{пр}^2 \cdot tg\alpha \cdot k_p \gamma}{2tg\varphi_2}, \quad (26)$$

$$h_{пр} = \sqrt{\frac{2m_{перебр}}{ctg\varphi_2 \cdot B \gamma}}, \quad (27)$$

где: k_p – коэффициент разрыхления снега. $k_p = 1,15 \dots 1,25$;
 $h_{пр}$ – высота призмы волочения, м.
 $m_{перебр}$ – масса, переброшенная питателем в сек,

$$m_{перебр} = m_{пит}(1 - k_{эфф})\omega. \quad (29)$$

$$M_{перебр} = \frac{m_{перебр}V_a^2}{2\omega}, \text{ Нм.} \quad (28)$$

Мощность на привод ротора-метателя, кВт [6, 7]:

$$N_{рот} = \Pi_T V_p^2 g^{-1} \eta_{дв}^{-1} 0,15 \left[0,105 f_1 + 0,05 G_p (G_p \omega_p + 7,98 \Pi_T)^{-1} + 0,017 \right], \quad (30)$$

где: G_p – вес ротора метателя, Н;
 $\eta_{дв}$ – к.п.д. двигателя;
 V_p – окружная скорость ротора, м/с;
 ω_p – угловая скорость ротора, с⁻¹.

$$N_{букс} = N_{пер} \cdot \delta, \text{ кВт,} \quad (31)$$

где δ – коэффициент буксования колесного движителя с пневматической шиной. Согласно [1, 7] для машины со всеми ведущими колесами

$$\delta = A \frac{W_\Sigma}{R} + B \left(\frac{W_\Sigma}{R} \right)^n, \quad (32)$$

где: А, В, n – коэффициенты, зависящие от типа шин или рисунка протектора, давления воздуха и состояния снежного покрытия, А=0,45; В=16,09; n=4.

$\frac{W_\Sigma}{R} = \Psi$ – относительная сила тяги;

R – равнодействующая реактивных сил, действующих на пневматическую шину со стороны поверхности качения, кг. Согласно [1, 7] R = 12500 кг.

Техническая производительность снегоочистителя определяется

$$\Pi_T = B \cdot H_0 \cdot V_p \cdot \gamma \cdot k_{эфф}, \text{ ч/час,} \quad (33)$$

где $k_{эфф}$ – коэффициент эффективности работы питателя снегоочистителя.

После проведения расчета по формулам (9)-(30) необходимо проверить баланс мощности по (5). При соблюдении этого равенства достигается максимальное использование мощности двигателя. При $N_{дв} > N_\Sigma$ производят увеличение рабочей скорости V_p движения снегоочистителя до достижения равенства (5). В случае $N_{дв} < N_\Sigma$ необходимо уменьшить значение V_p и произвести повторный расчет.

После вычисления баланса мощности необходимо провести дополнительную проверку по производительности:

$$\Pi_{теор} \leq \Pi_{пит} \leq \Pi_{рот}, \quad (34)$$

где: $\Pi_{теор}$ – теоретическая производительность снегоочистителя;

$\Pi_{пит}$ – производительность питателя [1-4];

$\Pi_{рот}$ – производительность ротора-метателя [1, 4, 7, 8, 9].

$$\Pi_{теор} = B \cdot H \cdot V \cdot \gamma \cdot k_{нз}, \text{ т/час,} \quad (35)$$

где: В – ширина питателя, м;

H – высота разрабатываемого снежного массива, м;

V – рабочая скорость снегоочистителя, м/ч;

γ – объемный вес снега, т/м³;

$k_{нз}$ – коэффициент неравномерности загрузки, $k_{нз} = 0,7 \dots 0,8$;

$$P_{пит} = 47 \cdot S \cdot n \cdot k_{эфф} \cdot (D^2 - d^2), \text{ т/час}, \tag{36}$$

где: S – шаг винтовой линии метателя, м;

n – число оборотов питателя, об/мин;

D – внешний диаметр винтовой линии метателя, м;

d – внутренний диаметр винтовой линии питателя, м;

$$P_{рот} = \frac{1800 \cdot q \cdot z \cdot \omega \cdot k_H \gamma}{G \cdot k_{рл}}, \text{ т/час}, \tag{37}$$

где: q – объем материала, транспортируемого одной лопастью, м³;

z – число лопастей ротора;

$k_{рл}$ – коэффициент разрыхления материала на лопасти, $k_{рл} = 1,05-1,15$;

k_H – коэффициент заполнения лопастей материалом, $k_H = 0,8 - 0,9$.

$$q = \frac{b h_l^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{tg \varphi_2} - tg \varphi_0 \right), \text{ м}^3, \tag{38}$$

где: b – ширина лопасти, м;

h_l – высота лопасти, м;

φ_2 – угол внутреннего трения снега, град;

φ_0 – угол наклона лопастей, град.

С использованием приведенной выше методики разработана структурная схема алгоритма компьютерного расчета рациональных параметров интенсификатора лопастного типа, мощности и режима работы снегоочистителя (рис. 2).

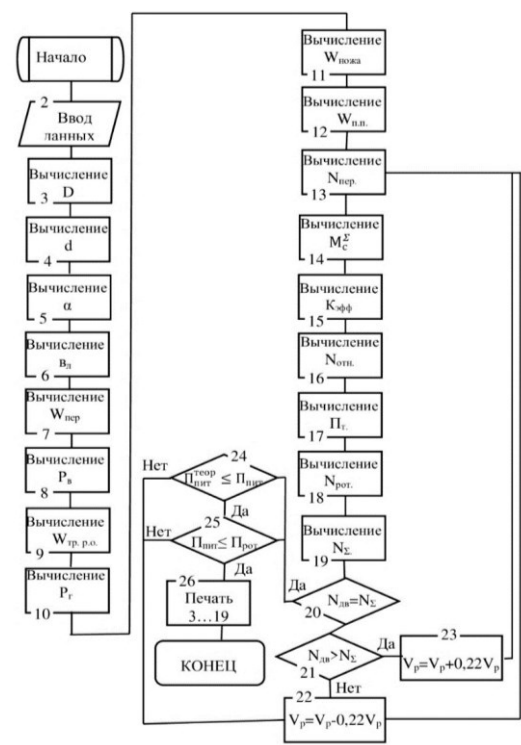


Рисунок 2. Структурная схема алгоритма расчета рациональных параметров и режимов работы фрезерно-роторного снегоочистителя

Вычисления производятся в следующем порядке.

По заданной величине диаметра питателя (блок 3) в блоке 4 определяется диаметр вала рабочего органа. Затем определяются:

- в блоке 5 – величина угла подъема винтовой линии питателя;
- в блоке 6 – величина ширины ленты питателя;
- в блоке 7 – величина сопротивления перекачиванию машины;
- в блоке 8 – величина вертикальной составляющей сопротивления разработке снега;
- в блоке 9 – величина сопротивления транспортированию рабочего органа;
- в блоке 10 – величина горизонтальной составляющей сопротивлению разработки снега;
- в блоке 11 – величина сопротивления резанию снега ножом кожуха питателя;
- в блоке 12 – величина сопротивления внедрению пассивных конструкций снегоочистителя;
- в блоке 13 – величина мощности, затрачиваемой на перемещение снегоочистителя в снежном забое;
- в блоке 14 – величина момента сопротивления на валу рабочего органа;
- в блоке 15 – величина коэффициента эффективности конструкции питателя;
- в блоке 16 – величина мощности на совершение относительного движения;
- в блоке 17 – величина технической производительности снегоочистителя;
- в блоке 18 – величина мощности, затрачиваемой на работу ротора-метателя;
- в блоке 19 – величина суммарной мощности, затрачиваемой на рабочий процесс снегоочистителя.

В логическом блоке 20 производится сравнение суммарной мощности на рабочий процесс снегоочистителя с суммарной мощностью силовой установки снегоочистителя.

При положительном сравнении (при равенстве мощностей $\pm 1,5 \dots 2,0$ %) на печать (блок 26) выводятся результаты расчета в блоках 3-21. При отрицательной величине в логическом блоке 20 проводится дополнительная проверка величин сравниваемых мощностей. При отрицательном результате в блоке 21 необходимо провести переход к блоку 22, в котором величина рабочей скорости передвижения снегоочистителя уменьшается на заданную величину. Далее расчет производится с блока 15. При положительном результате производится переход к блоку 23, в котором производится увеличение рабочей скорости на заданную величину. Далее расчет производится опять с блока 15.

При выполнении условия блока 20 необходимо провести дополнительный баланс по производительности. В логическом блоке 24 производится сравнение объема материала, вырезаемого из снежного массива, с пропускной способностью винтового питателя. При отрицательном выполнении условия блока 24 необходимо осуществить переход к блоку 22, при положительном – к логическому блоку 25, в котором происходит сравнение производительности питателя с производительностью ротора-метателя. При положительном результате в блоке 25 осуществляется переход к блоку 26, в противном случае необходим переход к блоку 22 и далее расчет производить с блока 15.

Определение зависимости составляющих затрат мощности на рабочий процесс снегоочистителя от режимов и условий работы. На основе методики расчета мощностных затрат на осуществление процесса снегоочистки фрезерно-роторным снегоочистителем был проведен расчет составляющих суммарной мощности для ФРС с питателями различной конструкции в зависимости от скорости передвижения машины, работающей в снежном

забое, и высоты разрабатываемого снега h :

$$N_{\Sigma} = N_1 + N_2, \text{ кВт}; \quad N_1 = N_{\text{пер}} + N_{\text{букс}}; \quad N_2 = N_{\text{фр}} + N_{\text{рот}},$$

где $N_{\text{пер}}$ – мощность, затрачиваемая силовой установкой на передвижение снегоочистителя;

$N_{\text{букс}}$ – мощность, затрачиваемая силовой установкой на буксование колесного движителя;

$N_{\text{фр}}$ – мощность, затрачиваемая на привод рабочего органа (фрезерного питателя);

$N_{\text{рот}}$ – мощность, затрачиваемая на привод ротора-метателя.

Представленные на рис. 3 графические зависимости составляющих N_1 и N_2 в функции $V_{\text{раб}}$ и h позволяют определить затраты мощности и рабочую скорость снегоочистки при разработке конкретной высоты снежного массива.

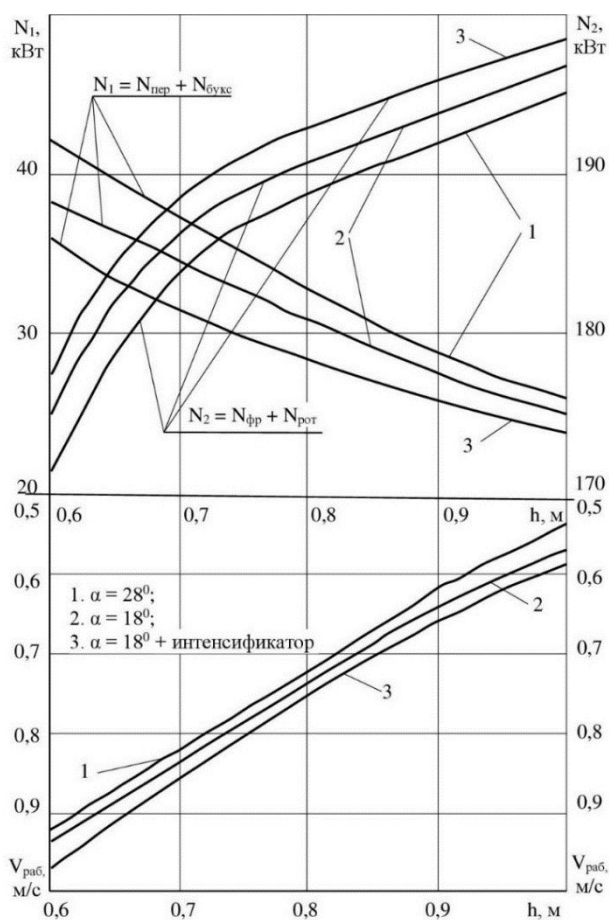


Рисунок 3. Зависимость составляющих затрат мощности N и рабочей скорости $V_{\text{раб}}$ от высоты разрабатываемого снега h

С ростом высоты разрабатываемого снежного массива увеличивается масса снега, поступающая в единицу времени на питатель, поэтому наблюдается рост мощности, затрачиваемой двигательной установкой на привод фрезерного питателя и ротора метателя N_2 . Так как

расчет мощностных затрат производится для снегоочистителя, выполненного по одномоторной схеме, то по причине постоянства сохранения мощностного баланса с ростом N_2 наблюдается уменьшение N_1 и рабочей скорости $V_{\text{раб}}$.

Результаты и их обсуждение. Определение технико-экономической эффективности от внедрения фрезерно-роторного снегоочистителя с лопастным интенсификатором винтового питателя на базе колесного трактора К-701 (или ему подобного) проводилось согласно описанным ранее методическим указаниям.

Применение на винтовом питателе интенсификатора лопастного типа обеспечивает уменьшение сопротивления передвижению снегоочистителя в снежном забое, снижение буксования колесного движителя и исключение, тем самым, потерь энергозатрат при совершении переносного движения. За счет повышения пропускной и отбрасывающей способности фрезерного винтового питателя, а также исключения перебрасывания снега обратно на забой, максимально загружается ротор-метатель, что существенно повышает производительность снегоочистителя при снижении энергозатрат на осуществление рабочего процесса.

Для сравнения с другими снегоочистителями данного типоразмера по приведенной выше методике были определены удельные приведенные затраты и сравнительный экономический эффект для снегоочистителей с различными конструкциями питателей. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчета технико-экономической эффективности внедрения в промышленность фрезерно-роторного снегоочистителя на основе К-703МА-ОС-2 с различными конструкциями питателей

№ п/п	Наименование показателя	Условн. обозн.	Един. изм.	Значение показателей		
				ОС-2'	ОСМ-2"	ОС-2'''
1	Капитальные затраты	Z_k	тенге	270574	270574	284094
2	Годовая эксплуатационная производительность	V	т	444090	494290	535353
3	Годовые текущие затраты	I	тенге	48670	49232	50112
4	Экономический эффект от применения одной машины в течение года	Δ_r	тенге	–	13164	19410
5	Производственный экономический эффект за срок службы новой техники	$\Delta_{\text{произ}}$	тенге	–	1331249	2053628
6	Годовая экономия по затратам труда	ΔR	чел.	–	0,085	0,12
7	Годовая экономия по затратам материалов	ΔG	кг	–	277	498

На рис. 4 представлены зависимости удельных приведенных затрат и технической производительности с различными конструктивными исполнениями винтовых питателей.

Из приведенных графиков видно, что $Z_{\text{уд}}^{28} > Z_{\text{уд}}^{18} > Z_{\text{уд}}^{18+\text{пит}}$, т.е. при фиксированной высоте разрабатываемого снега наиболее экономичным является снегоочиститель с питателем, снабженным лопастным ускорителем, так как рост производительности данного снегоочистителя весомее на 10...20 %, чем капитальные затраты (~ 5%) при эксплуатации снегоочистителей с винтовым питателем без каких-либо ускорителей. Причем $Z_{\text{уд}}^{18}$ также ниже $Z_{\text{уд}}^{28}$, так как при прочих равных показателях его производительность выше, чем у снегоочистителя с питателем, имеющем угол подъема винтовой линии $\alpha = 28^\circ$.

По мере увеличения высоты разрабатываемого снега наблюдается повышение производительности Π_T , так как в единицу времени на питатель поступает больше снежной массы, но при $h > 0,9$ м наблюдается падение Π_T^{28} за счет перебрасывающей способности нерациональной конструкции питателя. При тех же условиях работы для снегоочистителя с интенсификатором-питателем наблюдается некоторое снижение производительности $\Pi_T^{18+пит}$, так как рабочая скорость уменьшается на 4...5 % за счет увеличения загрузочной способности интенсификатором ротора-метателя.

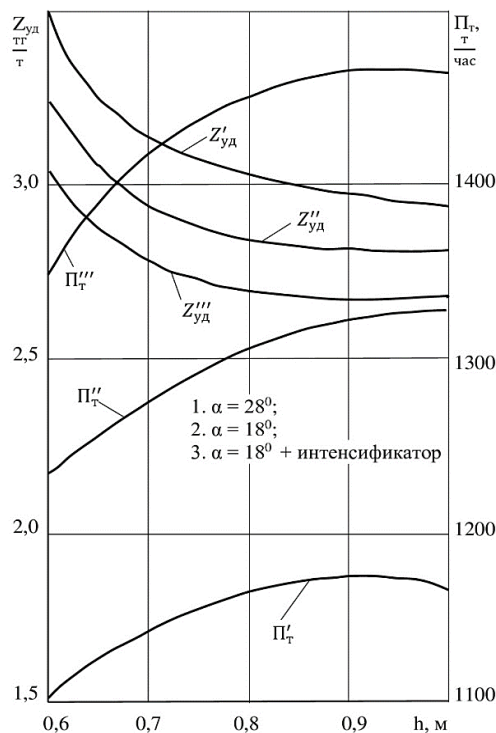


Рисунок 4. Зависимость удельных приведенных затрат $Z_{уд}$ и производительности Π_T от высоты разрабатываемого материала h при различных конструкциях питателя

При оценке технического уровня разработанного снегоочистителя целесообразно провести сравнительный анализ наиболее весомых параметров, характеризующих процесс работы данной машины.

Критериями для оценки эффективности служили следующие показатели:

- энергоемкость процесса снегоочистки, как показатель рациональности использования мощности силовой установки снегоочистителя, имеющего ту или иную конструкцию питателя;
- материалоемкость машины, как показатель рациональности конструктивной схемы снегоочистителя;
- обобщенный показатель PNG [10], позволяющий оценить повышение эффективности системы.

Графическая интерпретация результатов расчета зависимости удельных энергоемкости $G_{уд}$, материалоемкости $G_{уд}$ и обобщенного показателя PNG от высоты разрабатываемого

снега при различных конструкциях питателей приведена на рис. 5.

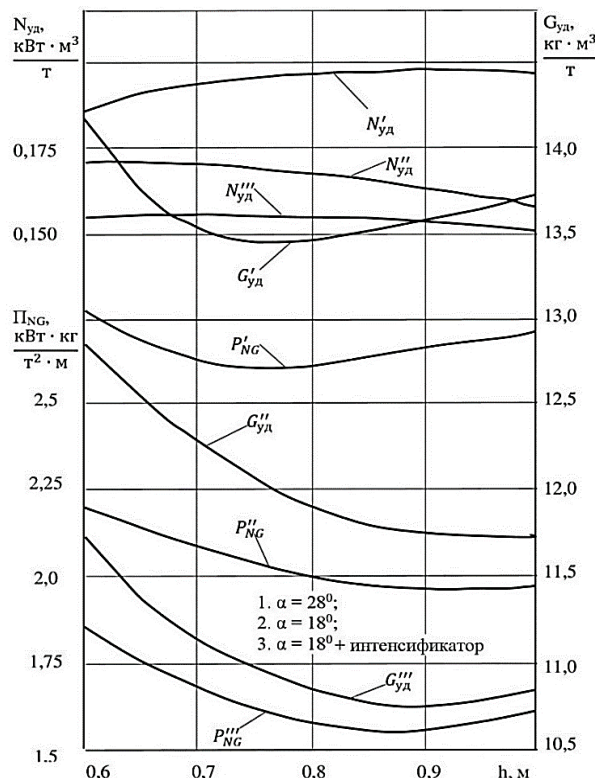


Рисунок 5. Зависимость удельных энергоемкости $N_{уд}$, материалоемкости $G_{уд}$ от высоты разрабатываемого материала при различных конструкциях питателя (1, 2, 3)

Заключение: Анализ графика показывает, что исследуемая конструкция снегоочистителя с лопастным интенсификатором винтового питателя обладает существенными техническими преимуществами, обуславливающими экономическую эффективность использования данной машины, а следовательно, у результатов диссертационной работы есть большой потенциал для их возможной коммерциализации.

Список литературы

1. Аюпова Н.Ю. Повышение эффективности рабочего процесса питателя фрезерно-роторного снегоочистителя: дис. ... канд. техн. наук, 05.05.04, СибАДИ. – Омск, 2020. – 182 с.
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.). – Vol. 15. – No. 2. – 2021. – Pp. 96-105. – <https://doi.org/10.15866/ireme.v15i2.20859>.
3. М.В. Дудкин, Б.А. Молдаханов, Е.Л. Дудкина, А.И. Ким, А.Б. Бугаев. Вероятностная оценка основных физико-механических свойств снега при его разработке фрезерно-роторными снегоочистителями. «Вестник ВКТУ». – № 2, 2022. – Усть-Каменогорск. – С. 71-79. – DOI 10.51885/1561-4212_2022_2_71.
4. 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, Vol. 15, N. 9, 2021. 453-463. – <https://doi.org/10.15866/ireme.v15i9.20952>.

5. 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.
6. J. Gaume, G. Chambon, I. Reiweger¹, 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. – DOI 10.1109/ICVRIS.2018.00106.
7. Д.С. Алешков. Повышение эффективности фрезерно-роторного снегоочистителя путем совершенствования его конструкции: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04; СиБАДИ. – Омск, 2001. – 204 с.
8. Дудкин М.В., Ким А.И., Молдаханов Б.А., Роговский В.В. Определение усилий на рабочем органе фрезерно-роторного снегоочистителя. *Труды университета №2 (87), 2022*. – Караганда, КарТУ, 2022. С. 16-21. DOI 10.52209/1609-1825_2022_2_16.
9. Дудкин М.В., Молдаханов Б.А., Бугаев А.Б. Классификация методов повышения эффективности работы питателей шнеко- и фрезерно-роторных снегоочистителей. «Вестник ВКТУ». – № 2. – 2022. – Усть-Каменогорск. – С. 64-70. DOI 10.51885/1561-4212_2022_2_64.
10. Баловнев В.И. Моделирование и подобие строительно-дорожных машин. – Москва: МАДИ, 2014. – 148 с. – <http://www.lib.madi.ru/fel/fel1/fel14E215.pdf>.
11. Е.С. Вентцель. Теория вероятностей. – 10-е изд. – Москва: Высшая школа, 2006. – 575 с.
12. К.Ф. Войтковский. Механические свойства снега. – М.: Наука, 1977. – 126 с.
13. Gaume, J., Chambon, G., Reiweger, I., van Herwijnen, A., & Schweizer, J. (2014). On the failure criterion of weak-snow layers using the discrete element method. In *ISSW proceedings*. 2014 (pp. 681-688).
14. Zakirov M.F., Baranchik V.P. Novyj podhod k vyboru rezhimov razrusheniya snega rabochimi organami mashin [New approach to the choice of snow destruction working parts of machines]. *Intel'ktual'nye sistemy v proizvodstve*, 2011. – No 2 (18). – P. 107-110.
15. Баранчик В.П., Закиров М.Ф. Исследования сопротивления резанию снега малогабаритным плужным снегоочистителем // *Механизация строительства*. – 2009. – № 11. – С. 16-18.

References

1. N.YU. Ayupova. Povyshenie effektivnosti rabocheho processa pitatelya frezerno-rotornogo snegoochistitelya: Dis. ... kand. tekhn. Nauk: 05.05.04, SibADI. – Омск, 2020. – 182 с.
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.)*, Vol. 15, N.2, 2021. 96-105. <https://doi.org/10.15866/ireme.v15i2.20859>
3. M.V. Dudkin, B.A. Moldahanov, E.L. Dudkina, A.I. Kim, A.B. Bugaev. Veroyatnostnaya ocenka osnovnykh fiziko-mekhanicheskikh svoystv snega pri ego razrabotke frezerno-rotornymi snegoochistitelyami. «Vestnik VKTU». – № 2, 2022. – Ust'-Kamenogorsk. – S. 71-79. DOI 10.51885/1561-4212_2022_2_71.
4. 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*, Vol. 15, N. 9, 2021. 453-463. – <https://doi.org/10.15866/ireme.v15i9.20952>.
5. 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.
6. J. Gaume, G. Chambon, I. Reiweger¹, 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. – DOI 10.1109/ICVRIS.2018.00106.
7. D.S. Aleshkov. Povyshenie effektivnosti frezerno-rotornogo snegoochistitelya putem sovershenstvovaniya ego konstrukcii: Dis. ... kand. tekhn. Nauk: 05.05.04, SibADI. – Омск, 2001. – 204 с.
8. Dudkin M.V., Kim A.I., Moldahanov B.A., Rogovskij V.V. Opredelenie usilij na rabochem organe frezerno-rotornogo snegoochistitelya. *Trudy universiteta №2 (87), 2022*. – Karaganda, KarTU, 2022. – S. 16-21. DOI 10.52209/1609-1825_2022_2_16.
9. M.V. Dudkin, B.A. Moldahanov, A.B. Bugaev. Klassifikaciya metodov povysheniya effektivnosti raboty pitatelej shneko- i frezerno-rotornykh snegoochistitelej. «Vestnik VKTU». – № 2, 2022. – Ust'-Kamenogorsk. – S. 64-70. – DOI 10.51885/1561-4212_2022_2_64.
10. V.I. Balovnev. Modelirovanie i podobie stroitel'no-dorozhnykh mashin. – Moskva: MADI, 2014. – 148 s. – <http://www.lib.madi.ru/fel/fel1/fel14E215.pdf>.
11. E.S. Ventcel'. Teoriya veroyatnostej. –10-e izd. – Moskva: Vysshaya shkola, 2006. – 575 s.
12. K.F. Vojtkovskij. Mekhanicheskie svoystva snega. – M.: Nauka, 1977. – 126 s.
13. Gaume, J., Chambon, G., Reiweger, I., van Herwijnen, A., & Schweizer, J. (2014). On the failure criterion of weak-snow layers using the discrete element method. In *ISSW proceedings*. 2014 (P. 681-688).

14. Zakirov M.F., Baranchik V.P. Novyjpodhod k vyboru rezhimov razrusheniya snega rabochimi organami mashin [New approach to the choice of snow destruction working parts of machines]. Intel'ktual'nye sistemy v proizvodstve, 2011. – No 2 (18). – P. 107-110.
15. Baranchik V.P., Zakirov M.F. Issledovaniya soprotivleniya rezaniyu snega malogabaritnym pluzhnym snegochistitelem // Mekhanizaciya stroitel'stva, 2009. – № 11. – S. 16-18.