

УДК 62-932

В. И. БАЛОВНЕВ, докт. техн. наук.

*Московский государственный автомобильно-дорожный технический университет
(МАДИ)*

Р. Г. ДАНИЛОВ, канд. техн. наук.

Открытое акционерное московское общество «Завод имени И. А. Лихачёва»

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ
ТЯГОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РОТОРНЫХ
СНЕГООЧИСТИТЕЛЕЙ**

Снегоочиститель со шнекороторным или фрезерно-роторным оборудованием в процессе работы выполняет две операции: отделение снега от массива и перемещение (отбрасывание) отделенного снега за пределы дорожного полотна. Снег, как пластично-вязкое тело, эффективно разрушается при малых скоростях резания. Отбрасывание снега в сторону требует сообщения снегу значительной окружной скорости и большой центробежной силы. Поэтому на снегоочистителях устанавливаются рабочие органы двух типов: для отделения снега от массива и для его отбрасывания. Шнек или ленточная фреза – отделяет снег. Ротор или центробежный метатель – отбрасывает снег в сторону.

Для более обоснованного определения исходных технико-эксплуатационных параметров проектируемого объекта предлагается использовать метод анализа математической модели четвертой координаты (времени) рабочего процесса машины и обобщения полученного оптимального решения на подобные объекты техники методами теории подобия систем. Методика расчета разработана сотрудниками МАДИ (г. Москва) и рассмотрена в ряде наших работ [1, 3, 4].

При определении исходных параметров шнекороторных снегоочистителей по анализу четвертой координаты процесса в начале определяются параметры машины в целом, а затем параметры основных агрегатов машины: шнеков, фрезы и роторной отбрасывающей системы.

Рабочий цикл шнекороторных и фрезерно-роторных снегоочистителей включает выполнение двух основных операций: операцию рабочего движения (одновременно с приводом шнекороторного или фрезерно-роторного снегоочистительного агрегата) с продолжительностью операции t_p и операцию транспортного (холостого) передвижения, при этой операции не работает шнекороторный (фрезерно-роторный)

снегоочистительный агрегат, с продолжительностью операции t_x . Эти операции протекают последовательно. При формировании математических моделей продолжительности рабочего цикла роторных снегоочистителей требуется оценить влияние на время цикла основных и вспомогательных операций. Важно учитывать операции по внедрению рабочих органов в снег, а также влияние простоев при движении самосвалов особенно в черте города. Простои занимают мало времени и не оказывают существенного влияния на параметры. При расчете производительности эти факторы при необходимости могут быть учтены коэффициентами влияния $k_{вл}$. Тягово-энергетические параметры машины определяются в основном режимами протекания основных операций рабочего цикла: рабочей и транспортно-холостой операций.

Продолжительность рабочего цикла t_u или величина четвертой координаты рабочего процесса является важным показателем эффективности работы машины. В ряде наших работ показано, что от продолжительности рабочего цикла машины зависят другие важные показатели эффективности рабочего процесса (производительность, энергоемкость, материалоемкость, себестоимость единицы продукции и прибыль) [1-5].

Анализ технических параметров современных роторных снегоочистителей показывает, что между техническими параметрами подобных машин существуют зависимости, основанные на системном подобии таких объектов техники:

$$N = k_2 m; m_{po} = k_{po} m; m = k_{mm} m_m \text{ и др.}$$

Это положение подтверждают графики на рис. 1, 2, 3, 4. Средняя величина энергонасыщенности (рис. 1) современных шнекороторных (фрезерно-роторных) снегоочистителей составляет $N/m = 10 \dots 16$ Вт/кг.

Основной недостаток зависимостей такого типа – отсутствие возможности получения оптимального решения. В этом случае необходимо вначале получить оптимальное решение на основании статистического анализа экспериментальных данных или аналитическим расчетом и оптимальный результат на основании зависимостей подобия обобщить на подобные объекты техники.

Оптимальные значения технических параметров в зависимости от условий эксплуатации определяются методом анализа математической модели четвертой координаты рабочего процесса технологической машины.

Математическая модель продолжительности рабочего цикла формируется на базе известного соотношения:

$$t_u = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{N_i}, \text{ с,} \quad (1)$$

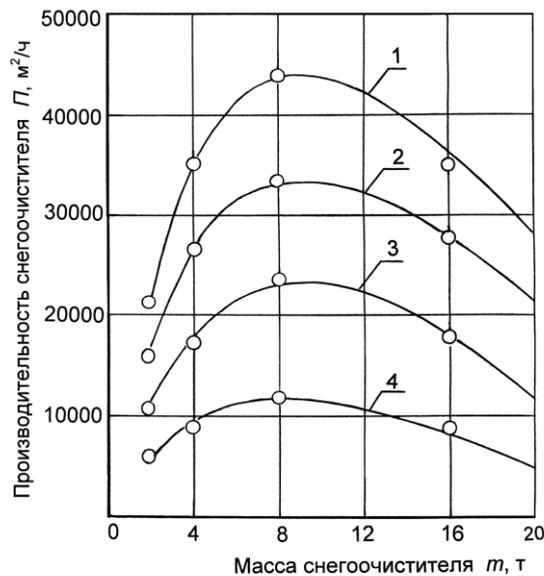


Рис. 1. Зависимость мощности двигателя от массы машины: о – фрезерно-роторные; Δ – шнекороторные снегоочистители.

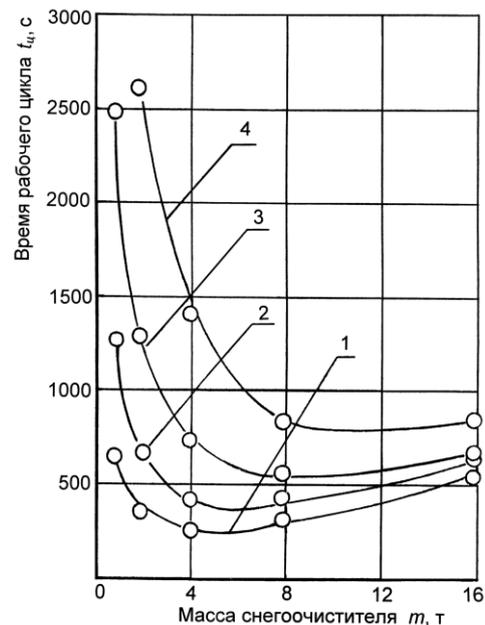


Рис. 2. Зависимость массы навесного рабочего оборудования от массы машины: о – фрезерно-роторные; Δ – шнекороторные снегоочистители.

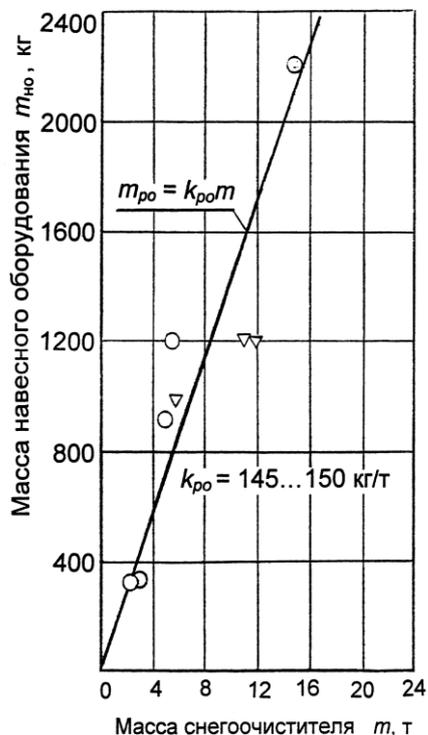


Рис. 3. Продолжительность рабочего цикла от массы машины: 1 – $k_{y\partial} = 0,006$ МПа; 2 – $k_{y\partial} = 0,012$ МПа; 3 – $k_{y\partial} = 0,025$ МПа; 4 – $k_{y\partial} = 0,05$ МПа.

где A_i – работа сил сопротивления, преодолеваемых машиной при выполнении i -й операции, например, при внедрении шнека (фрезы) в массив снега; Дж; N_i – мощность, которая может быть реализована машиной на выполнение i -й операции, Вт; n – число выполняемых машиной операций.

При расчете тягово-энергетических параметров машины учитываются все силы сопротивлений, преодолеваемых при движении: основного сопротивления движению при удалении снега, сопротивления передвижению самой машины, сопротивления от уклона местности, разгон и торможение, а также возможные простои.

Мощность на ведущих колесах определяется по реактивной силе тяги на колесе и скорости передвижения с учетом расхода мощности на движение самой машины.

$$N = T \cdot v_p, \text{ Вт},$$

$$T = mg \cdot f_1 \cdot k_\phi (1 - f \pm i)(1 - \delta) \eta k_{з\delta}, \text{ Н}.$$

После преобразования уравнения (1), получают общую упрощенную математическую модель четвертой координаты рабочего цикла роторного снегоочистителя

$$t_y = \frac{A}{m} + B \cdot m, \text{ с}, \quad (2)$$

$$t_y = \frac{k_{\delta\ddot{a}\bar{n}} \cdot F_{\delta i} \cdot l_\delta}{mg \cdot f_1 \cdot v_\delta \cdot k_\delta} + \frac{mg \cdot l_x}{N}, \text{ с},$$

где m – эксплуатационная масса роторного снегоочистителя, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; k_p – аналитическо-экспериментальный безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации и затрат на вспомогательные операции (сопротивление движителя, уклон, буксование и др.),

$$k_p = k_\phi (1 - f_p \pm i)(1 - \delta) \eta k_{з\delta},$$

где k_ϕ – коэффициент распределения массы на ведущие колеса; f_p – коэффициент сопротивления передвижению снегоочистителя при рабочей операции; i – уклон местности; δ – коэффициент буксования; η – к.п.д. привода рабочего органа; $k_{з\delta}$ – коэффициент загрузки двигателя при работе; f_1 – коэффициент сцепления, сопротивления движению колеса с дорогой, для тяжелого тягового режима $f_1 = \varphi_{сч}$, для транспортного режима f_1 коэффициент сопротивления движению колеса с дорогой $f_1 = f$; A, B – экспериментально-аналитические коэффициенты,

$$A = \frac{k_{\delta\ddot{a}\bar{n}} \cdot F_{\delta i} \cdot l_\delta}{g \cdot f_1 \cdot v_\delta \cdot k_\delta}, \text{ кг}\cdot\text{с};$$

$$B = \frac{g \cdot l_x}{N}, \text{ с/кг}.$$

Анализ математической модели продолжительности рабочего цикла (2) показывает, что величина t_y зависит от массы машины. Это положение подтверждается графиком, приведенным на рис. 3.

Оптимальное значение массы роторного снегоочистителя определяется на основании соотношения $dt_y/dm = 0$ или

$$\frac{d}{dm} \left(\frac{A}{m} + B \cdot m \right) = 0.$$

Здесь и ниже приняты следующие обозначения:

$k_{y\delta.c}$ – удельное сопротивление внедрения и отделения снега от массива рабочим органом снегоочистителя, экспериментальная табличная величина; F_{po} – площадь сечения траншеи, остающейся после удаления снега,

$$F_{po} = b_m H_m k_F, \text{ м}^2,$$

где b_m – ширина захвата снегоочистителя, м; H_m – высота траншеи (слоя удаляемого снега), м; k_F – безразмерный коэффициент, определяющий площадь сечения элементов рабочего органа, внедряющегося в грунт, $k_F = 0,5 \dots 1,0$; при расчете производительности снегоочистителя принимают $k_F = 1,0$; при расчете мощности на передвижение базового тягача $k_F = 0,5$; l_p – дальность рабочего перемещения снегоочистителя, м; m_m – масса (эксплуатационная) тягача без рабочего оборудования, кг; m_{po} – масса рабочего оборудования, кг; v_p – рабочая скорость снегоочистителя, скорость подачи, м/с; k_2, k_{po}, k_{mm} – размерные коэффициенты подобия; N – мощность двигателя, необходимая для обеспечения рабочей скорости (подачи) базового тягача при внедрении в массив снега, кВт; f_x – коэффициент сопротивления передвижению снегоочистителя в холостом (транспортном) режиме; l_x – дальность транспортного (холостого) перемещения снегоочистителя, м; k_x – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации при холостом передвижении,

$$k_x = k_{\phi} (1 - f_x i)(1 - \delta) \eta k_{3\delta}.$$

Оптимальная величина массы снегоочистителя определяется на основании минимизации продолжительности рабочего цикла машины. Из выражения $dt_{\phi}/dm = 0$ отыскивается оптимальное значение массы, при которой время цикла является минимальным, а производительность – максимальной.

$$m_{\text{н\ddot{o}}} = \left(\frac{k_{\delta\ddot{a}c} \cdot N \cdot F_{\delta i} \cdot l_p \cdot k_{\delta}}{g^2 \cdot f_1 \cdot v_{\delta} \cdot f_x \cdot l_x \cdot k_p} \right)^{1/2},$$

кг. (3)

Формула справедлива при ограничениях $l_x > 0$; $l_x \geq l_p$; $l_p \geq h$.

Рабочая скорость резания снега

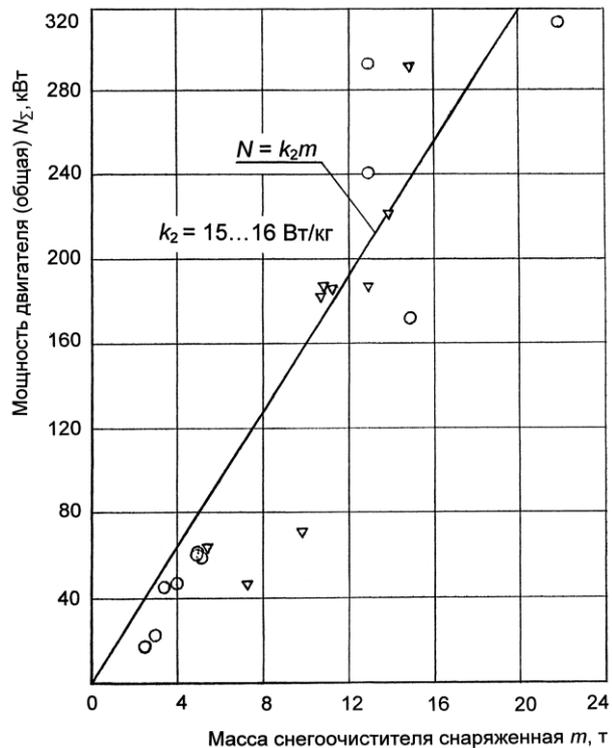


Рис. 4. Производительность снегоочистителя в зависимости от его массы: 1 – $N = 200$ кВт; 2 – $N = 150$ кВт; 3 – $N = 100$ кВт; 4 – $N = 50$ кВт.

в забое v_p определяется отношением величины подачи снегоочистителя h к величине времени одного оборота шнека $t_{об.ш.}$. На основании рассмотренного скорость резания или скорость подачи снегоочистителя определяется по формуле:

$$v_{\delta\acute{a}} = \frac{N \cdot k_p}{k_{\acute{o}\acute{a}\acute{n}} \cdot F_{\delta\acute{i}}}, \text{ м.} \quad (4)$$

Рабочая скорость снегоочистителя увеличивается с ростом мощности и уменьшением прочности снега $k_{y\delta.c}$ и площади сечения удаляемого снежного покрова F_{po} . При определении величины F_{po} необходимо для соответствующих условий работы определить коэффициент k_F , как указано выше.

Анализ соотношения (3) показывает, что масса снегоочистителя увеличивается с ростом прочности снега и площади сечения разрабатываемой траншеи или торцевой поверхности рабочего органа взаимодействующего со снегом. Масса машины увеличивается, также с ростом дальности рабочего хода и сокращается с ростом холостого хода.

Мощность двигателя определяется, принимая во внимание имеющее место отношения (3):

$$N = \frac{m^2 \cdot g^2 \cdot f_1 \cdot v_{\delta} \cdot f_{\delta} \cdot l_{\delta} \cdot k_{\delta}}{k_{\acute{o}\acute{a}\acute{n}} \cdot F_{\delta\acute{i}} \cdot l_{\delta} \cdot k_x}. \quad (5)$$

Здесь k_2 – размерный коэффициент подобия, см. рис. 1.

Принимают $k_2 = N/m = 10...16$ Вт/кг. Последнее значение имеет место для энергонасыщенных снегоочистителей. Приведенные зависимости справедливы для приближенно подобных машин, имеющих одинаковые уравнения, описывающие рабочий процесс, и приближенно равные критерии подобия, см. рис. 1-4. Приведенные графики иллюстрируют это положение.

Техническая производительность снегоочистителя устанавливается на основании соотношения:

$$\Pi = F_{po} \cdot v_p, \text{ м}^3/\text{с.}$$

Анализ математической модели четвертой координаты (времени) рабочего процесса системы позволяет получить оптимальные исходные технико-эксплуатационные параметры проектируемой машины в зависимости от условий эксплуатации.

Шнекороторные (фрезерно-роторные) снегоочистители с оптимальными параметрами, см. зависимости (3), (4) и др., в соответствующих условиях эксплуатации обеспечивают наименьшую продолжительность рабочего цикла,

максимальную производительность и минимальные расходы. Обеспечивается минимальная себестоимость удаления единицы снега и наибольшая прибыль. МАДИ разработана компьютерная программа расчета оптимальных параметров машины в зависимости от вероятностных условий эксплуатации.

Предлагаемый метод определения тягово-энергетических и технико-эксплуатационных параметров на практике может быть использован для выбора наиболее эффективных шнекороторных (фрезерно-роторных) снегоочистителей из числа имеющихся в парке или предлагаемых на рынке. На этапе проектирования метод целесообразно использовать на стадии формирования технического задания для определения исходных параметров проектируемой машины. Уточнение технических параметров осуществляется на последующих этапах проектирования на основе традиционных методов расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баловнев, В.И. Определение параметров и выбор землеройных машин: учеб. пособие / В.И. Баловнев. – М., Омск: ЗАО «Полиграф», 2010. – 224 с.
2. Машины для земляных работ: конструкция, расчет, потребительские свойства: в 2 кн. Кн. 1. Экскаваторы и землеройно-транспортные машины: учебное пособие для вузов / В.И. Баловнев, С.Н. Глаголев, Р.Г. Данилов [и др.]; под общ. ред. В.И. Баловнева. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. – 401 с.
3. Машины для земляных работ: конструкция, расчет, потребительские свойства: в 2 кн. Кн. 2. Погрузочно-разгрузочные и уплотняющие машины: учебное пособие для вузов / В.И. Баловнев, С.Н. Глаголев, Р.Г. Данилов [и др.]; под общ. ред. В.И. Баловнева. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. – 464 с.
4. Машины для содержания городских и автомобильных дорог: Кн. 1. Содержание дорог в летний период: учебное пособие для вузов / В.И. Баловнев, Р.Г. Данилов, А.Г. Савельев, под общ. ред. В.И. Баловнева. – 3-е изд., доп. и перераб. – М.: Техполиграфцентр, 2013. – 333 с.
5. Машины для содержания городских и автомобильных дорог: Кн. 2. Содержание дорог в зимний период: учебное пособие для вузов / В.И. Баловнев, Р.Г. Данилов, А.Г. Савельев, под общ. ред. В.И. Баловнева. – 3-е изд., доп. и перераб. – М.: Техполиграфцентр, 2013. – 343 с.