

## **РАСЧЕТ ТРЕБУЕМОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ КОММУНАЛЬНОЙ МАШИНОЙ НА УНИВЕРСАЛЬНОМ ШАССИ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ**

*Колесниченко Д.С., Пушкарев А.Е.*

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,  
Санкт-Петербург*

**Ключевые слова:** автомобиль, коммунальная машина, очистка дорог от снега и льда, очистка дорог от пыли, электрический двигатель, универсальное шасси.

**Аннотация.** Выдвинуто предположение о возможности создания коммунальной машины с электрической силовой установкой, способной выполнять широкий спектр технологических операций. Рассмотрены параметры коммунальных машин, оснащенных ДВС. В качестве характеристик прототипа коммунальной машины с электродвигателем выбраны параметры, которыми обладают распространенные коммунальные машины на шасси грузовиков с дизельными двигателями. Рассмотрены отличия применения схем с одной и двумя силовыми установками для дизельных и электрических машин. Приведены расчеты требуемой мощности для выполнения различных технологических операций, таких как очистка дорог от снежно-ледяных отложений в зимний период, смет пыли и орошение – в летний. По результатам расчетов выявлен необходимый запас мощности электродвигателя на выполнение технологических операций коммунальной машиной. Обоснована возможность создания коммунальных машин на универсальных шасси с электрическим приводом.

## **CALCULATION OF THE REQUIRED POWER TO PERFORM VARIOUS TECHNOLOGICAL OPERATIONS BY A UTILITY VEHICLE ON A UNIVERSAL CHASSIS WITH AN ELECTRIC POWER PLANT**

*Kolesnichenko D.S., Pushkarev A.E.*

*Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg*

**Keywords:** car, utility vehicle, road cleaning from snow and ice, road cleaning from dust, electric motor, universal chassis.

**Abstract.** This article discusses the possibility to create a utility vehicle with an electric power plant capable of performing a wide range of technological operations. The parameters of utility vehicles equipped with internal combustion engines are considered. As characteristics of the prototype of a utility vehicle with an electric motor, the parameters that are possessed by common utility vehicles on the chassis of trucks with diesel engines are selected. The differences between the use of circuits with one and two power plants for diesel and electric machines are considered. Calculations of the required capacity for performing various technological operations, such as cleaning roads from snow and ice deposits in winter, dust estimates and irrigation in summer, are given. According to the results of calculations, the necessary reserve of electric motor power for performing technological operations by a utility machine has been identified. The possibility of creating utility vehicles on universal chassis with electric drive is substantiated.

### **Введение**

Современные коммунальные машины, оснащенные двигателями внутреннего сгорания, работающими, как правило, на дизельном топливе выполняют подавляющее большинство технологических операций по очистке дорог и придомовых территорий от пыли и грязи летом, и от снежно-ледяных отложений зимой.

Большинство коммунальных машин на автомобильных шасси выполнено по схеме с двумя силовыми установками: основной для перемещения машины и вспомогательной для привода рабочих органов. Как правило, используется штатная основная силовая установка грузовика, на который устанавливается специализированное оборудование коммунальной машины. Мощность вспомогательной установки может быть, как значительно меньше мощности основной [1, 2], так и равной или большей [3, 4] в зависимости от типа выполняемых технологических операций. Поэтому в качестве вспомогательной установки

могут использоваться как сравнительно компактные 4-х цилиндровые рядные дизельные двигатели с турбонаддувом [5], так и V-образные 8-ми цилиндровые дизели с турбонаддувом.

В случае разработки коммунальной машины на шасси с электрическим мотором, разумно использовать одну силовую установку для решения как транспортной, так и технологической задачи. Применение одной силовой установки позволяет использовать готовые шасси с электрическими двигателями, обеспечить простоту конструкции без необходимости размещать аккумуляторные батареи для вспомогательного электромотора, или его подключения к аккумуляторным батареям основного.

### Особенности расчета потребной мощности на технологическую работу

Транспортная работа хороша изучена и рассчитывается по единой методике, технологическая при этом не имеет единой методики расчета, так как существует множество технологических операций, которые требуют разных уровней потребной мощности. Для обоснования потребной мощности для выполнения технологической задачи необходимо определить список технологических операций, которые должна выполнять коммунальная машина на универсальном шасси с электрическим двигателем. Для обеспечения возможности применения такой машины на протяжении всего года, необходимо, чтобы она могла производить очистку от снежно-ледяных отложений в зимний период с помощью плужного, шнекороторного снегоочистителей и разбрасывателя реагента, и от пыли и грязи в летний с помощью вакуумной подметально-уборочной установки. В качестве прототипов для расчета можно использовать существующие коммунальные машины с ДВС и механическими или автоматическими трансмиссиями.



Рис. 1. Коммунальные машины: а) с плужным снегоочистителем, цилиндрической щеткой и разбрасывателем реагента; б) с вакуумной подметально-уборочной установкой

Для расчетов принимаются массогабаритные параметры, которыми обладают распространенные коммунальные машины на таких шасси, как КАМАЗ-53605, МАЗ-5337А2-383, Урал 4320-1151-61. Технические параметры принимаются аналогичными параметрам машин ВКМ 6500, УКМ-6500, КО-318, Vucher CityFant 6000, а также параметрам навесного оборудования, которое может устанавливаться на коммунальные машины и трактора МТЗ-80/82. Основные параметры, принимаемые для расчетов, приведены в таблице 1.

Табл. 1. Основные параметры коммунальной машины на универсальном шасси, принимаемые для расчетов

Наименование параметра	Обозначение	Величина	Единица измерения
Полная масса машины	$G_m$	15000	кг
Линейная скорость движения машины	$v_m$	2,78	м/с
Объем бункера для смета	$V_b$	6,5	м <sup>3</sup>
Ширина полосы подметания	$B_n$	2,3	м
Ширина полосы, обрабатываемой реагентом	$B$	2,5	м
КПД главной передачи	$\eta$	0,98	-
КПД привода ротора	$\eta_{пр}$	0,8	-
КПД передачи от двигателя к щётке	$\eta_1$	0,85	-
КПД привода от двигателя к вентилятору	$\eta_{д.в}$	0,9	-

Табл. 1. Продолжение

Наименование параметра	Обозначение	Величина	Единица измерения
КПД вентилятора	$\eta_v$	0,8	-
Механический КПД насоса	$\eta_m$	0,7	-
Гидравлический КПД насоса	$\eta_n$	0,65	-
Диаметр лотковой щетки	$d$	0,7	м
Скорость концов ворсинок щётки	$v_{щ}$	7,2	м/с
Угловая скорость цилиндрической щётки	$\omega$	25	рад/с
Угловая скорость лотковой щётки	$\omega_{л.щ}$	14	рад/с
Момент, обеспечивающий деформацию ворса	$M_\delta$	675	Н·м
Средняя высота удаляемого слоя снега	$h_{ср}$	0,15	м
Ширина отвала	$L$	2,4	м
Угол установки отвала	$\varphi$	50	°

### Расчет роторного оборудования

Высокопроизводительные снегоочистители обеспечивают производительность до 1500 т/ч. Прицепные снегоочистители для тракторов тягового класса 1,4, таких как широко распространенный МТЗ-82 в зависимости от конструкции обеспечивают производительность от 80 т/ч до 500 т/ч. Для расчетов примем распространенную схему с одним ротором и гидроприводом от одного двигателя.

Грубо потребная мощность может быть оценена по формуле

$$N_p = Q \cdot L / 120, \text{ кВт}, \quad (1)$$

где  $Q$  – часовая производительность снегоочистителя, т/ч;  $L$  – дальность отбрасывания снега ротором, м,  $L = 30$  м.

Мощность для привода снегоочистителя  $N_c$

$$N_c = \frac{N_p + 2 \cdot N_\phi}{\eta_{np}}, \text{ кВт}, \quad (2)$$

где  $N_p$  – мощность для привода ротора, кВт;  $N_\phi$  – мощность на привод одной шнековой фрезы, кВт.

Табл. 2. Твердость снега

Вид снега	Плотность снега, г/см <sup>3</sup>	Твердость снега, Н/см <sup>2</sup> , при температуре от –1 до –20°С
Рыхлый	менее 0,25	До 5
Слабо уплотненный	0,26-0,35	6-10
Плотный	0,36-0,50	21-200
Очень плотный	0,51-0,60	38-300

Примем плотность снега 0,4 г/см<sup>3</sup>, или 0,4 т/м<sup>3</sup>. Тогда весовая производительность снегоочистителя составит  $Q = 400$  т/ч. Подставляя значения в формулу (1), получаем мощность для привода ротора равную 100 кВт.

Примем параметры ротора и шнековых фрез равными параметрам этих элементов на распространенном шнекороторном снегоочистителе ДЭ-226, который монтируется на базе автомобиля Урал-4320. Таким образом, принимаем количество роторов равным 1; диаметр ротора – 1220 мм; число шнеков – 2; диаметр шнековой фрезы – 550 мм; угловая скорость вращения шнековой фрезы – 295 об/мин.

Мощность  $N_\phi$ , расходуемую на привод шнекового питателя, определим по формуле, рекомендованной ВНИИземмаш для практических расчетов,

$$N_\phi = 0,0055 \cdot Q \cdot v_\phi / \eta_\phi, \text{ л.с.}, \quad (3)$$

где  $v_\phi$  – окружная скорость шнекового питателя, м/с.

Производительность шнекового питателя равна производительности ротора,  $Q=400$  т/ч. Пусть на один шнек приходится половина производительности – 200 т/ч. Так как угловая скорость шнековой фрезы снегоочистителя ДЭ-226 равна  $n = 295$  об/мин, то окружная скорость фрезы

$$v_{\phi} = \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot \frac{D_{\phi}}{2}, \text{ м/с.} \quad (4)$$

Подставляя значения в формулу (4), получаем  $v_{\phi} = 8,5$  м/с. Подставляя значения в формулу (3), получаем требуемую для одного шнека мощность в 11,69 л.с. или 8,6 кВт. Подставляя значения в формулу (2), получаем требуемую мощность в 146,5 кВт. Таким образом, для обеспечения заданной производительности в 400 т/ч необходимо иметь запас мощности электромотора в 146,5 кВт.

### Расчет вакуумного подметально-уборочного оборудования

Мощность, необходимая для работы машины, снабжённой одной или двумя лотковыми щётками, цилиндрической щёткой-подборщиком и транспортирующим устройством механического или пневматического типа

$$N_{\Sigma м} = N_{щ.ц} + N_{щ.л} + N_m + N_y, \quad (5)$$

где  $N_{щ.ц}$  – мощность, необходимая для работы главной щетки-подборщика;  $N_{щ.л}$  – мощность, необходимая для работы лотковых щёток;  $N_m$  – мощность, необходимая для работы транспортирующего устройства;  $N_y$  – мощность, необходимая для работы системы увлажнения.

Мощность для привода цилиндрической щётки подборщика

$$N_{щ.ц} = N_{mp} + N_{деф} + N_{\epsilon} + N_o, \quad (6)$$

где  $N_{mp}$  – мощность, затрачиваемая на преодоление трения ворса щётки о поверхность дорожного покрытия;  $N_{деф}$  – мощность, затрачиваемая на деформирование ворса щётки;  $N_{\epsilon}$  – потери мощности на преодоление сопротивления воздуха;  $N_o$  – мощность, необходимая для отделения загрязнений и отбрасывания их.

Мощность, затрачиваемая на преодоление трения ворса щётки о поверхность дорожного покрытия,

$$N_{mp} = \frac{P \cdot f_{\epsilon} \cdot v_{щ}}{1000 \cdot \eta_1} + \frac{P \cdot f_{\epsilon} \cdot v_m}{1000 \cdot \eta}, \text{ кВт,} \quad (7)$$

где  $P$  – вертикальная реакция дороги, действующая на ворс щётки, Н;  $f_{\epsilon}$  – коэффициент трения ворса о дорожное покрытие;  $v_{щ}$  – скорость концов ворсинок щётки, м/с.

Мощность на деформирование ворса

$$N_{деф} = \frac{M_{\delta} \cdot \omega}{(1000 \cdot \eta_1)}, \text{ кВт.} \quad (8)$$

При работе щётки первого вида, т.е. со сплошным равномерным распределением ворса на сердечнике, потерями мощности на преодоление сопротивления воздуха обычно пренебрегают и считают  $N_{\epsilon} = 0$ . Измерения показывают, что отделение загрязнений и отбрасывание их происходит за счёт потенциальной энергии, накапливаемой при деформации ворса щётки. Поэтому обычно принимают  $N_o = 0$ .

Примем вертикальную реакцию  $P$  равной 3000 Н; коэффициент трения ворса  $f_{\epsilon} = 0,4$ . Подставляя значения в формулу (7), получаем  $N_{mp} = 13,6$  кВт. Подставляя значения в формулу (8), получаем  $N_{деф} = 19,85$  кВт. Тогда мощность для привода цилиндрической щётки подборщика  $N_{щ.ц}$  по формуле (6) равна 33,45 кВт.

Мощность для привода лотковой щётки

$$N_{щ.л} = N_m + N_{\delta}, \quad (9)$$

где  $N_m$  – мощность на преодоление силы трения;  $N_{\delta}$  – мощность на деформирования ворса

Мощность, необходимая для преодоления силы трения при работе лотковой щётки

$$N_m = \frac{P \cdot f_s \cdot r_1 \cdot \omega}{1000 \cdot \eta}, \text{ кВт}, \quad (10)$$

где  $r_1$  – среднее расстояние от оси щётки до точки приложения реакции.

Мощность, необходимая для деформирования

$$N_d = \frac{0,25 \cdot M \cdot i \cdot \omega}{1000 \cdot \eta_1}, \text{ кВт} \quad (11)$$

где момент, необходимый для деформации ворса,

$$M = \beta \cdot E \cdot J \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{q \cdot \sin \varphi_0 - q \cdot \sin \varphi_1 - \cos \varphi_0 + \cos \varphi_1}, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (12)$$

где  $\varphi_1 = 0,5\pi - \theta_1$ ;  $\varphi_0$  – угол, составленный ворсинкой в месте её закрепления на горизонтальной оси,  $E \cdot J$  – жёсткость ворсинки,  $\text{Н} \cdot \text{см}^2$ ,  $\beta = 2,6 \cdot \arccos(r - \Delta L / r)$ , где  $r$  – радиус щетки,  $\Delta L$  – деформация ворса;  $q$  – плотность загрязнений, на магистралях города не должна превышать  $30 \text{ г/м}^2$ , на улицах, пересекаемых проездами, не имеющими усовершенствованных покрытий, а также на проездах второстепенного значения плотность  $q$  загрязнений не должна превышать соответственно  $50$  и  $80 \text{ г/м}^2$  [8].

Количество ворса  $i$ , необходимого для работы лотковых щёток,

$$i = 2\pi \cdot v_m \cdot K_p / (\omega_{л.щ} \cdot d), \quad (13)$$

где  $K_p = 3 \dots 4$ .

Примем жёсткость ворсинки  $EJ$  равной  $10 \text{ Н} \cdot \text{см}^2$ ,  $\varphi_0$  равным  $79,3^\circ$ ,  $\theta_1 = 33,3^\circ$  или  $0,58 \text{ рад}$ ;  $q = 80 \text{ г/м}^2$ , тогда  $\beta = 3,614$ ;  $\varphi_1 = 56,72^\circ$ ; подставляем значения в формулу (12) и получаем момент, необходимый для деформации ворса,  $M = 177,95 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . Подставляем значения в формулу (13) и получаем количество ворса  $i = 7,126$ ; подставляем значения в формулу (11) и получаем  $N_d = 5,22 \text{ кВт}$ . Примем среднее расстояние от оси щётки до точки приложения реакции  $r_1$  равным  $0,375 \text{ м}$ , тогда по формуле (10)  $N_m = 6,42 \text{ кВт}$ ; по формуле (9) мощность для привода лотковой щётки  $N_{щл} = 11,64 \text{ кВт}$

Мощность для привода вентилятора

$$N_e = Q \cdot p_e \cdot 10^{-3} / (1000 \cdot \eta_{д.в} \cdot \eta_e), \text{ кВт} \quad (14)$$

где  $Q$  – производительность вентилятора,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $p_e$  – разрежение воздуха на входе в вентилятор, Па.

Производительность вентилятора

$$Q = \frac{B_n \cdot v_m \cdot q_c \cdot K_{зан}}{\mu_k \cdot \rho_{в.н}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (15)$$

где  $B_n$  – ширина подметания, (м);  $q_c$  – загрязненность дорожного покрытия, ( $\text{кг/м}^2$ );  $K_{зан}$  – коэффициент запаса;  $\mu_k$  – коэффициент, характеризующий допустимую массовую концентрацию твердых частиц, транспортируемых потоком воздуха;  $\rho_{в.н}$  – плотность воздуха в вакуумном подборщике, ( $\text{кг/м}^3$ )

Примем загрязненность  $q_c = 1,2 \text{ кг/м}^2$ ; коэффициент запаса мощности  $K_{зан} = 1,1$ ; коэффициент  $\mu_k = 0,1$ ; плотность воздуха в вакуумном подборщике  $\rho_{в.н} = 1,12 \text{ кг/м}^3$ , подставляем значения в формулу (15) и получаем производительность вентилятора  $Q = 75,36 \text{ м}^3/\text{с}$ . Примем разрежение  $p_e$  равным  $15000 \text{ Па}$ , подставляем значения в формулу (14) и получаем, что мощность для привода вентилятора  $N_e = 1,57 \text{ кВт}$ .

Мощность для привода насоса, создающего давление в сети для увлажнения,

$$N_y = Q_1 \cdot p_n / (\eta_m \cdot \eta_n), \text{ Вт} \quad (16)$$

где  $Q_1$  – подача насоса,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $p_n$  – давление, Па.

Примем подачу насоса  $Q_1$  равной  $0,013 \text{ м}^3/\text{с}$ ; давление  $p_n = 1000000 \text{ Па}$ ; подставляем значения в формулу (16) и получаем  $N_y = 28,57 \text{ кВт}$ . Таким образом, мощность, необходимая для работы машины по формуле (5)  $N_{\Sigma M} = 75,23 \text{ кВт}$ . Рассчитанная мощность соответствует мощности автономных ДВС, используемых на вакуумных подметально-уборочных машинах для привода рабочих органов. На КО-318А используется дизельный двигатель Д-245 мощностью  $80 \text{ кВт}$ , на Bucher CityFant 6000 используются дизельные двигатели Mercedes-

Benz OM 904 и John Deere мощностью 75 кВт, на ВКМ 6500 – дизельный двигатель Cummins мощностью 82 кВт, на KRS 60 – дизельный двигатель JCB 85 кВт.

### Расчет оборудования для очистки от снежно-ледяных отложений

Расход реагента

$$Q = v_m \cdot B \cdot q_p, \text{ л/мин}, \quad (17)$$

где  $q_p$  – норма расхода реагента, мл/м<sup>2</sup>.

Мощность на привод оборудования для гидроабразивной очистки [7]

$$N_{zo} = N_{n.m} + N_{n.ж}, \quad (18)$$

где  $N_{n.m}$  – мощность для привода двигателя питателя твердого компонента;  $N_{n.ж}$  – мощность для привода насоса, создающего давление в сети для подачи жидкого компонента реагента.

Мощность для привода двигателя питателя твердого компонента реагента

$$N_{n.m} = K_3 \cdot \frac{0,2 \cdot Q}{360} (H + L \cdot \omega), \text{ кВт} \quad (19)$$

где  $K_3$  – коэффициент запаса по временному увеличению расхода реагента;  $Q$  – расход реагента м<sup>3</sup>/с;  $H$  и  $L$  – высота и длина транспортирования, м;  $\omega$  – общий коэффициент сопротивления движению.

Мощность для привода насоса, создающего давление в сети для подачи жидкого компонента реагента

$$N_{n.ж} = K_3 \cdot 0,8 \cdot Q \cdot p_n / (\eta_m \cdot \eta_n), \text{ Вт}. \quad (20)$$

Примем расход реагента  $q_p = 700$  мл/м<sup>2</sup> для борьбы со стекловидным льдом толщиной 2 мм согласно ОДМ 218.6.021-2019, тогда по формуле (17) расход реагента  $Q = 4865$  л/мин или 321 т/ч; коэффициент запаса  $K_3 = 1,4$ ;  $H$  и  $L$  соответственно 0,5 и 1 м; коэффициент сопротивления движению  $\omega = 5$ ; тогда по формуле (19)  $N_{n.m} = 1,4$  кВт.

Примем давление  $p_n$  равным 0,35 МПа, тогда по формуле (20)  $N_{n.ж} = 69,8$  кВт, по формуле (18) мощность на привод оборудования для гидроабразивной очистки  $N_{zo} = 71,2$  кВт.

### Расчет плужного снегоочистителя

Мощность необходимая для работы плужного снегоочистителя.

$$N_o = \frac{W' \cdot v_m}{1000 \cdot \eta}, \text{ кВт} \quad (21)$$

где  $W'$  – суммарное сопротивление, возникающее при взаимодействии отвала со средой и покрытием, Н;  $\eta$  – КПД главной передачи.

Суммарное сопротивление

$$W' = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6 + W_7, \quad (22)$$

где  $W_1$  – сила сопротивления снега резанию, Н;  $W_2$  – сила сопротивления перемещению снега перед отвалом, Н;  $W_3$  – сила сопротивления перемещению снега вдоль отвала, Н;  $W_4$  – сила, учитывающая инерцию снега, Н;  $W_5$  – сила сопротивления снега перемещению по отвалу, Н;  $W_6$  – сопротивление перемещению по отвалу, Н;  $W_7$  – сопротивление перемещению машины, Н

Сила сопротивления снега резанию находится:

$$W_1 = B_o \cdot h_{cp} \cdot k_{cp}, \text{ Н} \quad (23)$$

где  $B_o$  – ширина захвата отвала, м;  $k_{cp}$  – коэффициент сопротивления снега резанию, Па.

$$B_o = L \cdot \sin \varphi. \quad (24)$$

Подставляем значения в формулу (24) и получаем  $B_o = 1,84$  м. Принимаем  $k_{cp} = 2$  кПа и по формуле (23) получаем  $W_1 = 552$  Н.

Сила сопротивления снега перемещению перед отвалом возникает в результате трения призмы волочения снега о поверхность покрытия.

$$W_2 = g \cdot m_{np} \cdot f_2 \cdot \sin(\varphi + \delta), \text{ Н} \quad (25)$$

где  $m_{np}$  – масса призмы волочения, кг;  $f_2$  – коэффициент внутреннего трения снега о снег;  $\delta$  – угол трения о поверхность отвала, град;  $g$  – ускорение свободного падения.

$$m_{np} = \frac{B_0^2 \cdot \cos \delta \cdot h_{cp} \cdot \rho_c}{2 \sin \varphi \cdot \cos(\varphi + \delta)}, \text{ Н} \quad (26)$$

где  $\rho_c$  – плотность снега, кг/м<sup>3</sup>.

Плотность снега  $\rho_c = 300$  кг/м<sup>3</sup> примем согласно ГОСТ Р ИСО 4355-2016; коэффициент внутреннего трения снега  $f_2 = 0,35^\circ$  в соответствии с принятой плотностью [5]. По формуле (26)  $m_{np} = 172,15$  Н, по формуле (25)  $W_2 = 483,32$  Н

Сопротивление перемещения снега вдоль отвала возникает под воздействием силы трения в результате движения призмы волочения вдоль отвала.

$$W_3 = P_H \cdot tg \delta \cdot \cos \varphi, \text{ Н} \quad (27)$$

где  $P_H$  – ормальнная к отвалу составляющая сил инерции и трения призмы волочения,

$$P_H = \frac{B_o \cdot h_{cp} \cdot \rho_c \cdot v_m^2 \cdot \sin \varphi}{2} + \frac{B_0^2 \cdot \rho_c \cdot g \cdot tg \rho \cdot \cos^2 \delta}{2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos(\varphi + \delta)}, \text{ Н} \quad (28)$$

где  $\rho$  – угол внутреннего трения снега о снег, град.

По формуле (28)  $P_H = 4171,37$  Н; по формуле (27)  $W_3 = 227,92$  Н.

При рабочей скорости плужных снегоочистителей  $v_m > 1,5 \dots 2$  м/с учитывается сила инерции снега  $W_4$

$$W_4 = \frac{B_o \cdot h_{cp} \cdot \rho_c \cdot v_m^2 \cdot \sin^2 \varphi}{2 \cdot g}, \text{ Н} \quad (29)$$

По формуле (29)  $W_4 = 19,1$  Н.

Сопротивление снега перемещению по отвалу

$$W_5 = 0,5 \cdot P_H \cdot (tg \rho + tg \delta) \cdot \sin 2\alpha \cdot \sin \varphi, \quad (30)$$

где  $\alpha$  – угол резания, град;  $\rho = \arctg f_2$ .

По формуле (30)  $W_5 = 695$  Н.

Сопротивление перемещению отвала по снегу при установке его в плавающее положение

$$W_6 = G_{омв} \cdot (tg \delta + \tau), \text{ Н} \quad (31)$$

где  $\tau$  – уклон покрытия, примем равным 0;  $G_{омв}$  – вес отвала, Н, примем равным  $g \cdot 1600$ .

По формуле (31)  $W_6 = 1334,2$  Н.

Сопротивление перемещению машины

$$W_7 = G_m \cdot g \cdot (f + \tau), \text{ Н} \quad (32)$$

где  $f$  – коэффициент сопротивления перекачивания колеса, примем равным 0,028.

По формуле (32)  $W_7 = 4120,2$  Н. По формуле (22) суммарное сопротивление  $W' = 7431,7$  Н; а по формуле (21)  $N_\delta = 21,1$  кВт.

### Заключение

На основании проведенных расчетов можно сделать вывод о том, что наибольшей мощности требует операция уборки снега с помощью шнекороторного снегоочистителя, 146,5 кВт. Следовательно, электрическая силовая установка должна иметь запас мощности для выполнения технологической работы шнекороторного снегоочистителя не менее 150 кВт. При таком запасе мощности на технологическую работу коммунальная машина на универсальном шасси с электрическим двигателем сможет применяться и с вакуумной подметально-уборочной установкой, на которую требуется запас мощности в 75,23 кВт, а также одновременно с плужным снегоочистителем и установкой для гидроабразивного удаления льда, для совместной работы которых требуется запас мощности в 92,3 кВт.

### Список литературы

1. КАМАЗ-53605-48 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kamaz.ru/production/serial/samosvaly/kamaz-53605-a4/>
2. Подметально-вакуумная машина ВКМ 6500 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://merkatorgroup.ru/equipment/dorozhno-kommunalnaya-tekhnika/podmetalnye-mashiny-i-oborudovanie/podmetalno-vakuumnaya-mashina-vkm-6500/>

3. Снегоочиститель шнекороторный АМКОДОР 9531-03 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://amkodor.by/catalog/snegoochistiteli/amkodor-9531-03/>
4. Снегоочиститель шнекороторный Borus 4X11 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://borus124.ru/catalog/spetstekhnika/snegoochistiteli\\_shnekorotornye/snegoochistitel\\_shnekorotornyy\\_borus\\_4x11/](https://borus124.ru/catalog/spetstekhnika/snegoochistiteli_shnekorotornye/snegoochistitel_shnekorotornyy_borus_4x11/)
5. Cummins QSB4.5 (TIER 4 FINAL/STAGE IV) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cummins.com/engines/qs45-tier-4-finalstage-iv>.
6. Барахтанов Л.В., Беляков В.В., Блохин А.Н., Денисенко Е. Г. Математические зависимости физико-механических свойств снежного покрова как опорного основания для движения машин [Электронный ресурс] // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана – 2012. – №8. – Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/443019.html>.
7. Обоснование конструктивных параметров и режимов работы гидроабразивной установки для удаления льда с рабочих поверхностей объектов транспортной инфраструктуры в Арктических регионах: отчет о НИР / СПбГАСУ; исполн.: А.Е. Пушкарев, нормоконтр. Н.С. Феофанова. – Санкт-Петербург, 2022. – 37 с.
8. Кустарев Г.В., Данилов Р.Г., Андриюхов Н.М. Поливомоечные и комбинированные дорожные машины: устройство, основы расчета / Под общ. ред. к.т.н., проф. Г.В. Кустарева. – М.: МАДИ, 2023. – 226 с.
9. Желукевич Р.Б., Подвезенный В.Н., Безбородов Ю.Н., Кайзер Ю.Ф. Машины и агрегаты для содержания аэродромов: учеб. пособие / 2-е изд., перераб. и доп. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – 316 с.
10. Шестопалов К.К., Штефан С.В. Взаимодействие ворса со смётом и расчёт параметров цилиндрической щётки: методические указания. – М.: МАДИ, 2010. – 16 с.
11. Павлов С.А., Погонина А.М. Техника и технология содержания аэродромов в зимний период: учеб. пособие. – М.: МАДИ, 2021. – 246 с.
12. Кухарь И.В., Мартыновская С.Н. Машины и оборудования для очистки дорог и площадок в зимнее время // Эпоха науки. – 2019. – № 17. Технические науки. – С. 66-70.

#### References

1. KAMAZ-53605-48 [Electronic resource]. – Access mode: <https://kamaz.ru/production/serial/samosvaly/kamaz-53605-a4/>
2. VKM 6500 Vacuum Sweeper [Electronic resource]. – Access mode: <https://merkatorgroup.ru/equipment/dorozhno-kommunalnaya-tekhnika/podmetalnye-mashiny-i-oborudovanie/podmetalno-vakuumnaya-mashina-vkm-6500/>
3. Snowplow auger АМКОДОР 9531-03 [Electronic resource]. – Access mode: <https://amkodor.by/catalog/snegoochistiteli/amkodor-9531-03/>
4. Snowplow auger Borus 4X11 [Electronic resource]. – Access mode: [https://borus124.ru/catalog/spetstekhnika/snegoochistiteli\\_shnekorotornye/snegoochistitel\\_shnekorotornyy\\_borus\\_4x11/](https://borus124.ru/catalog/spetstekhnika/snegoochistiteli_shnekorotornye/snegoochistitel_shnekorotornyy_borus_4x11/)
5. Cummins QSB4.5 (TIER 4 FINAL/STAGE IV) [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.cummins.com/engines/qs45-tier-4-finalstage-iv>.
6. Barakhtanov L.V., Belyakov V.V., Blokhin A.N., Denisenko E.G. Mathematical dependences of the physico-mechanical properties of snow cover as a support base for the movement of machines [Electronic resource] // Science and education: scientific edition of Bauman Moscow State Technical University. 2012, no. 8. Access mode: <http://technomag.edu.ru/doc/443019.html>.
7. Substantiation of the design parameters and operating modes of a waterjet installation for removing ice from the working surfaces of transport infrastructure facilities in the Arctic regions: research report / SPbSASU; executive: A.E. Pushkarev, normokontrol N.S. Feofanova. – SPb., 2022. – 37 p.
8. Kustarev G.V., Danilov R.G., Andryukhov N.M. Irrigation and combined road machines: device, calculation basics / Under the gen. ed. of cand. of tech. sc., prof. G.V. Kustarev. – М.: МАДИ, 2023. – 226 p.
9. Zhelukevich R.B., Podvezenny V.N., Bezborodov Yu.N., Kaiser Yu.F. Machines and assemblies for the maintenance of airfields: textbook / 2nd ed., reprint and additional. – Krasnoyarsk: IPK SibFU, 2009. – 316 p.
10. Shestopalov K.K., Stefan S.V. Interaction of the pile with the estimate and calculation of the parameters of a cylindrical brush: methodological guidelines. – М.: МАДИ, 2010. – 16 p.
11. Pavlov S.A., Pogonina A.M. Technique and technology of airfield maintenance in winter: textbook. – М.: МАДИ, 2021. – 246 p.
12. Kukhar I.V., Martynovskaya S.N. Machines and equipment for cleaning roads and sites in winter // Age of science. 2019, no. 17, Technical sciences, pp. 66-70.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

<b>Колесниченко Даниил Станиславович</b> – аспирант	<b>Kolesnichenko Daniil Stanislavovich</b> – postgraduate student
<b>Пушкарев Александр Евгеньевич</b> – доктор технических наук, профессор <a href="mailto:daniilkolessnichenko@yandex.ru">daniilkolessnichenko@yandex.ru</a>	<b>Pushkarev Aleksandr Evgenievich</b> – doctor of technical sciences, professor

Получена 23.01.2024