

УДК 629.3

Ю.В. Кошелев, Д.А. Соколов, Ю.И. Молев

**ПОДВЕСКА РАБОЧЕГО ОРГАНА И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА СТЕПЕНЬ ОЧИСТКИ
ЗАСНЕЖЕННЫХ ДОРОГ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена вопросам взаимодействия плужного рабочего органа коммунальных машин со снежным покровом. Установлено, что нормальная работа снегоуборочной машины возможна только при скорости движения менее 1 м/с. Получены зависимости между параметрами и конструктивными решениями подвески отвала, геометрическими размерами базовой машины и объемом снега, остающимся на дороге после прохождения коммунальной машины.

Ключевые слова: коммунальная машина, плужный рабочий орган, заснеженные дороги, объем неубранного снега.

Резание льда и снега, находящегося на поверхности автомобильных дорог, плужным рабочим органом имеет ряд особенностей, обусловленных физико-механическими свойствами льда, снега и дорожной одежды, кинематическими параметрами рабочего процесса и расположения рабочего органа относительно снежно-ледяного покрова в процессе его удаления.

Разрушение льда и снега плужным рабочим органом осуществляется при помощи двух относительно независимых движений плуга – вертикального и горизонтального. При этом возможны три схемы работы снегоуборочной машины, разработанные на базе модели, предложенной А.Р. Пуртовым [4] для щёточного рабочего органа (рис. 1):

- а) схема фрезерования, когда плуг находится впереди транспортного средства;
- б) схема фрезерования, когда плуг находится посередине транспортного средства;
- в) схема фрезерования, когда плуг находится позади транспортного средства.

Рассмотрим кинематические и энергетические характеристики обоих процессов. При этом сопротивление, создаваемое системой гидравлического управления отвалом будем учитывать путём введения дополнительного момента сопротивления вращения отвала в шарнире.

Величину усилия резания на рабочем органе будем определять из суммы двух составляющих: усилия, собственно приходящегося на разрушение льда, определяемого из выражений, полученных в работах В.Ф. Кулепова, А.Р. Пуртова, А.М. Соколова [4] и силы трения отвала по очищаемой поверхности, зависящей не только от веса отвала, но и от уровня колебания рабочего органа, впервые учтённой в настоящей работе.

При равномерном движении автомобиля проекция всех сил на горизонтальную ось должна равняться 0, тогда проекция суммы сил на вертикальную ось примет вид:

$$G_{PO}g + F_{TP} \sin \alpha - N \cos \alpha = F_{\Sigma}^y \quad \text{или:} \quad G_{PO}g + N(f \sin \alpha - \cos \alpha) = F_{\Sigma}^y. \quad (1)$$

Следует отметить, что на процесс взаимодействия отвала с очищаемой поверхностью будет оказывать влияние и такой параметр, как способ установки отвала, а именно, расстояние от шарнира до режущей кромки (см. рис. 2). В дополнение к использованным обозначениям на рисунке обозначены: $z_{ш}$ – вертикальное перемещение упряжного шарнира; z_{PO} – искоемое перемещение режущей кромки рабочего органа; N_y – вертикальная составляющая реакции режущей кромки на очищаемую поверхность; l_4 – расстояние от горизонтальной оси упряжного шарнира до горизонтальной оси режущей кромки.

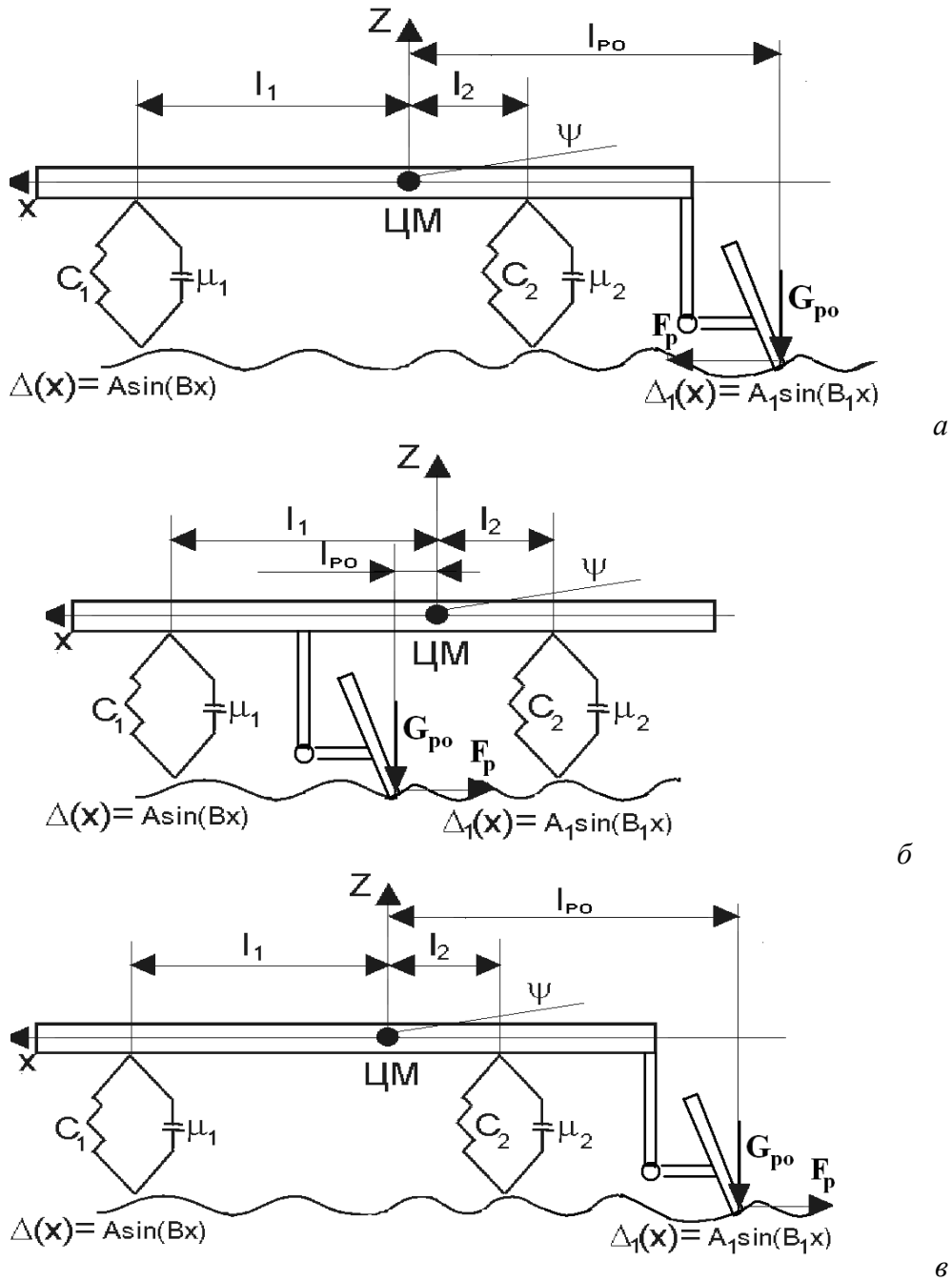


Рис. 1. Расчётные схемы к определению величин колебаний плужных рабочих органов:
 а – впереди базовой машины; б – по центры; в – позади базовой машины

Из представленной схемы (рис. 1) видно, что не вся масса рабочего органа участвует в прижатии рабочего органа к очищаемой поверхности. Действительную величину прижатия можно определить, составив уравнение моментов вокруг упругого шарнира:

$$G_{PO}l_2 \cos \alpha_1 \pm F_{\Sigma}^X l_1 - N_Y l_3 \cos \alpha_1 = 0, \quad (2)$$

где α_1 – угол наклона отвала относительно упругого шарнира, равный $\arccos \frac{z_{III} - z_{PO}}{l_4}$.

Знак \pm показывает разницу в характере движения отвала при расположении упругого шарнира до и после режущей кромки. Изменение усилия прижатия $\Delta N/N_Y$ можно определить спроектировав все силы на вертикальную ось: $\Delta N + N_Y = G_{PO}$, тогда уравнение (2) может быть записано в виде

$$G_{PO} = \frac{N_y l_3 \cos \alpha_1 \pm F_{\Sigma}^X l_1}{l_2 \cos \alpha_1} \quad (3)$$

С учётом того, что $N_y = G_{PO}(g + z'')$, дифференциальное уравнение движения рабочего органа примет вид

$$G_{PO} l_2 = G_{PO} l_3 + G_{PO} l_3 \frac{z''_{PO}}{g} \pm F_{\Sigma}^X \frac{l_1}{l_4} (z_{III} - z_{PO}) \quad (4)$$

или

$$z''_{PO} = g \left(\frac{l_2}{l_3} \pm \frac{F_{\Sigma}^X}{G_{PO}} \frac{l_1}{l_3} \frac{z_{III} - z_{PO}}{l_4} - 1 \right) \quad (5)$$

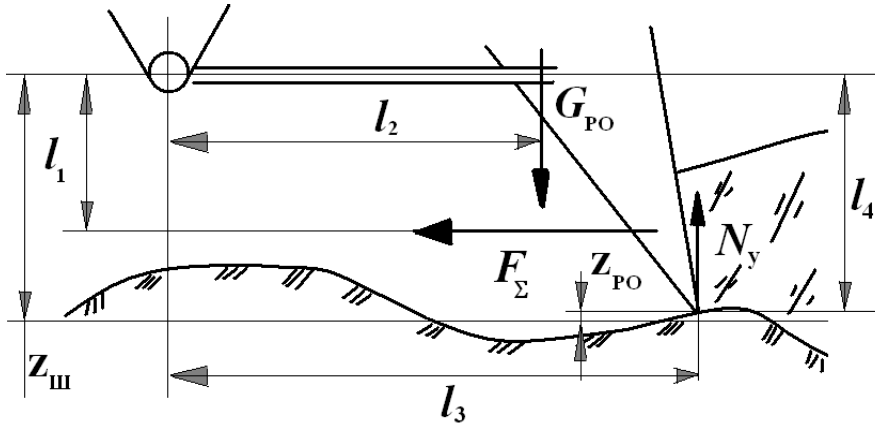


Рис. 2. Схема сил, действующих на отвал, шарнирно закреплённый на снегоуборочной машине

Суммарная горизонтальная сила состоит из силы тяги, развиваемой машиной, усилия резания снега и силы трения отвала по очищаемой поверхности. Величина этой силы может быть найдена из уравнения

$$F_{\Sigma}^X = \varphi \frac{G_{CM}}{G_{PO}} - F_P - ftg \left(-A \left(\frac{v_{PO}}{l} \right) \sin \left(\frac{v_{PO}}{l} t \right) \right) - f \frac{F_P}{G_{PO}} \sin \left(\frac{v_{PO}}{l} t \right) \quad (6)$$

где φ - коэффициент сцепления колёс автомобиля с дорогой; f - коэффициент трения между отвалом и очищаемой поверхностью; G_{CM} - вес снегоуборочной машины; v_{PO} - скорость движения рабочего органа; A - половина амплитуды колебаний очищаемой поверхности; l - длина волны колебания очищаемой поверхности.

Упругие шарниры снегоуборочных машин, имеющие жёсткую связь с корпусом, испытывают те же колебания, что и базовая машина. Колебания машины и упругого шарнира принято описывать системой уравнений, полученной из анализа схемы машины, приведённой в работе [4]:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{z} + \frac{2\dot{z}}{M_{II}} \sum_1^n \mu_{ai} + \frac{2z}{M_{II}} \sum_1^n C_{pi} &= \frac{2}{M_{II}} \left(\sum_1^n \mu_{ai} \dot{\zeta}_i + \sum_1^n C_{pi} \zeta_i \right) \\ \ddot{\psi} + \frac{2\dot{\psi}}{J_{II}} \sum_1^n \mu_{ai} l_i^2 + \frac{2\psi}{J_{II}} \sum_1^n C_{pi} l_i^2 &= \frac{2}{J_{II}} \left(\sum_1^n \mu_{ai} l_i \dot{\zeta}_i + \sum_1^n C_{pi} l_i \zeta_i \right) \\ \ddot{\zeta}_i + \frac{2\dot{\zeta}_i \mu_{ai}}{m_i} + \frac{2\zeta_i (C_{pi} + C_{Si})}{m_i} &= \frac{2}{m_i} \left(C_{Si} \Delta_i + \frac{2\dot{z} \mu_{ai}}{m_i} + \frac{2z}{M_{II}} \sum_1^n C_{pi} \right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где M_{II} - поддрессоренная масса машины; J_{II} - поддрессоренный момент инерции; l_i - расстояние от элементов подвески до центра массы машины; μ_{ai} - коэффициент сопротивления

амортизатора; C_{pi} , C_{Si} – коэффициенты жёсткости соответственно рессоры и шины; m – не-подрессоренная масса; Δ_l – высота неровностей рассматриваемой поверхности.

Левые части описывают свободные вертикальные и продольно-угловые колебания, а правые части описывают возмущающие воздействия. При решении данной системы уравнений ряд авторов [1, 3, 5] предлагает не рассматривать вынужденные колебания неподрессоренных масс. Расчёты, проведённые данными авторами, показывают, что при значительном упрощении вычислений данное допущение приводит к появлению дополнительной погрешности в пределах 8-12%.

Для учёта данной особенности введём в расчёты параметров колебаний поправочный коэффициент, равный 1,1. Кроме того, в работе [3] было уточнено, что если положение центра масс совпадает с центром упругости его осей, что характерно для вновь изготавливаемых автомобилей, то можно сделать ещё одно важное допущение – о независимости угловых и вертикальных перемещений машины. С учётом изложенного, а также считая, что рабочие органы не оказывают влияние на процесс колебаний, и подставляя в качестве возмущающей силы выражение $A \sin(vBx)$, выражение (7) примет вид

$$\left. \begin{aligned} \ddot{z} + \frac{2\dot{z}}{M_{II}} \sum_1^n \mu_{ai} + \frac{2z}{M_{II}} \sum_1^n C_{pi} + &= \frac{2}{M_{II}} \left(\sum_1^n \mu_{ai} ABv \cos(vBx) + \sum_1^n C_{pi} A \sin(vBx) \right) \\ \ddot{\psi} + \frac{2\dot{\psi}}{J_{II}} \sum_1^n \mu_{ai} l_i^2 + \frac{2\psi}{J_{II}} \sum_1^n C_{pi} l_i^2 + &= \frac{2}{J_{II}} \left(\sum_1^n \mu_{ai} l_i ABv \cos(vBx) + \sum_1^n C_{pi} l_i A \sin(vBx) \right) \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

В выражениях возмущающей силы величина A совпадает со значениями амплитуды, а vBx – с частотой возмущения, которая прямо пропорционально зависит от скорости движения машины v . Таким образом, для определения максимальных перемещений упряжного шарнира необходимо определить параметры возмущающего воздействия опорного основания.

Поскольку поверхность уплотнённого рабочими органами снега является случайной, стационарной, эргодичной нормально распределённой функцией, то можно найти значения максимальной высоты неровностей по правилу трёх сигм [4, 5]. Максимальная высота неровности в данном случае будет равняться шести среднеквадратичным значениям преобладающей неровности. Таким образом, анализ высот преобладающих неровностей поверхности разработанного плужным рабочим органом снега можно провести, исследовав зависимость среднеквадратичного отклонения высоты неровностей поверхности снега от средней оставшейся высоты снега на трассе.

Для отыскания данной закономерности у каждого участка во всех частотных диапазонах подсчитывались величины относительного среднего квадратичного отклонения высоты неровностей снега, которые служили ординатой точки и наносились на соответствующий график, где абсциссой точки являлось среднее значение высоты снежного покрова. Нахождение среднего квадратичного отклонения высоты неровностей в долях от средней толщины оставшегося снега позволило привести к единой зависимости участки с близкими значениями среднеквадратичных отклонений неровностей и получить зависимость среднего квадратичного отклонения поверхности снега для различных значений среднего квадратичного отклонения неровностей основания.

При аппроксимации все имеющиеся у рядов частоты в каждом диапазоне заменялись одной преобладающей частотой. Для этого было необходимо выяснить, насколько преобладающая в каждом диапазоне частота оказывает большее влияние на колебание транспортных средств, насколько рассеяна мощность внутри диапазонов, приходится ли она в основном на преобладающие частоты или рассредоточена по всему диапазону.

Анализ полученных данных позволил сделать следующие выводы. С ростом частоты неровностей высоты снега происходит их размывание по спектру, и всё больше, наряду с основной частотой, начинают играть роль и другие частоты. Полученные зависимости дают

возможность количественно оценить рассеяние частот относительно преобладающей для всех неровностей основания и снега. Результатом всего комплекса экспериментально-аналитических исследований стал выбор аппроксимационной зависимости изменения высоты уплотнённого снежного покрова, относительно трассы движения снегоуборочной техники, приведённый в работах [3– 5]:

$$\Delta_i(l) = 0,11225 \sin(12vl). \quad (9)$$

Таким образом, зная эксплуатационные параметры машины и частотную характеристику неровностей обрабатываемой поверхности, решая стандартную систему дифференциальных уравнений (8) с постоянными коэффициентами, получим зависимость изменения вертикальных и угловых колебаний транспортных средств. Зная характер колебаний центра тяжести автомобиля и его угловые перемещения, по законам геометрии можно определить линейные перемещения нижнего края рабочего органа.

Для оценки колебания габаритных точек снегоуборочных машин в рассматриваемых условиях, при движении со скоростью 25 км/час, по опорной поверхности, неровности которой описываются выражением (9), может быть предложено следующее аппроксимационное выражение:

$$\begin{cases} Z_{III} = \frac{2}{13+G_{CM}} \sin\left(\frac{v_{PO}}{l} t\right) & ; \text{ - для центра масс базовой машины} \\ Z_{III} = \{0,17 + (0,001(G_{CM} - 13)^2 - 0,0001G_{CM}^{2,4})\} \sin\left(\frac{v_{PO}}{l} t\right); & \text{ - для крайних точек базовой машины} \end{cases} \quad (10)$$

С учётом усилия резания полученное уравнение примет вид

$$\begin{aligned} z''_{PO} = g \left(\frac{l_2}{l_3} \pm \frac{\varphi \frac{G_{CM}}{G_{PO}} - F_P - ftg\left(-A\left(\frac{v_{PO}}{l}\right)\right) \sin\left(\frac{v_{PO}}{l} t\right) - f \frac{F_P}{G_{PO}} \sin\left(\frac{v_{PO}}{l} t\right)}{G_{PO}} \right) \times \\ \times \frac{l_1}{l_3} \frac{(0,17 + 0,01(G_{CM} - 13)^{1,3} - 0,0003G_{CM}^{1,9}) \sin\left(\frac{v_{PO}}{l} t\right) - z_{PO}}{l_4} - 1). \end{aligned} \quad (11)$$

Следует отметить, что представленное уравнение справедливо только для случая движения, когда снегоуборочная машина полностью использует своё тяговое усилие. Для случаев, когда следует рассматривать равномерное движение снегоуборочной машины, сила тяги, развиваемой последней должна составлять среднее значение сил сопротивления на рабочем органе:

$\varphi \frac{G_{CM}}{G_{PO}} = F_P + G_{PO} \frac{l_2}{l_3}$. Исходя из этого, уравнение (11) примет вид

$$z''_{PO} = \left(\frac{l_2}{l_3} \cos\left(\sin\left(\frac{v_{PO}}{l} t\right)\right) - 1 \right) g \pm \frac{F_P}{G_{PO}} tg\left(-A\left(\frac{v_{PO}}{l}\right)\right) \sin\left(\frac{v_{PO}}{l} t\right) \frac{l_1}{l_3 \cos \alpha_1}. \quad (12)$$

При этом перемещение рабочего органа относительно очищаемой поверхности определится из уравнения

$$Z_{PO} = z_{PO} - A \cos\left(\frac{v_{PO}}{l} t\right). \quad (13)$$

Решение указанных уравнений показано на рис. 3.

Из рисунка видно, что качество очистки дороги зависит в первую очередь от перемещения рабочего органа вниз относительно очищаемой поверхности.

Принимая за расчётный показатель максимальную величину остаточной толщины снежных накатов на дороге можем оценить влияние на процесс удаления снега таких пара-

метров, как толщина срезаемого рыхлого снега (рис. 4), скорость уборки (рис. 5) и массу рабочего органа (рис. 6).

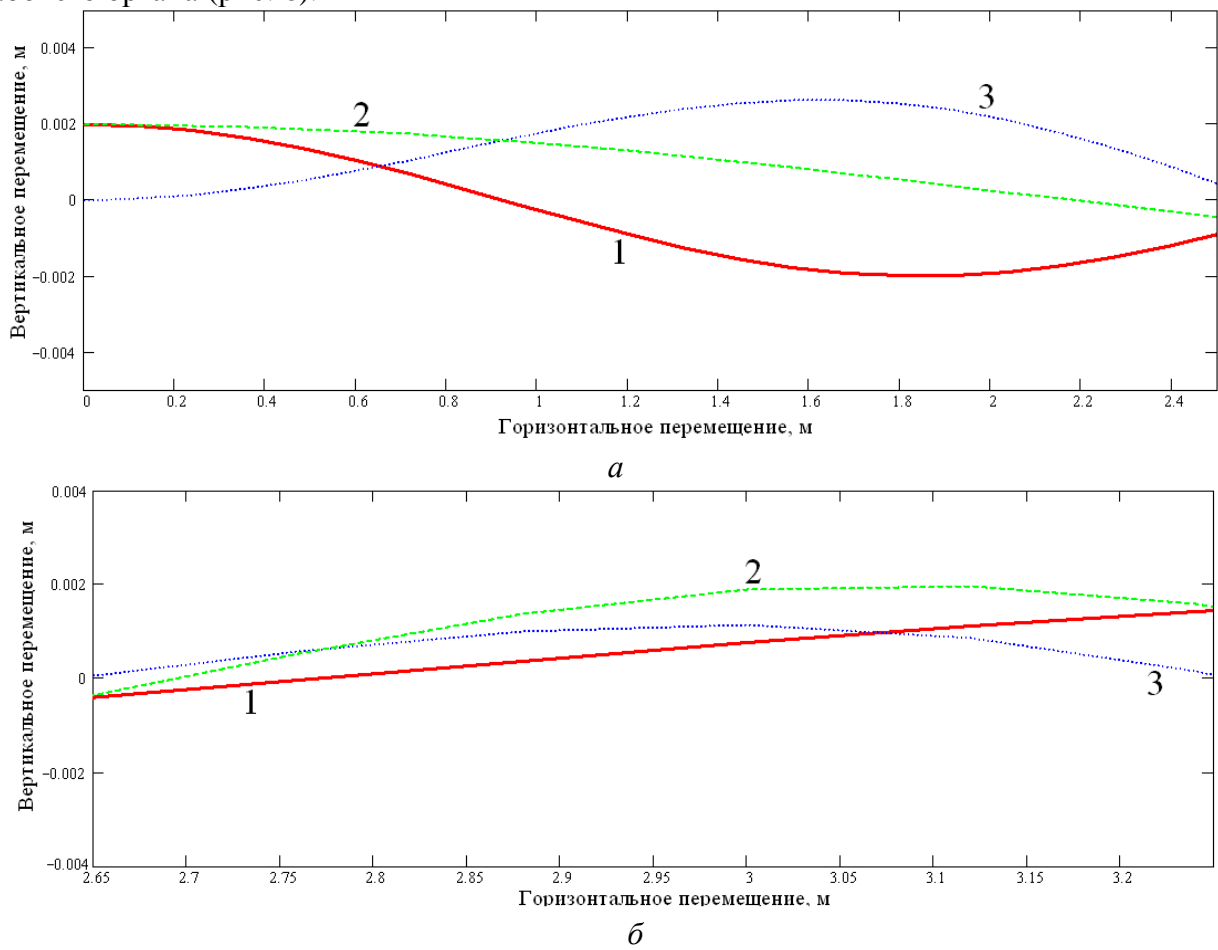


Рис. 3. Зависимость перемещения рабочего органа относительно очищаемой поверхности при движении со скоростью 1 м/с:

а – при перемещении отвала вниз; *б* – при перемещении отвала вверх;

1 – профиль очищаемой поверхности; *2* – траектория перемещения отвала массой 100 кг;

3 – остаточная толщина снега на дороге

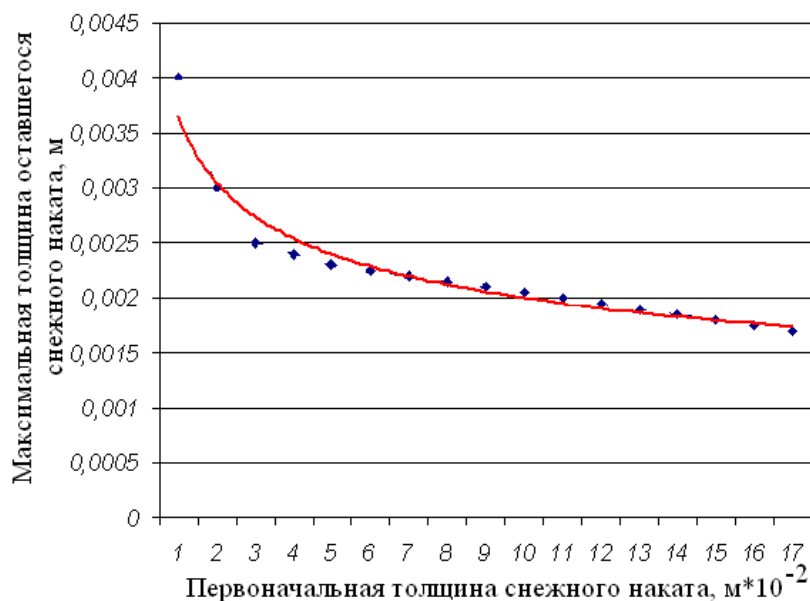


Рис. 4. Изменение максимальной толщины неудалённого снежного наката от его начальной толщины

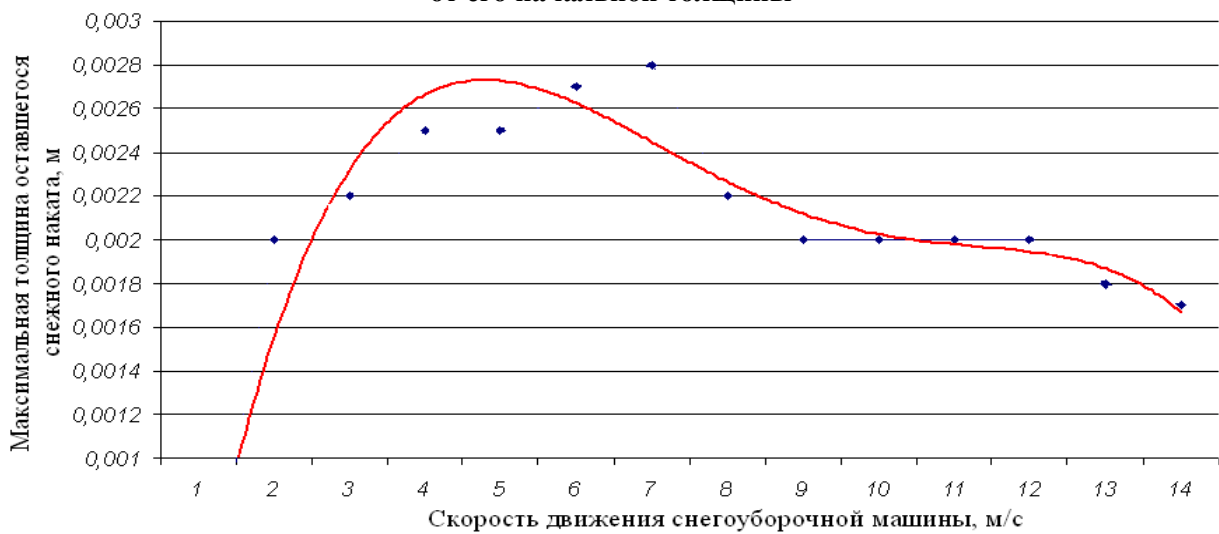


Рис. 5. Изменение максимальной толщины неудалённого снежного наката от скорости движения снегоуборочной машины

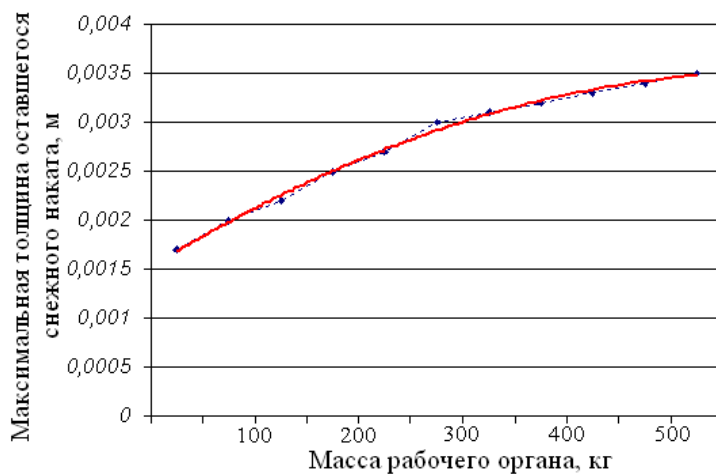


Рис. 6. Изменение максимальной толщины неудалённого снежного наката от массы рабочего органа

Полученные данные свидетельствуют о том, что схема с шарнирным креплением рабочего органа к корпусу базовой машины обеспечивает гораздо более качественную очистку поверхности дорог от снега. Кроме того, полученные данные позволяют провести определённый выбор таких параметров машин, которые бы обеспечивали максимально возможное качество снегоочистки. Так, при соотношении $\frac{F_P}{G_{PO}} \geq 500 \text{ м/с}^2$ движение отвала будет ко-

пировать очищаемую поверхность. Однако технически выдержать заданное соотношение не представляется возможным. С учётом того, что масса отвала и усилие резания растут прямо пропорционально его ширине, следует признать, что качество снегоочистки не зависит от ширины рабочего органа. Поэтому единственным эффективным способом повышения качества очистки дорог от снежного наката является снижение скорости уборки до значений меньших, чем 1 м/с.

Библиографический список

1. **Афанасьев, В.Л.** Статистические характеристики микропрофиля автомобильных дорог и колебаний автомобиля / В.Л. Афанасьев, А.А. Хачатуров // Автомобильная промышленность. 1966. № 2. С. 15–23.
2. **Баловнев, В.И.** Моделирование процесса взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В.И. Баловнев. – М.: Высш. шк., 1981. – 335 с.
3. **Куляшов, А.П.** Зимнее содержание дорог / А.П. Куляшов, Ю.И. Молев, В.А. Шапкин; НГТУ. – Н. Новгород, 2007. – 318 с.
4. Пуртов А.Р. Выбор конструктивных параметров рабочего органа для удаления снежных накатов и льда с бетонных покрытий: дисс. ...канд. тех. наук 05.05.04. Н.Новгород, 2002. –191 с.
5. **Шапкин, В.А.** Применение метода наименьших квадратов в нахождении статистических характеристик деформируемой опорной поверхности / ГПИ. - Горький, 1985. Деп. в ЦНИИТЭ 24.10.85. № 112-сд.

*Дата поступления
в редакцию 05.02.2013*

Y. Koshelev, D. Sokolov, Y. Molev

**SUSPENSION OF WORKING BODY AND ITS INFLUENCE ON THE DEGREE
OF CLEANING THE SNOW-COVERED ROADS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev

The article deals with the interaction of the working body of the plow utility vehicles with snow cover. The normal operation of a snowplow is only possible at a speed of less than 1 m / s. Received the dependencies between parameters and design solutions suspension of blade, the geometrical dimensions of the base machine and the amount of snow remaining on the road after passing the machines.

Key words: plow working body, snow-covered roads, the amount of uncollected snow.