

## Анализ сопротивления движению гусеничных машин по снегу

# 08, август 2010

авторы: Аникин А. А., Барахтанов Л. В.

УДК 629.113

E-mail [niitmtk@nntu.nnov.ru](mailto:niitmtk@nntu.nnov.ru)

ГОУ ВПО Нижегородский государственный  
технический университет им. Р.Е.Алексеева

При движении гусеничной машины по деформируемому грунту силу сопротивления  $P_c$  можно разделить на две составляющие[1]:

$$P_c = P'_f + P_f \quad (1)$$

где  $P'_f$  – сила внутреннего сопротивления;  $P_f$  – сила внешнего сопротивления.

Внутреннее сопротивление включает в себя потери на перекачивание опорных катков по гусенице, на трение в шарнирах, в зацеплении, трансмиссии и т.д.

Потери такого вида, в основном, учитываются к.п.д. и при движении на малых скоростях по снежной целине составляют незначительную часть от общего сопротивления движению.

Основную долю в сопротивлении движению гусеничных машин по снегу составляет первое слагаемое. Внешняя сила сопротивления движению  $P_f$  включает в себя следующие составляющие[2]:

$$P_f = P_{fc} + P_{fdn} + P_{fdnd} + P_{fdn.tr.} + P_{\Pi} + P_{KP} + P_w \quad (2)$$

где  $P_{fc}$  - сопротивление движению за счет вертикальной деформации снега гусеницы;  $P_{фдн}$  - сопротивление движению за счет деформации снега днищем машины;  $P_{фдн.тр}$  - сопротивление движению за счет трения днища о снег;  $P_{п}$ -прочие за счет прилипания и примерзания снега к элементам ходовой части;  $P_{кр}$ .-сила тяги на крюке;  $P_w$ -сила сопротивления воздуха.

Сила сопротивления движению от вертикальной деформации снега гусеницами включает в себя две составляющие[3]:

$$P_{fc} = P_{fc1} + P_{fc2} = 2b \int_0^{h, \text{деф. max}} q(h)dh + 2b \sum_{j=1}^n \int_{h_j - \Delta h_j}^{h_j} q(h)dh, \quad (3)$$

где  $P_{fc1}$ - сила сопротивления, обусловленная деформацией снежного полотна пути под катком с наибольшим пиковым давлением;  $P_{fc2}$  - сила сопротивления, обусловленная дополнительной деформацией снега, выдавливаемого в межкатковое пространство;  $h_{\text{максдеф.}}$  - максимальная деформация снега под катком с наибольшим давлением;  $h_j$  - деформация снега под  $j$ -м катком;  $\Delta h_j$  - высота снега, выносимого из зоны контакта в межкатковую область, в результате экскавационно-бульдозерных эффектов;  $q(h)$  - зависимость давления

от деформации: 
$$h = \frac{qh_{\text{max}}}{q + \gamma h_{\text{max}}} \quad (4)$$

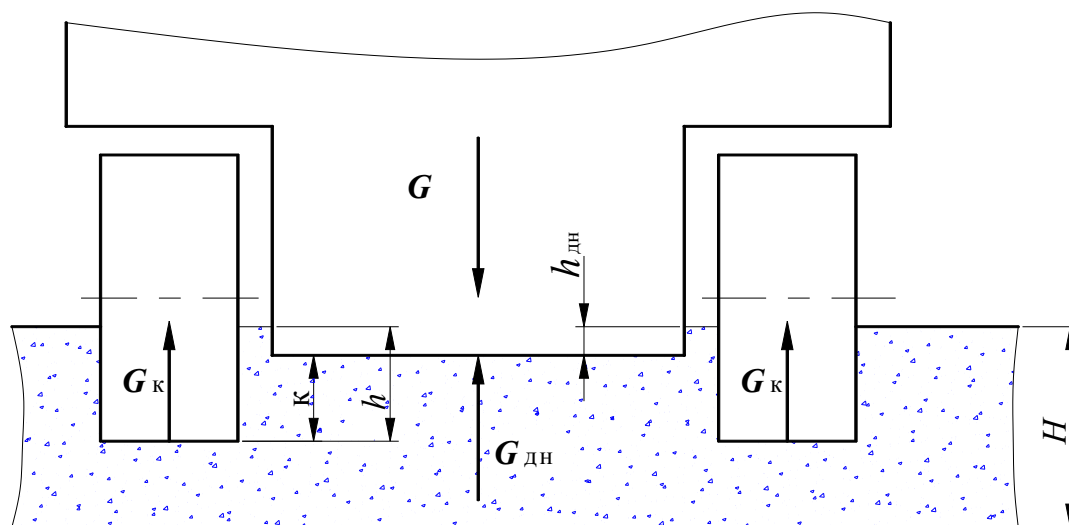
где  $\gamma$  - коэффициент начальной жесткости снега, характеризующий удельное сопротивление снега сжатию, представляет собой коэффициент жесткости ( $\text{Н/м}^3$ ) в начальной стадии деформации;  $h_{\text{max}}$  - коэффициент, характеризующий величину деформации снега при давлениях, соответствующих максимальному уплотнению.

$$P_{fc1} = 2b\gamma h_{\text{max}}^2 \left( -\ln \frac{\gamma h_{\text{max}}}{\gamma h_{\text{max}} + q_{\text{max}}} - \frac{q_{\text{max}}}{\gamma h_{\text{max}} + q_{\text{max}}} \right); \quad (5)$$

где  $b$ – ширина гусеницы.

$$P_{fc2} = B_{\kappa} \cdot \gamma \cdot h_{\text{max}}^2 \sum_{j=1}^n \left\{ \ln \left[ 1 + \frac{\Delta h_j}{h_{\text{max}}} \left( 1 + \frac{q_{\text{max}}}{\gamma h_{\text{max}}} \right) \right] - \frac{\Delta h_j}{h_{\text{max}}} \right\}; \quad (6)$$

При погружении гусеницы в снег, превышающим дорожный просвет возникает дополнительная сила сопротивления  $P_{фдн}$ , обусловленная взаимодействием со снежным покровом днища корпуса. Это сопротивление складывается, в основном, из затрат на вертикальную деформацию снега  $P_{фднд}$  и трения о поверхность полотна пути  $P_{фдн тр}$ . Для определения составляющих  $P_{фднд}$  и  $P_{фдн тр}$  необходимо знать величину давления днища на снег  $q_{дн}$  или величину погружения днища  $h_{дн}$  в снежный покров, т.к. они однозначно связаны зависимостью (4).



. Рис.1. Погружение днища машины в снег

Условие равновесия машины, при погружении колеса, в снег превышающем дорожный просвет, имеет вид:  $G = G_k + G_{дн}$  (7)

где  $G_k$  – нагрузка, воспринимаемая движителем;  $G_{дн}$  – нагрузка, воспринимаемая днищем

$$G_k = \frac{\gamma \cdot h_{\max} \cdot h}{h_{\max} - h} \cdot S_k; \quad G_{дн} = \frac{\gamma \cdot h_{\max} \cdot (h - k)}{h_{\max} - (h - k)} \cdot S_{дн}; \quad (8)$$

где  $S_k$  – активная опорная площадь движителя;  $S_{дн}$  – опорная площадь днища;  $h$  – погружение движителя;  $k$  – дорожный просвет.

После ряда несложных преобразований получим:

$$h = 0,5 \left[ b - (b^2 - 4ac)^{1/2} \right] \cdot a^{-1} \quad (9)$$

где  $b = (\gamma h_{\max}^2 + \gamma h k)(S_x + S_{дн}) + G(2h_{\max} + k)$

$$a = G + \gamma(h_{\max} + k)(S_x + S_{дн})$$

$$c = Gh_{\max}(h_{\max} + k) + \gamma h_{\max}^2 k S_{дн}$$

Соответственно:  $h_{дн} = h - k$ . Сила сопротивления за счет вертикальной деформации снега днищем подсчитывается по зависимости:

$$P_{f_{днд}} = b_{дн} \int_0^{h_{дн}} q_{дн} \cdot dh; \quad (11)$$

где  $b_{дн}$  – ширина днища;  $q_{дн}$  – давление днища машины на снег.

Используя зависимость «нагрузка – осадка» :

$$h_{дн} = \frac{q_{дн} h_{\max}}{q_{дн} + \gamma h_{\max}}; \quad (12)$$

после вычисления интеграла (11) получим:

$$P_{f_{днд}} = b_{дн} \cdot \gamma \cdot h_{\max}^2 \left[ -\ln \frac{\gamma \cdot h_{\max}}{\gamma \cdot h_{\max} + q_{дн}} - \frac{q_{дн}}{\gamma \cdot h_{\max} + q_{дн}} \right];$$

Сопротивление движению за счет трения днища о поверхность полотна пути определяется как:

$$P_{f_{дн тр}} = (c_{\alpha} + q_{дн} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\alpha}) S_{дн},$$

где  $c_{\alpha}$ ,  $\operatorname{tg} \varphi_{\alpha}$  - параметры характеризующие трение материала корпуса о снег.

Сила сопротивления от крюковой нагрузки возникает при буксировании колесного или лыжного прицепа. При буксировании колесного прицепа силой сопротивления движению от экскавационно-бульдозерных эффектов можно пренебречь, в силу ее малости, и определить силу тяги на крюке, как силу сопротивления, обусловленную деформацией снежного полотна пути колесами прицепа:

$$P_{кр} = P_{f_{сп}} = b \cdot \gamma \cdot h_{\max}^2 \left[ -\ln \frac{\gamma \cdot h_{\max}}{\gamma \cdot h_{\max} + q_n} - \frac{q_n}{\gamma \cdot h_{\max} + q_n} \right];$$

где  $b$  – ширина колеса;  $q_n$  – давление колеса на снег. При буксировании лыжного прицепа сопротивление движению зависит от физико-механических свойств снега и конструктивных параметров лыжи. Сила сопротивления движению включает в себя следующие составляющие [4]: силу смятия под носком лыжи  $P_{см}$ , силу среза кромки носка лыжи  $P_{ср}$ , силу трения материала подошвы лыжи о снег  $P_{тр}$  и силу сопротивления объема снега, перемещаемого при образовании следа  $P_q$ .

$$P_{см} = \frac{B}{h} \iint \sigma_{см} dh \cdot dl; \quad P_{ср} = \sigma_{ср} S; \quad P_{тр} = \mu \cdot G_l; \quad P_q = \kappa B \cdot L \cdot V_{сн}^2$$

где  $\sigma_{см}$  – сопротивление снега смятию;  $\sigma_{ср}$  – сопротивление снега срезу;  $S$  – площадь среза;  $G_l$  – нагрузка, приходящаяся на лыжу;  $\mu$  – коэффициент трения подошвы лыжи о снег,  $\kappa$  – коэффициент, учитывающий плотность снега;  $B$  – ширина лыжи;  $V_{сн}$  – скорость перемещения снежных частиц при деформации снежного покрова;  $L$  – длина образующей носка лыжи. Силу сопротивления воздуха  $P_w$  можно не учитывать, т.к. движение машины по снегу происходит с небольшими скоростями.

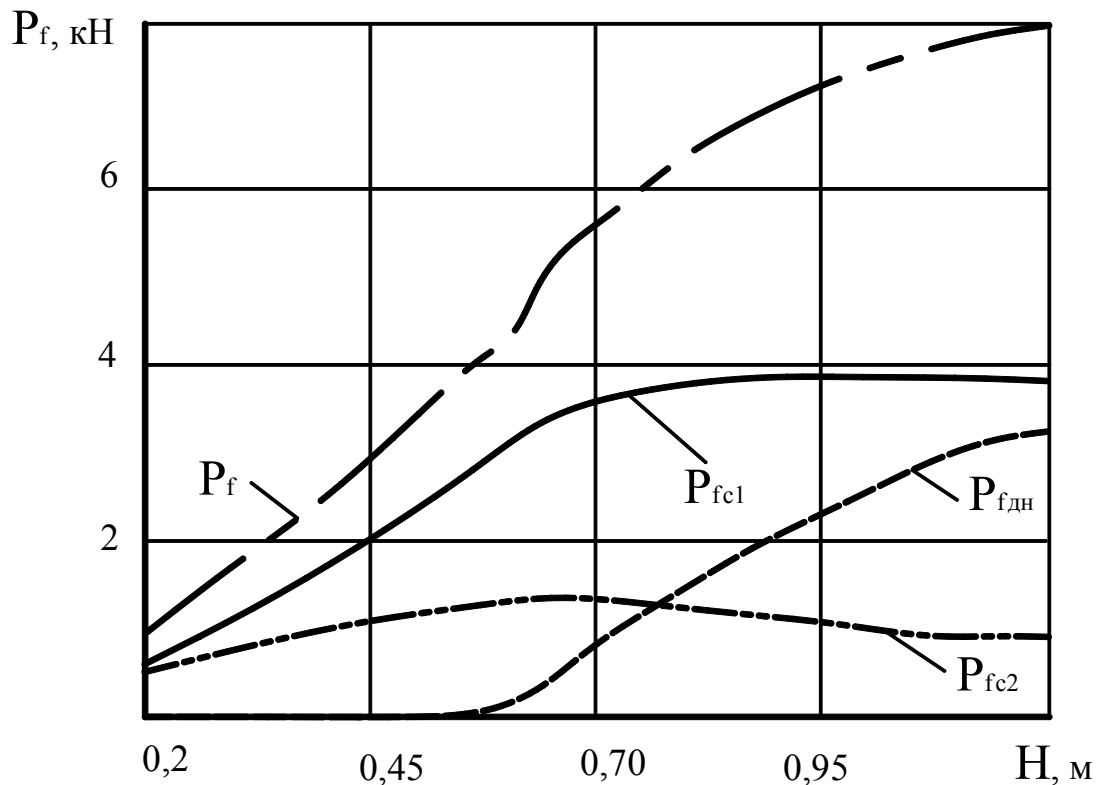


Рис. 2. Зависимость составляющих сопротивления движению от высоты снега

На рис.2. приведены результаты расчета сил составляющих сопротивления движению, связанных с деформацией снега под катками ( $P_{fc1}$ ), в межкатковом пространстве ( $P_{fc2}$ ), силы сопротивления от днища корпуса ( $P_{fdn}$ ) и силы внешнего сопротивления ( $P_f$ ).

В целом, проведенные для целого ряда гусеничных машин с полной массой 1,5 до 14т, расчеты показали, что составляющие сопротивления движению распределяются следующим образом: сопротивление сил деформации снега колесом – 55 ... 90%, сопротивление от экскавационно-бульдозерных эффектов – 10 ... 40%, сопротивление, обусловленное взаимодействием со снежным покровом днища корпуса – 0...60%.

#### Список использованных источников

1. **Забавников Н.А.** Основы теории транспортных гусеничных машин. – М.: Машиностроение, 1975. – 448 с.

.2 **Снегоходные машины** /Л.В. Барахтанов, В.И. Ершов, С.В. Рукавишников, А.П.

Куляшов. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1986.191 с.

3. **Аникин А.А., Барахтанов Л.В., Донато И.О.** Проходимость гусеничных машин по снегу. – Н.Новгород.: Изд-во «Омега» 2009. – 362с

4. **Шишкин В.В.** Проходимость лыж // Труды совещания по проходимости колесных и гусеничных машин по целине и грунтовым дорогам. – М.: Изд-во АН СССР, 1950. – С. 338-344.