

**Физико-механические свойства снега как полотна пути для движения машин**

# 10, октябрь 2010

авторы: Аникин А. А., Барахтанов Л. В., Донато И. О.

УДК 629.113

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

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

Если рассматривать снежный покров как полотно пути, по которому движется машина, то к наиболее важным характеристикам снега, определяющим сопротивление движению, тяговые свойства и проходимость, относятся зависимости деформации снега от нормальной нагрузки, сопротивление снега сдвигу и его фрикционные свойства.

В работе [1] проведен анализ основных зависимостей, которые применялись для определения сопротивления снега сжатию. Степенная зависимость между нагрузкой  $q$  и деформацией  $h$  (1), сформулированная в общем виде В.П. Горячкиным - М.Н.Летошневым, широко использовалась при исследовании сопротивления снега сжатию (Л.С.Филатов, А.С. Ширков, М.Беккер, А Риис и др.):

$$q = ch^n \quad (1)$$

где  $c$ ;  $n$  - константы грунта.

Предлагаемая формула обладает существенным недостатком: с увеличением давления осадка штампа неограниченно возрастает. При реальном процессе погружения

штампа в снежный покров величина деформации всегда ограничена глубиной снега, асимптотически приближаясь к ней. Кроме того, константы  $c$  и  $n$  не связаны с такими важными характеристиками, как плотность снега и высота снежного покрова. Доказано, что наиболее адекватно зависимость между давлением  $q$  и деформацией снега  $h$  отражает зависимость, предложенная в НГТУ В.А. Малыгиным. [2]:

$$h = \frac{q}{\left(\frac{1}{h_{\max}}\right)q + \gamma} \quad (2)$$

где  $\gamma$  – коэффициент начальной жесткости снега, характеризующий удельное сопротивление снега сжатию, представляет собой коэффициент жесткости (Н/м<sup>3</sup>) в начальной стадии деформации;

$h_{\max}$  – коэффициент, характеризующий величину деформации снега при давлениях, соответствующих максимальному уплотнению.

$$h_{\max} = H \frac{n_y b + d}{b + d},$$

где  $H$  – высота снежного покрова;  $b$  – ширина штампа;  $n_y$  – коэффициент уплотняемости снега;  $d$  – эмпирический коэффициент.

Согласно экспериментальным исследованиям, проведенным В.А.Малыгиным в ОНИЛ ВМ:

$$n_y = \frac{a}{\rho_0 + a},$$

где  $\rho_0$  – начальная плотность снега;  $a = 0,3$  г/см<sup>3</sup>.

На основании этих же экспериментальных данных зависимость  $d$  от  $H$  хорошо согласуется с выражением вида

$$d = 0,0287 (100H)^{3/2}$$

Таким образом, зная параметры (начальную плотность снега  $\rho_0$  и его начальную жесткость  $\gamma$ ), можно определить глубину погружения плоского штампа на снежной целине заданной высоты  $H$  в зависимости от нагрузки

$$h = \frac{q}{\left[ \frac{b+d}{H(n_y b + d)} \right] q + \gamma}, \quad (3)$$

Как видно из формулы высота снега оказывает сильное влияние на величину деформации. С увеличением высоты снега  $H$  величина деформации  $h$  значительно увеличивается лишь до некоторого предела, после чего высота снега в меньшей степени влияет на величину погружения штампа. Причем, чем меньше величина удельной нагрузки на штамп, тем меньше граничная высота снега, превышение которой не оказывает существенного влияния на величину деформации снега.

Рассмотренные выше количественные зависимости и характер протекания процессов при вертикальной деформации снега относятся к плоским штампам.

Опорные поверхности машин при движении их по снегу не являются плоскими. Так, гусеница, облегающая каток, имеют цилиндрическую опорную поверхность. Зависимость  $q - h$  для цилиндрического штампа отличается от зависимости, полученной для плоского штампа.

Отличие возникает за счет более интенсивного выдавливания снега в стороны. В работе [3] показано каким образом, имея сведения о погружении плоского штампа, можно получить зависимость для погружения цилиндрического штампа. Элемент цилиндрической поверхности в своей нижней части практически мало отличается от плоского штампа. Тогда предположим, что этот элемент погружается по закону, полученному для плоского штампа, т.е. зависимость  $q_0(h)$  определяется по выражению типа (1). Положим, что в остальных точках нормальные давления  $q_r$  распределены по цилиндрической поверхности по закону косинуса, как - это принято в механике грунтов :

$$q_r = q_0 \cos \varphi \quad (4)$$

где  $q_0$  – давление в нижней точке цилиндрической поверхности;

$\varphi$  – полярный угол точки на поверхности, отсчитываемый от вертикали.

Тогда вертикальное давление  $q_z$  запишется так:

$$q_z = q_0 \cos^2 \varphi$$

Нагрузка, которую несет цилиндрический штамп, определится как интеграл первого рода по поверхности штампа:

$$P = \iint_{\sigma} q_0 \cos^2 \varphi d\sigma$$

Полагая, что давление по ширине штампа распределено равномерно, после ряда преобразований получим:

$$P = \frac{\gamma h_{\max} h R b}{h_{\max} - h} \left\{ \arccos \frac{R-h}{R} + \frac{R-h}{R} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{R-h}{R} \right)^2 \right] \right\} \quad (5)$$

Выражение (4) описывает погружение ( $h$ ) цилиндрического штампа в снежный покров в зависимости от нагрузки ( $P$ ), физико-механических свойств снега ( $\gamma$ ,  $h_{\max}$ ) и геометрических размеров штампа ( $b$ ,  $R$ ).

На рис. 1 приведены графики погружения цилиндрического штампа в ненарушенный снежный покров.

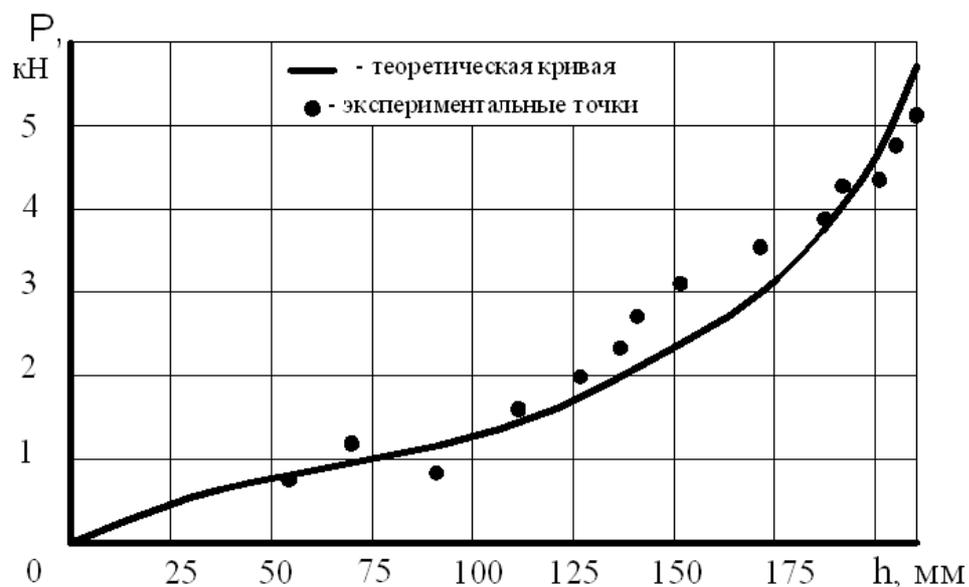


Рис.1 Погружение цилиндрического штампа в ненарушенный снег

Результаты проверки формулы (5), представленные на рис. 1, показывают удовлетворительную сходимость теоретических и экспериментальных данных.

Зависимость между нормальным давлением  $q$  и касательным напряжением  $\tau$  обычно связывают законом Кулона-Мора:

$$\tau = c + q \operatorname{tg} \varphi \quad (5)$$

где  $c$  – коэффициент связности;  $\operatorname{tg} \varphi$  – коэффициент внутреннего трения.

Для определения сопротивления снега сдвигу в работе [3] предложена зависимость:

$$\tau = \left( 1 + \frac{3h_r}{b} \right) \left( c + \frac{\operatorname{arctg} b / h_r}{\pi / 2} q \operatorname{tg} \varphi \right) \quad (6)$$

где  $h_r$ ,  $b$  – высота и ширина грунтозацепа, соответственно.

Рассмотрев характер распределения средних плотностей снега в течение зимнего периода по различным районам СНГ можно сделать вывод, что при высоте снежного покрова более 0,3 м средняя плотность снега в течение зимних месяцев колеблется в пределах от 0,15 до 0,30 г/см<sup>3</sup>. Другие значения плотностей представляют меньший интерес, так как ввиду небольшой высоты снежного покрова он не является серьезным

препятствием для вездеходных машин. Используя формулы (2 и 5) строятся зависимости нагрузка  $q$  – осадка  $h$  (рис.2), нагрузка  $q$  – сдвиг  $\tau$  (рис.3) .

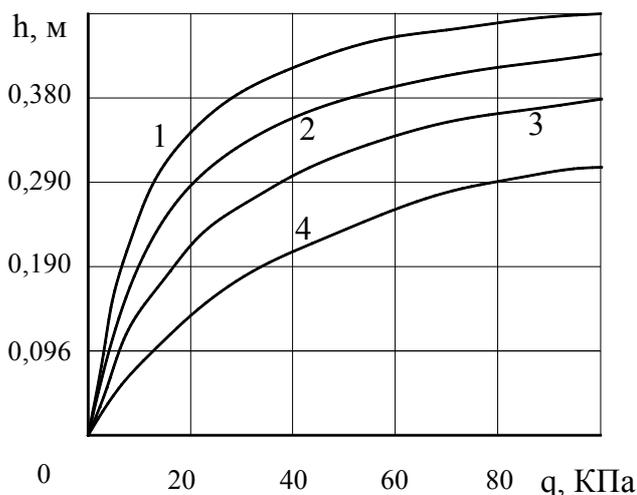


Рис.2. Зависимость деформации от давления

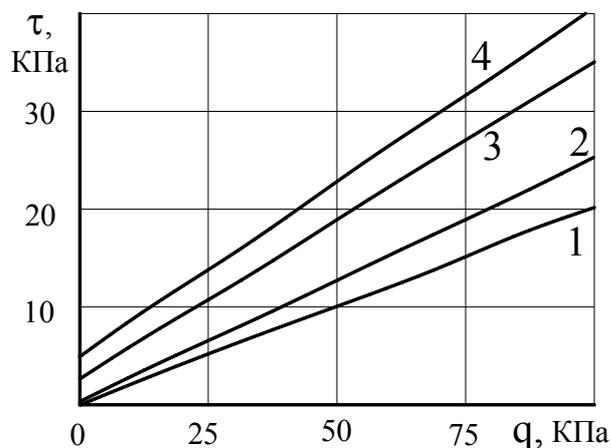


Рис.3. Сопротивление снега сдвигу

Предлагаются численные значения для четырех типов снега для оценки проходимости наземных транспортных средств:

1. $\rho = 0,15 \text{ г/см}^3$	$\gamma = 20 \text{ кПа/м}$	$c = 0,5 \text{ кПа}$	$\text{tg}\varphi = 0,25$
2. $\rho = 0,20 \text{ г/см}^3$	$\gamma = 30 \text{ кПа/м}$	$c = 1,0 \text{ кПа}$	$\text{tg}\varphi = 0,30$
3. $\rho = 0,25 \text{ г/см}^3$	$\gamma = 50 \text{ кПа/м}$	$c = 2,5 \text{ кПа}$	$\text{tg}\varphi = 0,33$
4. $\rho = 0,30 \text{ г/см}^3$	$\gamma = 100 \text{ кПа/м}$	$c = 5,0 \text{ кПа}$	$\text{tg}\varphi = 0,364$

Фрикционные свойства снега характеризуются сопротивлением трению различных поверхностей. Для оценки фрикционных свойств служит коэффициент трения  $\mu$  , который зависит от материала и качества скользящей поверхности, от состояния снежного покрова, давления и других факторов. Зависимость коэффициента трения от давления, с одной стороны, противоречит определению коэффициента трения как физической константы, которая зависит от материала и состояния поверхностей трущихся тел , с другой стороны, усложняет алгоритм решения задачи по определению сопротивления движению машины при погружении движителя в снег, превышающем дорожный просвет.

Предложен способ разрешения указанного противоречия. Вводится понятие распределенной по поверхности скольжения удельной силы трения  $\tau_\alpha = \mu q$  и строится график зависимости  $\tau_\alpha$  от  $q$ . Полученный результат описывается законом Кулона-Мора  $\tau_\alpha = c_\alpha + q \operatorname{tg}\varphi_\alpha$ ,

где  $c_\alpha$  – связность трущихся поверхностей кПа;

$\operatorname{tg}\varphi_\alpha$  – коэффициент трения не зависящей от нагрузки.

Используя данные, приведенные в работах [4, 5, 6], были получены следующие соотношения:

Для сухого свежесвыпавшего снега

Углеродистая сталь  $\tau = 0,110 + 0,167q$

Нержавеющая сталь  $\tau = 0,059 + 0,139q$

Дюралюминий  $\tau = 0,091 + 0,095q$

Для влажного перекристаллизованного снега

Углеродистая сталь  $\tau = 0,221 + 0,167q$

Нержавеющая сталь и дюралюминий  $\tau = 0,121 + 0,115q$

Для сверхнизких температур:

Углеродистая сталь

Фторопласт

$t = -30^\circ\text{C}$      $\tau = 0,98 + 0,162q$

$\tau = 0,405 + 0,092q$

$t = -40^\circ\text{C}$      $\tau = 1,203 + 0,187q$

$\tau = 0,502 + 0,116q$

$t = -54^\circ\text{C}$      $\tau = 1,330 + 0,316q$

$\tau = 0,843 + 0,152q$

Выводы

Рассмотрены зависимости «нагрузка-осадка», «нагрузка-сдвиг» для различных типов снега; получены зависимости удельной силы трения от давления для низких и сверхнизких температур различных материалов; обоснованы расчетные параметры снега

необходимые для определения силы сопротивления движению, силы тяги и оценки проходимости гусеничных машин.

#### **Список использованных источников**

1. Барахтанов Л.В. Повышение проходимости гусеничных машин по снегу: Дисс... докт. техн. наук: 05.05.03. – Горький, 1988 г. – 352 с.
2. Малыгин В.А., Рукавишников С.В. Процессы, протекающие в снеге при сжатии его штампом // Снегоходные машины: ГПИ им. А.А. Жданова. – 1969. – Т. XXV. – Вып. 16. – С. 88-96.
3. Рихтер Г.Д. Снежный покров, его формирование и свойства. – М.: Изд-во АН СССР, 1945. – 120 с.
4. Снегоходные машины /Л.В. Барахтанов, В.И. Ершов, С.В. Рукавишников, А.П. Куляшов. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1986. 191 с.
5. 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.
6. Панов В.И. Исследование зависимости трения скольжения по снежному покрову от различных факторов // Снегоходные машины: Труды ГПИ им. А.А. Жданова. – 1967. – Т. XXIII. – вып. 7. – С. 98-102.