

ВЫБОР ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ СНЕГА ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОХОДИМОСТИ МАШИН

Канд. техн. наук, доц. А.А. АНИКИН, канд. техн. наук И.О. ДОНАТО

Рассмотрены зависимости деформации снега от нормальной нагрузки, сопротивление снега сдвигу и его фрикционные свойства. Получена зависимость для определения погружения цилиндрического штампа в снежный покров. Предложено четыре типа снега для оценки проходимости машин. Получены значения удельной силы трения для углеродистой и легированной сталей, дюралюминия, фторопласта.

The considered dependencies to deforming the snow from normal load, resistance of the snow shift and his friction characteristic. Dependency is received for determination of the submerision of the cylindrical stamp in snow cover. Four types of the snow are offered for estimation of the possibilities of the machines. Importance of specific power of friction are received for carbon and alloy steel, duralumin, fluoroplast.

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 проведен анализ основных зависимостей, которые применялись для определения сопротивления снега сжатию. Показано, что наиболее адекватно зависимость между давлением q и деформацией снега h отражает зависимость, предложенная в НГТУ В.А. Малыгиным. [1]:

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

где γ — коэффициент начальной жесткости снега, характеризующий удельное сопротивление снега сжатию, представляет собой коэффициент жесткости (Н/м³) 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 НГТУ

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

где ρ_0 — начальная плотность снега; $a = 0,3$ г/см³.

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

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

Таким образом, зная легко определяемые параметры (начальную плотность снега ρ_0 и его начальную жесткость γ), определяется глубина погружения плоского штампа на снежной целине заданной высоты H в зависимости от нагрузки:

$$h = \frac{q}{\left[\frac{b+d}{H(n_1 b+d)} \right]^{q+\gamma}}. \quad (2)$$

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, колесный движитель, 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 [2] 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:

$$q_r = q_0 \cos \varphi, \quad (3)$$

где q_0 — давление в нижней точке цилиндрической поверхности; φ — 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 поверхностный интеграл первого рода по поверхности штампа

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

Полагая, что давление по ширине штампа распределено равномерно, и выразив из (1) q_0 , после ряда преобразований получим:

$$P = \frac{\gamma h_{\max} h R b}{h_{\max} - h} \left\{ \arccos \frac{R-h}{R} + \frac{R-h}{R} \left[1 - \left(\frac{R-h}{R} \right)^2 \right] \right\}. \quad (4)$$

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

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

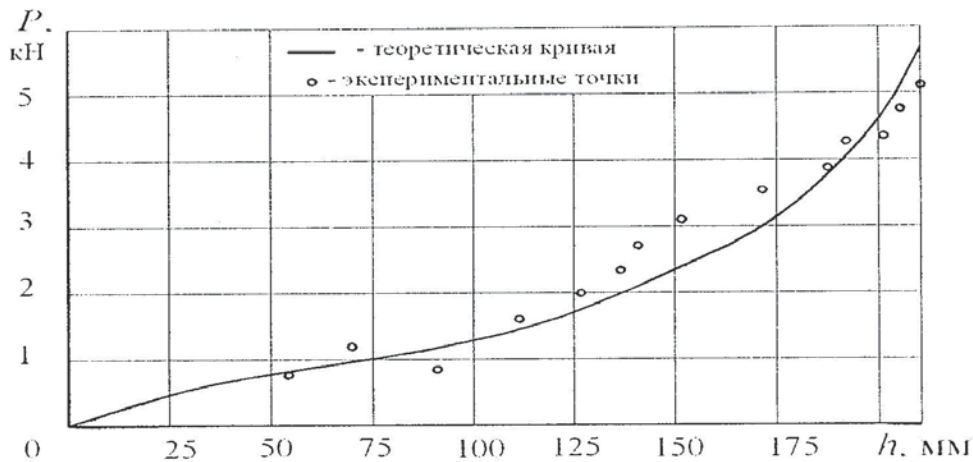


Рис. 1. Погружение цилиндрического штампа в ненарушенный снег

Результаты проверки формулы (4), представленные на рис. 1, показывают удовлетворительную сходимость теоретических и экспериментальных данных.

Зависимость между нормальным давлением q и касательным напряжением τ обычно связывают законом Кулона-Мора

$$\tau = c + q \operatorname{tg} \varphi,$$

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

Для определения сопротивления снега сдвигу в [2] предложена зависимость:

$$\tau = \left(1 + \frac{3h_r}{b} \right) \left(c + \frac{\operatorname{arctg} b / h_r}{\pi/2} q \operatorname{tg} \varphi \right), \quad (5)$$

где h_r , b — высота и ширина грунтозацепа соответственно.

Используя зависимости (2) и (5) предложено четыре типа снега для оценки проходимости наземных транспортных средств. Используя материалы Г.Д. Рихтера [3], автор рассматривает характер распределения средних плотностей снега в течение зимнего периода по различным районам СССР. На основании проведенного анализа делается обоснованный вывод, что при высоте снежного покрова более 0,3 м средняя плотность снега в течение зимних месяцев колеблется в пределах от 0,5 до 0,30 г/см³. Другие значения плотностей представляют меньший интерес, так как ввиду небольшой высоты снежного покрова он не является серьезным препятствием для вездеходных машин. С использованием (2)

построены зависимости нагрузка q — осадка h и предлагаются численные значения для четырех типов снега:

- | | |
|---------------------------------|------------------------------|
| 1. $\rho = 0,15 \text{ г/см}^3$ | $\gamma = 10 \text{ кПа/м}$ |
| 2. $\rho = 0,20 \text{ г/см}^3$ | $\gamma = 30 \text{ кПа/м}$ |
| 3. $\rho = 0,25 \text{ г/см}^3$ | $\gamma = 50 \text{ кПа/м}$ |
| 4. $\rho = 0,30 \text{ г/см}^3$ | $\gamma = 100 \text{ кПа/м}$ |

Далее без каких-либо обоснований для этих же типов снега предлагаются параметры по определению сопротивления снега сдвигу:

c — коэффициент, характеризующий связность;

$\text{tg}\varphi$ — коэффициент, характеризующий внутреннее трение снега:

- | | |
|--------------------------|---------------------------|
| 1. $c = 0,2 \text{ кПа}$ | $\text{tg}\varphi = 0,2$ |
| 2. $c = 0,5 \text{ кПа}$ | $\text{tg}\varphi = 0,25$ |
| 3. $c = 1,0 \text{ кПа}$ | $\text{tg}\varphi = 0,3$ |
| 4. $c = 1,0 \text{ кПа}$ | $\text{tg}\varphi = 0,3$ |

Вместе с тем известно, что существует связь между плотностью и коэффициентами связности и внутреннего трения. Корреляционные зависимости имеют вид [4]:

$$c = \exp\left(\sum_{j=0}^S n_j \rho^j\right) \text{ и } \text{tg}\varphi = \text{tg} \sum_{j=0}^S m_j \rho^j,$$

где n_j, m_j — эмпирические коэффициенты

$$\rho = \sum_{j=0}^S b_j (\rho_0/\varepsilon)^j,$$

где b_j — эмпирический коэффициент; ε — относительная деформация, определяемая по выражению

$$\varepsilon = (H - Z)/H,$$

где H — высота снежного покрова; Z — расстояние от поверхности подстилающего слоя до нижней точки, внедренного в снег штампа.

По данным НИТУ [4] корреляционные зависимости имеют вид:

$$\begin{aligned} c &= \exp(3,894 + 14,399\rho + 0,279\rho^2 - 12,956\rho^3), \\ \varphi &= 0,209 - 0,0887\rho + 2,221\rho^2 - 1,726\rho^3, \\ \rho &= 0,794 - 4,192(\rho_0/\varepsilon) + 10,525(\rho_0/\varepsilon)^2 - 6,907(\rho_0/\varepsilon)^3. \end{aligned}$$

Используя данные зависимости, были рассчитаны коэффициенты c и $\text{tg}\varphi$ для четырех типов снега. Были получены следующие результаты:

- | | |
|--------------------------|---------------------------|
| 1. $c = 0,5 \text{ кПа}$ | $\text{tg}\varphi = 0,25$ |
| 2. $c = 1,0 \text{ кПа}$ | $\text{tg}\varphi = 0,30$ |
| 3. $c = 2,5 \text{ кПа}$ | $\text{tg}\varphi = 0,33$ |
| 4. $c = 5,0 \text{ кПа}$ | $\text{tg}\varphi = 0,36$ |

Фрикционные свойства снега характеризуются сопротивлением трению различных поверхностей. Для оценки фрикционных свойств служит коэффициент трения, который зависит от материала и качества скользящей поверхности, от состояния снежного покрова и других факторов.

На рис. 2 [6] представлена зависимость коэффициента μ от удельного давления при сухом, свежеснежавшем снеге. С увеличением удельного давления величина коэффициента μ сначала постепенно уменьшается, достигает некоторого минимума, затем все более и более увеличивается. В зоне удельных давлений выше 17 кПа коэффициент μ увеличивается уже довольно интенсивно.

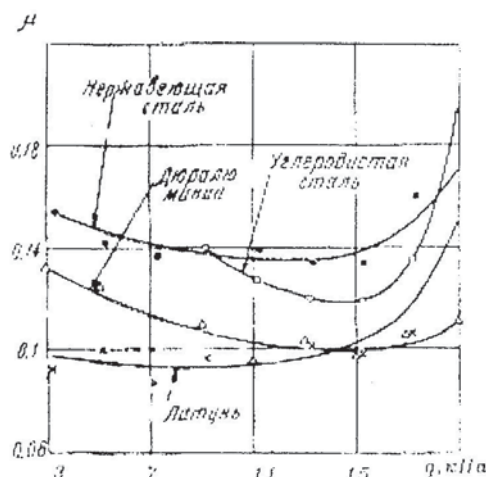


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения μ от удельного давления q и материала скользящей поверхности лыжи (сухой свежеснежавший снег)

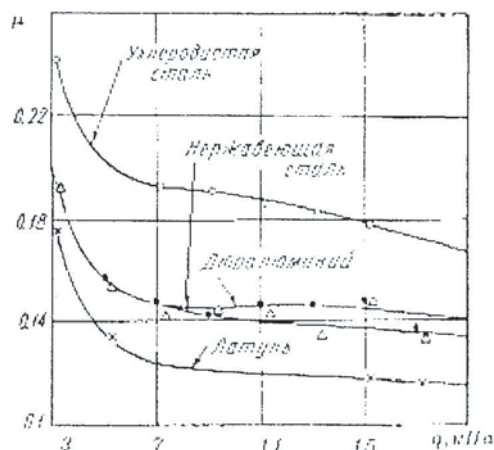


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения μ от удельного давления q и материала скользящей поверхности лыжи (влажный перекристаллизованный снег)

Иная картина наблюдается при влажном снеге (рис 3). В этом случае в зоне малых удельных давлений (примерно до 6 кПа) при увеличении удельного давления наблюдается резкое падение величины коэффициента μ , затем это падение замедляется и становится весьма плавным и постепенным.

Причина данного явления заключается в том, что при малых удельных давлениях величина коэффициента μ весьма сильно зависит от прилипания влажного снега к скользящей поверхности лыжи. С увеличением удельного давления влияние прилипания быстро уменьшается и при удельных давлениях свыше 7,5 кПа становится практически незаметным.

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 превышающим дорожный просвет. В [2] предложен способ разрешения указанного противоречия. Вводится понятие распределенной по поверхности скольжения удельной силы трения $\tau_\alpha = \mu q$ и строится график зависимости τ_α от q . Полученный результат описывается законом Кулона-Мора

$$\tau_\alpha = c_\alpha + q \operatorname{tg} \varphi_\alpha,$$

где c_α — связность трущихся поверхностей, кПа; $\operatorname{tg} \varphi_\alpha$ — коэффициент трения, не зависящий от нагрузки.

Далее, используя результаты, полученные в [5] предлагаются следующие зависимости [2]:

$$\text{для углеродистой стали — } \tau_\alpha = 0,221 + 0,167q;$$

для нержавеющей стали — $\tau_\alpha = 0,121 + 0,115q$;

для дюралюминия — $\tau_\alpha = 0,220 + 0,121q$.

К сожалению, при аппроксимации была допущена неточность. Анализ графиков, приведенных на рис. 3, показывает, что зависимости $\mu = f(q)$ для нержавеющей стали и дюралюминия практически совпадают, а значит должны совпадать и зависимости $\tau_\alpha = f(q)$. Используя данные, приведенные в [5, 6], были получены следующие соотношения:

Для сухого свежесвыпавшего снега (рис. 4).

углеродистая сталь $\tau_\alpha = 0,110 + 0,167q$

нержавеющая сталь $\tau_\alpha = 0,059 + 0,139q$

дюралюминий $\tau_\alpha = 0,091 + 0,095q$

Для влажного перекристаллизованного снега

углеродистая сталь $\tau_\alpha = 0,121 + 0,167q$

нержавеющая сталь и дюралюминий $\tau_\alpha = 0,220 + 0,121q$

Для сверхнизких температур

углеродистая сталь фторопласт

$t = -30$ $\tau_\alpha = 0,98 + 0,162q$ $\tau_\alpha = 0,405 + 0,092q$

$t = -40$ $\tau_\alpha = 1,203 + 0,187q$ $\tau_\alpha = 0,502 + 0,11q$

$t = 54$ $\tau_\alpha = 1,330 + 0,316q$ $\tau_\alpha = 0,843 + 0,152q$

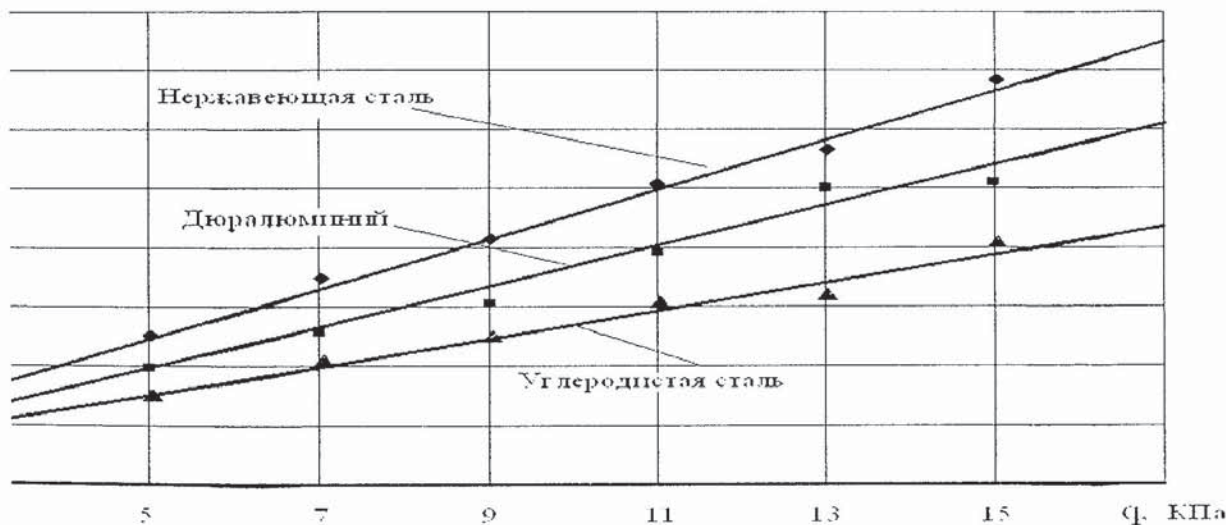


Рис. 4. Зависимость удельной силы трения от давления

Обоснованы и уточнены расчетные параметры снега для оценки проходимости наземных транспортных средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Барахтанов Л. В., Беляков В. В., Кравец В. Н. Проходимость автомобиля. — Н. Новгород: НГТУ, 1996. — 200 с.
3. Рихтер Г. Д. Снежный покров, его формирование и свойства. — М.: Изд-во АН СССР, 1945. — 120 с.
4. Барахтанов Л. В., Беляков В. В., Кравец В. Н. Проходимость автомобиля. — Н. Новгород: НГТУ, 1996. — 200 с.