

УДК 629.113

А.А. Аникин, Л.В. Барахтанов, И.О. Донато, В.А. Шапкин

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СНЕЖНОГО ПОКРОВА КАК ПОЛОТНА ПУТИ ДЛЯ ДВИЖЕНИЯ МАШИН

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена проблемам заснеженного бездорожья. Рассмотрены общая схема и основания снежного покрова. Разработан метод, позволяющий по имеющимся характеристикам твердого основания и данным о средней высоте снега, определять поверхность снежного покрова и распределение высоты снега на предполагаемой трассе движения машины.

Ключевые слова: снежный покров, твердое основание, поверхность снега, метод расчета.

Полотном пути для машин, эксплуатируемых в зимний период, служит снежный покров в своем естественном состоянии либо в виде уплотненного укатанного слоя. В общем виде снежный покров можно представить как физическое тело [1], имеющее конечную глубину и ограниченное, с одной стороны, поверхностью снега, с другой, – подстилающей поверхностью (основанием снежного покрова) (рис. 1).

Формирование основания снежного покрова (микропрофиля пересеченной местности) происходит под воздействием большого числа факторов: естественной эрозии почвы, размыва талыми и дождевыми водами, естественных уклонов местности, состояния растительного покрова, состава грунта и т.д. Сами эти факторы носят достаточно случайный характер, поэтому и образующийся микропрофиль может быть выражен также случайной функцией.

Рассматривая грунтовые дороги можно отметить, что помимо всех перечисленных факторов на формирование микропрофиля этих дорог влияет еще и характер движения транспорта. Поэтому микропрофиль дорог этого типа отличается от микропрофиля пересеченной местности наличием неровностей, создаваемых транспортом при движении. Возмущение при движении по грунтовым дорогам также может рассматриваться как случайный процесс.

Микропрофиль бездорожья является поверхностью и, следовательно, зависит от двух параметров: длины и ширины.

Аналитически эту поверхность можно выразить следующим образом:

$$q = q(x, y), \quad (1)$$

где x, y – координаты некоторой средней плоскости, относительно которой изменяются высоты неровностей. При наличии ряда допущений (стационарность, эргодичность, нормальный закон распределения) любую трассу движения (рис. 2) можно представить в виде двух случайных функций: ординаты среднего сечения q и угла наклона поперечного сечения ψ , определяемых выражениями [1, 2]

$$q(x) = \frac{q_1(x) + q_2(x)}{2}. \quad (2)$$

где $q_1(x), q_2(x)$ – функции микропрофиля сечений поверхности полотна пути правой и левой колеи соответственно; x – расстояние между двумя сечениями.

Тогда статистическими характеристиками поверхности полотна пути будут являться корреляционные функции

$$R_q(l) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{2x} \int_{-x}^x q(x)q(x+l)dx, \quad (3)$$

$$R_{\Psi}(l) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{2x} \int_{-x}^x \Psi(x) \Psi(x+l) dx. \quad (4)$$

Наиболее полные исследования микропрофиля пересеченной местности выполнены в отраслевой научно-исследовательской лаборатории бездорожных машин (ОНИЛВМ) Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (НГТУ). В соответствии с региональным обзором были выбраны следующие зоны: зона тундр и лесотундр с базой в г. Норильске; равнины лесной зоны с базой в г.Н.Новгороде и Пайде; зона степей и лесостепей с базой в г.Кургане; зона пустынь и полупустынь с базой в г. Нукус.

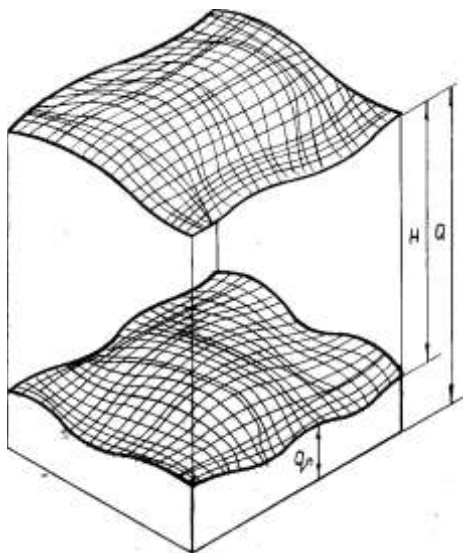


Рис. 1. Общая схема снежного покрова

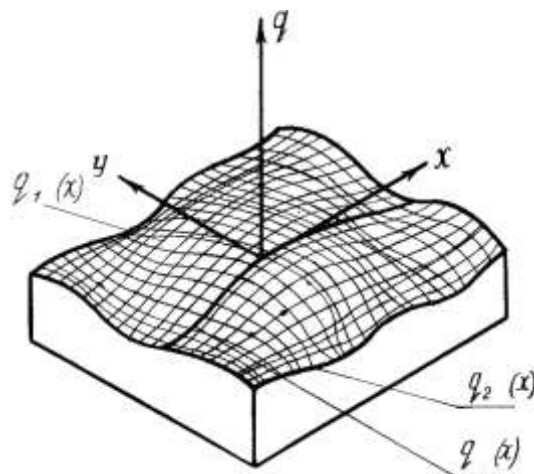


Рис. 2. Основание снежного покрова

В общей сложности было замерено около 200 участков общей протяженностью свыше 40 км. Для каждого участка были рассчитаны корреляционные функции, которые аппроксимировались выражениями типа

$$R_q(l) = \sum_{j=1}^n R_{qj}(0) e^{-\alpha_j l} \cos \beta_j l. \quad (5)$$

В результаты статистической обработки параметров корреляционных функций и их анализа предложены расчетные корреляционные функции микропрофиля бездорожья и грунтовых дорог (табл.1).

Очевидно, что поверхность снежного покрова носит случайный характер, поскольку твердое основание, на которое ложится снег, является случайной поверхностью, а формирование снежного покрова также происходит под влиянием различных случайных факторов. Характеристики самого снега являются функциями ряда независимых переменных: длины X , ширины Y , глубины H , плотности ρ и т.д. Тогда получим общее представление о снежном покрове как о случайном n -мерном поле, заданном на m -мерном пространстве. Приведенная модель математически наглядна, но неудобна для построения теории и использования в расчетах. Более удачным в этом случае является представление снежного покрова как физического тела, имеющего случайные поверхности и глубину (рис. 1) [1, 3]. Тогда он может быть описан с помощью аппарата теории случайных функций как двумерный случайный вектор двух независимых переменных X и Y , т.е. как случайное векторное поле.

Выделим следующие компоненты снежного покрова: рельеф снежного полотна пути, т.е. его поверхность; профиль снежного полотна пути, т.е. сечение рельефа по трассе движения; рельеф твердого основания местности; профиль твердого основания по трассе движе-

ния. Введем координату пути l , пройденного по трассе движения, координату профиля снежного полотна пути Q и координату профиля твердого основания q_n , отсчитываемые от единого условно взятого уровня, глубину снежного покрова H . Тогда все три обозначенные величины Q , q_n и H будут функциями одного аргумента l .

Рассмотрим вертикальное сечение снежного покрова, представленного на рис. 3. Глубина снежного покрова H определится через ординаты Q и q_n :

$$H = Q - q_n,$$

где Q , q_n , H - случайные стационарные функции аргумента l .

Математическое ожидание этой функции M_H в предположении совпадения начала отсчета с математическим ожиданием твердого основания, т.е. $M_{q_n} = 0$ совпадает с математическим ожиданием Q , т.е. $M_H = M_Q$ и по вероятностному смыслу является средней глубиной снежного покрова.

Корреляционная функция глубины снежного покрова $R_H(l)$, согласно положениям теории случайных функций, определится зависимостью

$$R_H(l) = R_Q(l) + R_{q_n}(l) - R_{Qq}(l) - R_{qQ}(l), \quad (6)$$

где $R_Q(l)$ - корреляционная функция микропрофиля снежного покрова; $R_{q_n}(l)$ - корреляционная функция микропрофиля твердого основания; $R_{Qq}(l)$, $R_{qQ}(l)$ - взаимные корреляционные функции. Если эти функции четные, то $R_{Qq}(l) = R_{qQ}(l)$ и $R_H(l) = R_Q(l) + R_{q_n}(l) - 2R_{Qq}(l)$.

Дисперсия глубины снежного покрова D_H определится из соотношения

$$D_H = D_Q + D_{q_n} - 2R_{Qq}(0).$$

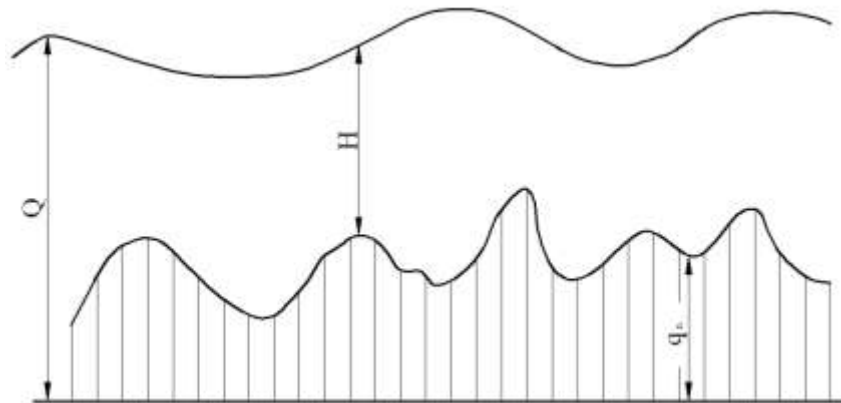


Рис. 3. Вертикальное сечение снежного покрова

Проведенные замеры и их дальнейший анализ показал, что при малых значениях высоты снега (M_H), функции Q и q_n будут сильно стохастически связаны. Это означает, что поверхность снежного покрова будет практически повторять поверхность твердого основания, фильтруя высокочастотные составляющие и несколько уменьшая дисперсию. При значениях M_H порядка 80 ÷ 90 см Q и q_n практически независимы. Для всех участков непосредственно по реализациям определялись спектральные плотности твердого основания и снежного покрова.

Расчетные корреляционные функции

Виды полотно пути	Частота			
	Инфранизкая	Низкая	Средняя	Высокая
Местность ровная	$12 e^{-0,09l} \cos 0,24l$	$5,76 e^{-0,12l} \cos 0,4l$	$5,2 e^{0,2l} \cos 0,6l$ $4,3 e^{-0,3l} \cos 0,8l$ $4 e^{0,40l} \cos 1,0l$	$1,69 e^{-0,85l} \cos 2,0l$ $2,4 e^{-11,5l} \cos 3,0l$
Местность малопересеченная	$4,2 e^{-0,09l} \cos 0,24l$	$67 e^{-0,12l} \cos 0,4l$	$25 e^{-0,20l} \cos 0,6l$ $25 e^{-0,30l} \cos 0,8l$ $16 e^{-0,40l} \cos 1,0l$	$16 e^{-0,85l} \cos 2,0l$ $11 e^{-1,15l} \cos 3,0l$
Местность среднeperесеченная	$184 e^{-0,09l} \cos 0,26l$	$80 e^{-0,12l} \cos 0,4l$	$54 e^{-0,25l} \cos 0,8l$	
Местность сильнопересеченная	$245 e^{-0,21l} \cos 0,26l$	$289 e^{-0,13l} \cos 0,36l$		
Валы	$760 e^{-0,13l} \cos 0,18l$	$760 e^{-0,16l} \cos 0,40l$		
Кочки				$64 e^{-3,4l} \cos 8,0l$
Дороги ровные	$12 e^{-0,09l} \cos 0,24l$	$3 e^{-0,12l} \cos 0,4l$		$2,5 e^{-0,65l} \cos 1,8l$ $1,0 e^{-1,60l} \cos 3,2l$
Дороги разбитые	$140 e^{-0,12l} \cos 0,24l$	$30 e^{-0,10l} \cos 0,4l$	$40 e^{-0,20l} \cos 0,6l$ $50 e^{-0,40l} \cos 0,8l$ $27 e^{-0,55l} \cos 1,0l$	$25 e^{-0,65l} \cos 1,8l$

Чтобы получить поверхность снежного покрова и распределение высоты снега, из спектра твердого основания (подстилающей поверхности) удаляли частоты, начиная с некоторой ω_b и заканчивая $\omega_k - \omega_b$ (k - количество отсчетов дискретной функции). Затем по полученному спектру при помощи обратного преобразования Фурье восстанавливалась функция, которая и являлась теоретической (расчетной) поверхностью снежного покрова. Для того, чтобы полученная расчетным путем поверхность снежного покрова $Q(m)$ сходилась к реальной поверхности, очевидно, необходимо минимизировать зависимость

$$\varepsilon(\omega_b) = \xi(N_b) = \sqrt{\frac{\sum_{m=0}^{N-1} Q(m) - \bar{Q}(m)}{\sum_{m=0}^{N-1} Q^2(m)}}$$

где $N_b = \frac{\omega_b}{\Delta\omega}$; $\varepsilon(\omega_b)$; $\xi(N_b)$ – относительная среднеквадратическая ошибка; ω_b (N_b) – частота (точка) среза спектра; $\Delta\omega$ – шаг спектра по частоте.

$$\left. \begin{aligned} Q(m) &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Q(k) e^{j \frac{2\pi}{N} km} \\ \bar{Q}(m) &= \frac{1}{N} \left[\sum_{k=0}^{N-1} q_n(k) e^{j \frac{2\pi}{N} km} + \sum_{k=N-N_b+2}^{N-1} q_n(k) e^{j \frac{2\pi}{N} km} \right] \end{aligned} \right\}$$

$$\xi(N_b) = \sqrt{\frac{\sum_{m=0}^{N-1} \left[\sum_{k=0}^{N_b-1} N(k) e^{j\frac{2\pi}{N} km} + \sum_{k=N-N_b+2}^{N-1} H(k) e^{j\frac{2\pi}{N} km} + \sum_{k=N_b}^{N-N_b+1} Q(k) e^{j\frac{2\pi}{N} km} \right]^2}{\sum_{m=0}^{N-1} \left[\sum_{k=0}^{N-1} Q(k) e^{j\frac{2\pi}{N} km} \right]^2}},$$

где $H(k) = Q(k) - q_n(k)$, $q_n(k)$; $Q(k)$ – спектры подстилающей поверхности и снежного покрова соответственно; k, m – дискретные аргументы.

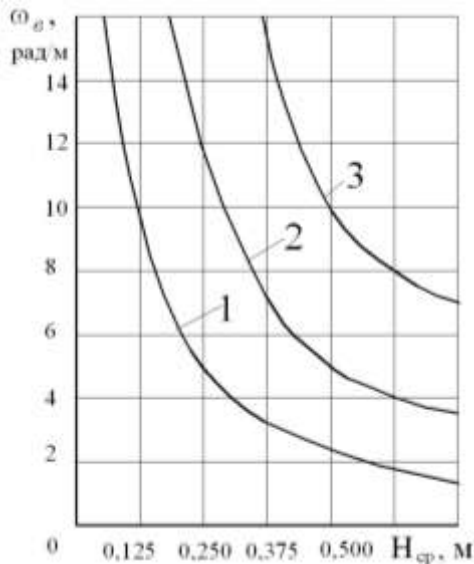


Рис. 4. Зависимость частоты от средней высоты снега:

- 1 - малопересеченная местность;
- 2 - среднепересеченная местность;
- 3 - сильнопересеченная местность

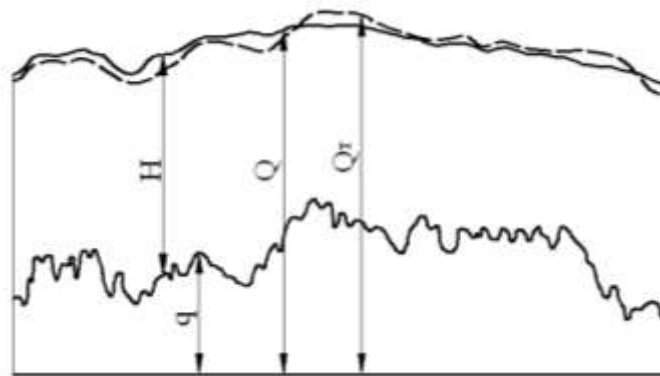


Рис. 5. Расчетная и реальная поверхности снежного покрова

Приведенное выражение показывает, что поверхность снежного покрова, полученная расчетным путем, будет тем точнее повторять реальную, чем меньше разность между значениями комплексных амплитуд на частотах от 0 до ω_b и чем меньше комплексные амплитуды на частотах, выше ω_b . Были определены частоты ω_b , при которых $\varepsilon(\omega_b)$ минимальна и получена зависимость частоты ω_b от средней высоты снежного покрова. На рис. 4 показана зависимость минимальной частоты неровностей, которые сглаживаются снегом, от средней высоты снежного покрова. Из рис. 4 видно, что с увеличением средней высоты снега частота ω_b уменьшается, т.е. неровности длиной до l_b ($l_b = 2\pi/\omega_b$) сглаживаются снегом данной средней высоты.

В целом методика расчета включает в себя следующие основные этапы. В качестве исходных данных вводится микропрофиль твердого основания. При помощи быстрого преобразования Фурье [4] определяется спектр твердого основания. Задается средняя высота снега, по ней определяется ω_b и при помощи обратного преобразования Фурье строится поверхность снежного покрова.

С целью проверки разработанной методики в летний период были проведены замеры микропрофиля бездорожья. Зимой на тех же участках замерялась поверхность снежного покрова. Обработка результатов замеров и дальнейший анализ показали, что поверхности снежного покрова, построенные расчетным путем, близки к реальным, значения среднеквадратической ошибки не превышали $5 \div 7\%$ (рис. 5).

Таким образом, разработан метод, позволяющий по имеющимся характеристикам твердого основания (подстилающей поверхности) и данным о средней высоте снега в конкретном районе, определять поверхность снежного покрова и распределение высоты снега на предполагаемой трассе движения машины.

Библиографический список

1. Снегоходные машины / Л.В. Барахтанов [и др.]. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1986. – 191 с.
2. **Пархиловский, И.Г.** Исследование вероятностных характеристик поверхностей распространенных типов дорог // Автомобильная промышленность. 1968. №8. С. 18–22.
3. **Аникин, А.А.** Проходимость гусеничных машин по снегу / А.А. Аникин, Л.В. Барахтанов, И.О. Донато. – Н. Новгород: Изд-во «Омега», 2009. – 362 с.
4. **Джекинс, Г.** Спектральный анализ и его приложения / Г. Джекинс, Д. Ваттс. – М.: Мир, 1971. – 316 с.

*Дата поступления
в редакцию 25.06.2010*

A.A. Anikin, L.V. Barakhtanov, I.O. Donato, V.A. Shapkin

GEOMETRICAL PARAMETERS OF THE SNOW COVER AS CLOTHS OF THE WAY FOR MOVEMENT OF MACHINES

The article is devoted to snow off-road problems. Are considered the general scheme and the bases of a snow cover. The method is developed, allowing to define a surface of a snow cover and distribution of height of a snow on a prospective line of movement of the machine.

Key words: a snow cover, the firm basis, a surface of a snow, a method of calculation.