

УДК 534.2:621.37

В.А. Узлов, Г.И. Шишков, В.В. Щербаков

ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СНЕЖНОГО ПОКРОВА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведен обзор статей, опубликованных отечественными и зарубежными авторами по вопросам формирования снежного покрова и создания его математических моделей, связывающих такие его параметры, как плотность и влажность с комплексной диэлектрической проницаемостью.

Ключевые слова: снежный покров, плотность снега, влажность снега, диэлектрическая проницаемость снега.

Введение

Особенность климата РФ заключается в том, что значительная часть ее территории на длительное время покрывается снегом. После многочисленных снегопадов образуется снежный покров (СП), состояние которого имеет исключительно важное народнохозяйственное значение.

В частности, СП является полотном дороги для наземных транспортных средств (ТС), вопросы передвижения которых по снегу хорошо освещены в научных публикациях [1-12]. Выяснено, что для оценки проходимости и подвижности ТС необходимо знать ряд физико-механических параметров СП, важнейшими из которых являются структура, толщина, плотность, температура и влажность.

Знание этих параметров СП в любой момент времени имеет большое практическое значение, так как позволяет прогнозировать развитие паводковой обстановки, состояние и оценку лавинной опасности, состояние СП как дорожного полотна пути.

Наиболее применимыми методами определения параметров СП являются дистанционные методы и среди них – исследование в СВЧ-диапазоне, позволяющее измерять радиофизические параметры СП, а по ним восстанавливать его физико-механические параметры.

Наиболее важным радиофизическим параметром является относительная диэлектрическая проницаемость СП. Снег представляет собой смесь из трех фаз воды: твердой (кристаллы льда, снежинки), жидкой (вода), газообразной (пары воды и воздух), – то есть является смесью трех компонент, радиофизические параметры которых существенным образом различны. Состав СП зависит от термодинамического равновесия этих фаз. Все физические свойства снега не могут длительно сохраняться во времени, так как изменение одной из фаз из-за метеорологических факторов ведет к изменению формы и размеров снежинок, их связанности, а это приводит к изменению как плотности и влажности, так и относительной диэлектрической проницаемости СП.

Установление наиболее точных количественных соотношений между радиофизическими и физико-механическими параметрами СП является очень важной задачей, при создании математической модели снежного покрова, учитывающей все его состояния. Знание этих соотношений дает возможность при измерении в СВЧ-диапазоне частот относительной диэлектрической проницаемости снега восстанавливать плотность и влажность СП в режиме реального времени, а по ним определять все остальные свойства снега как дорожного полотна, влияющие на проходимость ТС.

Рассмотрим наиболее важные процессы, происходящие в СП и влияющие на изменение его свойств.

Формирование снежного покрова

Снежный покров складывается в результате ряда снегопадов, отдаленных друг от друга значительными промежутками времени. Снег – это природное минеральное образование, отличающееся от других минералов тем, что его существование протекает вблизи тройной точки воды, поэтому процессы его образования содержат неопределенность, а изменения происходят значительно быстрее, чем у других минералов. Поэтому под влиянием постоянно идущих в толще СП процессов режеляции, сублимации, взгонки, рекристаллизации, фирнизации происходит процесс перекристаллизации и снег приобретает зернистую структуру.

Суть этих процессов кратко характеризуется следующим образом [2, 3, 13].

Режеляция, или повторное смерзание, заключается в плавлении и последующем смерзании тех частей ледяных кристаллов, которые находятся в местах повышенных давлений.

Рекристаллизация – это изменение размеров и формы кристаллов льда за счет перехода атомов и молекул с кристаллической решетки одного кристалла на решетку другого и срастания отдельных кристаллов.

Процессы взгонки и сублимации связаны с тем, что свободная поверхность каждой снежинки одновременно отдает молекулы воды (взгонка), минуя жидкую фазу, и поглощает их (сублимация). Образовавшийся над выступами снежинок водный пар устремляется во впадины и, перенасыщая воздух, осажается в них. В результате поверхность снежных кристаллов округляется, и с течением времени снег становится крупнозернистым. Эти процессы наиболее интенсивно осуществляются в условиях постоянного температурного перепада от теплых нижних к холодным верхним слоям снега. Поэтому в нижних слоях происходит отбор крупных зерен, так как испаряются преимущественно мелкие. Связи между ними нарушаются, и снег становится разрыхленным.

При колебаниях температуры около 0°C приводит к таянию и смерзанию снега, значительно ускоряющему процесс укрупнения снежных зерен. Этот процесс называется фирнизацией. С наступлением периода снеготаяния снег успевает перекристаллизоваться во всей толще в течение нескольких дней таяния.

Большое влияние на эти процессы оказывают как климатические, так и природные условия. Установление точных количественных связей между метеорологическими факторами, временем и соответствующим состоянием СП – задача очень сложная. Тем не менее, в [14-17] приведено решение этой задачи.

На основе теории процессов во фрактальных средах, термодинамики, теории теплопереноса, теории грануляции были созданы математические модели позволяющие отображать процессы формирования СП и его первичного уплотнения, метаморфизма и уплотнения СП под действием различных процессов, таяния СП.

В работе [14] рассматривается агрегационный подход в моделировании СП, подчиняющимся степенным зависимостям от параметров. Фрактальные свойства СП, с математической точки зрения, выражаются в том, что если выбрать одну из связанных частиц в качестве центра сферы, радиус которой R существенно превышает размер отдельной частицы среды, то масса вещества m , сосредоточенная внутри сферы, зависит от радиуса по степенному закону

$$m(R) = R^D, \quad (1)$$

где параметр D является фрактальной размерностью объекта. Для снежинок, представляющих собой фрактальные кластеры, этот параметр находится в пределах $1,7 \leq D \leq 2,5$.

На основе теории грануляции [14-16] разработана модель морфологии снежинок, формирующих СП, и решена задача классификации снежных осадков по метеорологическим данным. Затем рассматривается существование снежинок после завершения фазы транзита из высоких слоев атмосферы и попадания в СП, который имеет тепловой контакт с почвой снизу и приземными слоями атмосферы сверху.

В работе [17] была предложена модель СП в виде упаковки сфер, содержащих в себе

отдельные снежинки (рис. 1). В рамках используемой структурной модели СП исследовались возможные механизмы уплотнения снега, приводящие к изменению типа упаковки сфер.

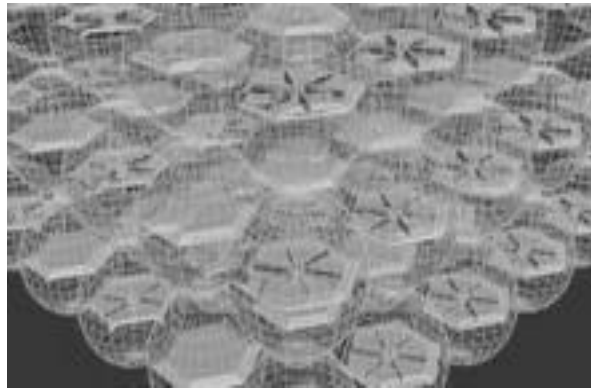


Рис. 1. Модель снежного покрова

Передача тепла в снежной среде выполняется тремя основными способами: теплопроводностью, конвекцией и излучением. Наличие этих механизмов переноса тепла требует использования модели аномального теплопереноса снизу вверх снежного покрова. Расчеты показывают, что при увеличении фрактального размера у основания СП образуется зона более высокой температуры, что приводит к ускоренному метаморфизму нижних слоев (глубинный иней). В плотном снегу аномальность теплопереноса выражается более явно, что хорошо согласуется с эмпирическим описанием процессов метаморфизма и опытными данными.

Классификация видов снега

При формировании СП обычно пользуются качественным описанием видов снега, классифицируя их по структуре и плотности. Исследования, проведенные в ОНИЛВМ [2, 3], рекомендуют снег как полотно пути классифицировать: фрикционно-связной; фрикционный; связной; корковый.

К фрикционно-связному относят сухой снег влажностью до 12%. Размеры кристаллов льда достигают величины от долей миллиметра до $2\div 5$ мм. Фрикционный снег характеризуется сыпучестью, то есть отсутствием механических связей между зернами льда. Максимальные размеры кристаллов льда могут достигать величин до $5\div 10$ мм. Связным считают снег повышенной влажности (более 12%), обладающий высокой пластичностью. Корковым называют снег, на поверхности которого в результате метеорологических воздействий образовалась прочная корка – наст.

Рассмотренные физические процессы, протекающие в снеге, и его физические свойства позволяют сделать вывод, что снег можно рассматривать как дисперсное тело. В терминологии механики грунтов дисперсное тело называют грунтом. Однако СП имеет ряд особенностей, по сравнению с классическими грунтами.

Основной особенностью снега является то, что в нем действуют кристаллизационные (хрупкие, жесткие, необратимые) и водно-коллоидные (пластичные, мягкие, обратимые) связи. В снежном покрове очень быстро (практически в течение нескольких секунд) восстанавливаются новые кристаллизационные связи, а в классических грунтах это происходит в течение значительно большего времени. В естественных грунтах эти связи возникают вследствие наличия свободной воды, заполняющей все его поры. В снеге коллоидные связи образуются вследствие плавления кристаллов от трения при перемещении их друг относительно друга. Образующаяся вода при отрицательной температуре переходит в лед, создавая новые кристаллизационные связи. Такое своеобразие твердой фазы СП обуславливает особенности снега как грунта.

Основные физико-механические и радиофизические параметры снежного покрова

Важнейшими физико-механическими параметрами СП являются плотность, температура, влажность, структура и текстура.

Плотность снега – это масса единицы объема снега. Она зависит от многих факторов и может находиться в пределах от 0,01 до 0,7 г/см³. Плотность зависит от места залегания. Например, в лесу, при отсутствии уплотняющего действия ветра, плотность всегда меньше, чем на открытых местах. По данным отраслевой научно-исследовательской лаборатории вездеходных машин (ОНИЛВМ) НГТУ им. Р.Е. Алексеева [2, 3], средняя плотность снега по различным районам РФ в течение зимне-весеннего периода меняется от 0,15 до 0,6 г/см³. В средней полосе России при высоте СП больше 0,3 м средняя плотность снега в течение зимних месяцев колеблется в пределах от 0,2 до 0,35 г/см³.

Плотность изменяется по глубине СП. Это связано с процессом метаморфизма снега, происходящим под влиянием температуры в СП. Плотность меняется при изменении температуры воздуха и, как следствие, температура снега. С повышением температуры плотность увеличивается.

Перепад температуры между верхним и нижним слоями снега может достигать значительных величин (20÷25°С). При этом температура верхних слоев снега соответствует температуре окружающего воздуха, а температура снега у земли редко опускается ниже -5°С.

Влажность снега можно определить как отношение массы воды в снеге к массе его сухой составляющей. Признаки появления воды в снеге бывают при температуре -4°С. При температурах -1 ÷ 0,5°С влажность составляет 1,5-2%. Увеличение влажности приводит к увеличению плотности снега.

Структура снега характеризуется размером и формой зерен льда, их взаимным расположением и характером связей между ними. Чем плотнее «упакованы» зерна льда, тем выше плотность снега. На рис. 2 приведен фотоснимок с характерной зернистой структуры снежного покрова [18].

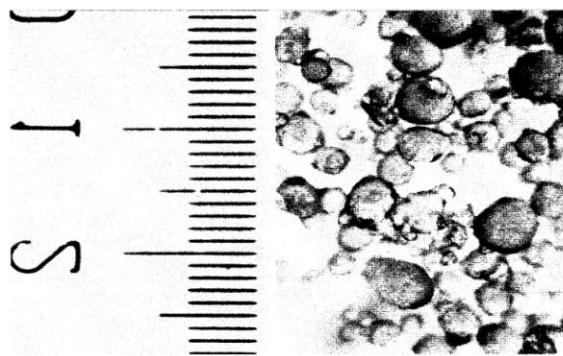


Рис. 2. Зернистая структура снежного покрова

По данным ОНИЛВМ [2, 3], максимальная плотность, полученная путем вибрации в сочетании с утрамбовкой сухого снега поршнем, составляет 0,58 г/см³. Это представляет предел, за которым упаковка зерен теряет свою эффективность. Дальнейший процесс уплотнения может происходить из-за изменения размеров и форм зерен.

Ярко выраженная слоистость СП определяет текстуру снежного покрова. На рис. 3 приведен фотоснимок разреза всей толщи снега, на котором хорошо видна слоистость СП [19].

Слоистость приводит к анизотропии СП, то есть его физические свойства будут различны в различных направлениях.

Электрические свойства СП как диэлектрика описываются с помощью комплексной

относительной диэлектрической проницаемостью (ДП), которая описывает взаимодействие СП с электрическим полем.

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'', \quad (2)$$



Рис. 3. Слоистая текстура снежного покрова

Действительная часть ДП (ε') является мерой того, сколько энергии внешнего электрического поля запасено в СП. Мнимая часть ε'' называется коэффициентом потерь и является мерой потерь энергии, учитывая инерционность процесса поляризации СП и его проводимость. ε'' всегда больше нуля и для диэлектриков много меньше ε' . Обычно пользуются понятием тангенса угла потерь $\text{tg}\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$, определенными как отношение мнимой части ДП к ее действительной части. ε' и ε'' связаны друг с другом соотношением Крамерса-Кронига [21], позволяющее определить ε' по известной величине ε'' и наоборот.

Для определения диэлектрической проницаемости СП при дистанционном зондировании СВЧ-излучением необходимо учитывать слоистость и структуру снега [21, 22]. Количественное восстановление диэлектрической проницаемости снега, по данным измерений СВЧ-сигнала рассеяния, от СП требует создания его электродинамической модели. С электродинамической точки зрения, снег представляет собой сильно рассеивающую среду, состоящую из дискретных плотно упакованных рассеивателей – зерен снега, например, сферической формы, как это изображено на рис. 4 [20].

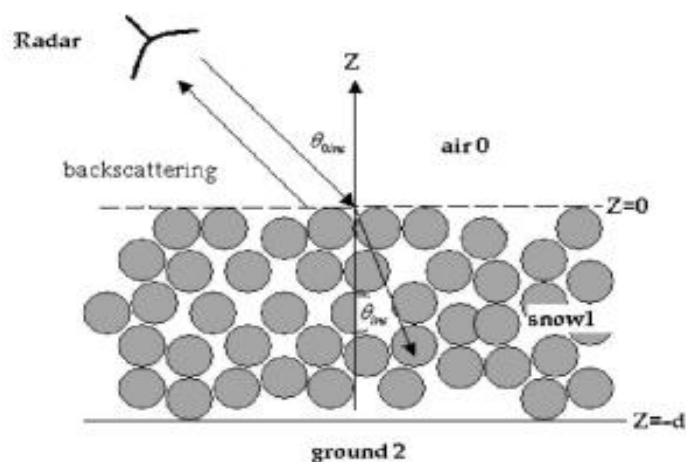


Рис. 4. Модель структуры снежного покрова в виде сферических зерен льда

Микроволновое излучение, проходящее сквозь снежную толщу, поглощается и рассеивается снежными кристаллами. Существует два подхода к способам представления снежно-

го покрова. В первом случае вся толща СП представляется как непрерывное объемное неоднородное пространство [26], в другом – состоит из большого числа слоев (равное количеству снегопадов и оттепелей) [26]. Модель такой структуры приведена на рис. 5. Многослойность СП приводит к его электрической анизотропии.

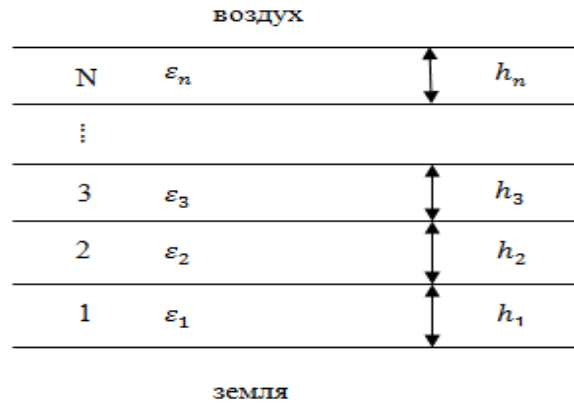


Рис. 5. Модель слоистой структуры снежного покрова

Пусть $h_1, h_2, h_3 \dots h_N$ – толщина каждого слоя СП с соответствующим значением эффективной диэлектрической проницаемостью слоев $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3 \dots \varepsilon_N$. Когда линейные размеры слоев $h_i \ll \lambda$, то такая упорядоченная структура приобретает свойства кристалла. Так если вектор электрического поля перпендикулярен к границам слоев, то эффективная диэлектрическая проницаемость определяется выражением

$$\varepsilon'_{\perp} = \sum_{i=1}^N \frac{h_i}{\varepsilon'_i}, \quad (3)$$

если электрический вектор падающего поля параллелен слоям, то получаем

$$\varepsilon'_{\parallel} = \sum_{i=1}^N h_i \varepsilon'_i. \quad (4)$$

Каждый слой состоит из дискретных некоррелированных и когерентно взаимодействующих рассеивателей. В качестве рассеивателей принимают: для сухого снега – зерна льда [27], для влажного снега – зерна льда, покрытые пленкой воды, которая также собирается в снежных порах и образует мениски между ледяными зернами [28, 29]. Размер зерен, их дисперсия и концентрация существенным образом влияет на электрофизические характеристики СП [23- 25].

Формулы для расчета диэлектрической проницаемости снега

Таким образом, каждый слой СП рассматривается как многокомпонентная смесь, состоящая из льда и воздуха в случае сухого снега и льда, воздуха и воды – в случае влажного снега. Эффективная диэлектрическая проницаемость ε_{Σ} каждого слоя может быть рассчитана по формулам для многокомпонентной смеси.

Действительная часть относительной эффективной диэлектрической проницаемости смеси (ε'_{Σ}) зависит от диэлектрической проницаемости компонент, их содержания и распределения. Наиболее известные формулы расчета действительной части ε'_{Σ} эффективной диэлектрической проницаемости многокомпонентной смеси приведены в табл. 1, где учитываются объемное соотношение компонент, их форма и объемное распределение [32-40].

В табл. 1 приведены зависимости для расчета ε_{Σ} среды при ее различном составе и структуре ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_i$ – диэлектрические проницаемости составляющих, y_1, y_2, y_i – их объемные концентрации соответственно).

Таблица 1

Формулы расчета эффективной диэлектрической проницаемости смеси

Модель среды	Уравнение, определяющее ε_{Σ} , автор
Одномерные сферы с ε_2 , распределенные в пространстве. Между ними – заполняющий компонент с ε_1	$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + 2y_2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - 2y_2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} y_1$, М.А. Максвелл
Плотно упакованные сферы 2-ух сортов с ε_2 . Между ними расположен заполняющий компонент с ε_1	$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{\varepsilon_{\Sigma} - \varepsilon_1}{3\varepsilon_{\Sigma}} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_{\Sigma}} y_2$, К. Бетчер
Составляющие смеси расположены в пространстве хаотично. Невзаимодействующие компоненты	$\lg \varepsilon_{\Sigma} = \sum_i y_i \lg \varepsilon_i$, К. Лихтенеккер
Неупорядоченная смесь двух компонентов для невзаимодействующих компонентов	$\varepsilon_{\Sigma} = a \sqrt{a^2 + \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{2}}$, где $a = \frac{(3y_1 - 1)\varepsilon_1 + (3y_2 - 1)\varepsilon_2}{4}$, В.Н. Оделевский
Смесь двух компонентов	$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_1 y_2 (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{\varepsilon_1 + \frac{1 - y_2}{3} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}$, Дахнов
Смесь эллипсоидных частиц с заполняющим компонентом с высокой разностью по ε	$y_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{\Sigma}}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_{\Sigma}} + y_2 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_{\Sigma}}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_{\Sigma}} = 0$, Бриггеман
Смесь одномерных сфер с ε_2 , между ними среда с ε_1 со слабым заполнением.	$\frac{\varepsilon_{\Sigma} - \varepsilon_2}{\varepsilon_{\Sigma} + 2\varepsilon_2} = y_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2}$, Максвелл-Гарнетт
Смесь произвольно сформированных разнородных частиц	$\varepsilon_{\Sigma}^{1/3} = y_1 \varepsilon_1^{1/3} + y_2 \varepsilon_2^{1/3}$, Лооуенга
Смесь частиц с формой эллипсоида, сферы, цилиндра. Между ними заполняющий компонент	$\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_2 \left[1 + \frac{y_1}{3} \left(2 + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right) \right]$, Polder and van Santen

В случае снежного покрова необходимо рассмотреть свойства двух основных составляющих снега – воды и льда.

Вода относится к дипольным (полярным) диэлектрикам и хорошо описывается уравнениями Дебая:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon' + i\varepsilon'' = \frac{\varepsilon_{ст} + \omega^2 \tau \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} + i \frac{(\varepsilon_{\infty} - \varepsilon_{ст}) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad (5)$$

где $\varepsilon_{ст} = 80$ – диэлектрическая проницаемость воды в постоянном поле ($\omega = 0$); $\varepsilon_{\infty} = 1,8$ – диэлектрическая проницаемость воды в оптическом диапазоне; $\tau = 10^{-10} \div 10^{-15}$ с – время релаксации молекул воды после действия электромагнитного поля [30].

Электрические характеристики льда также хорошо подчиняются соотношению Дебая (5), где $\varepsilon_{ст} = 92 \div 103$ при $t^{\circ} = 0^{\circ} \div -45^{\circ}C$ в случае поликристаллического льда, $\varepsilon_{\infty} = 3,15 \pm 0,05$ и не зависит от температуры. Значение ε' падает от 4,1 до 3,3 при изменении частоты от 1 до 100 МГц. В Санти- и миллиметровом диапазонах $\varepsilon' = 3,17$ [21]. Время релаксации льда $\tau = 10^{-4}$ с и зависит от температуры по закону $\lg \tau = \frac{2900}{T} - 15,3$, где T – абсолютная температура. Мнимая часть ε'' обычно принимается равной $\varepsilon'' = 10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-2}$.

Большое разнообразие формул для расчета эффективной ДП смесей породило большое количество эмпирических формул, соответствующих различным состояниям снежного покрова. Эти формулы учитывают плотность компонент смеси, представляющей собой СП, размеры, вид и распределение зерен снега в СП.

В результате использования формул из табл. 1 для разнородных смесей с учетом частотной зависимости диэлектрической проницаемости воды и льда были разработаны эмпирические формулы, связывающие электрические параметры снежного покрова ε'_{Σ} , ε''_{Σ} с плотностью ρ , влажностью w и температурой СП. Рассмотрим два разных состояния снежного покрова – сухой и влажный снег.

В случае сухого снега Tiuri [39], изучая свойства СП на частотах 1,9 ГГц, 5,6 ГГц, 12,6 ГГц, установил, что $\varepsilon_{\text{эфф}}$ ДП СП зависит исключительно от плотности СП, независимо от его возраста:

$$\varepsilon'_{\Sigma} = 1 + 1,7\rho + 0,7\rho^2. \quad (6)$$

где ρ – относительная плотность сухого СП (по отношению к плотности воды).

Hallikainen [33] в частотном диапазоне 4-18 ГГц получил формулу для сухого снега:

$$\varepsilon'_{\Sigma} = 1 + 1,91\rho. \quad (7)$$

Cumming [43] чтобы вычислить эффективную диэлектрическую проницаемость ε'_{Σ} использовал теорию смеси [34]:

$$\frac{\varepsilon'_{\Sigma} - 1}{3\varepsilon'_{\Sigma}} = \frac{\rho_i}{\rho_s} * \frac{\varepsilon_i - 1}{\varepsilon_i + 2\varepsilon'_{\Sigma}}, \quad (8)$$

где $\rho_i = 0,917 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ – плотность льда, $\varepsilon_i = 3,17$ – действительная часть диэлектрической проницаемости льда. Формула (8) работает в диапазоне относительной снежной плотности $\frac{\rho_i}{\rho_s} = 0 \div 0,5$. Диаметр снежного зерна находится в пределах от 0,5 ÷ 1,5 мм.

Sihvola и Kong [36] на основе формулы смеси Polden and van Santen [35], учитывая, что зерна льда представляют собой эллипсоид вращения, получили формулу для расчета действительной части эффективной ДП СП:

$$\varepsilon'_{\Sigma} = 1 + \frac{v(\varepsilon_i - 1) \sum_{i=1}^3 \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_a + A_i(\varepsilon_i - 1)}}{3 - v(\varepsilon_i - 1) \sum_{i=1}^3 \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_a + A_i(\varepsilon_i - 1)}}, \quad (9)$$

где $\varepsilon_a = 1 + \alpha(\varepsilon'_{\Sigma} - 1)$, $\alpha = 1 - A_i$, v – объемная доля льда СП; ε_i – диэлектрическая проницаемость эллипсоида зерен льда; A_i – показатель деполяризации эллипсоидов вдоль осей x, y, z (1–3), причем для эллипсоида $A_1 + A_2 + A_3 = 1$.

Frolov and Macheret [32], используя формулу смешивания Лооуенга [34], получили формулу для действительной части относительной эффективной ДП сухого снега:

$$\varepsilon'_{\Sigma} = \left[\frac{\rho}{\rho_i} \left(\varepsilon_i^{\frac{1}{3}} - 1 \right) + 1 \right]^3, \quad (10)$$

где $\varepsilon_i = 3,17$ – действительная часть ДП льда; $\rho_i = 0,917 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ – его плотность; ρ – плотность СП.

Для сухого и влажного многослойного снега в [41, 43] Matzler, используя формулу смеси [34] Лооуенга, получил выражение для ε'_{Σ} :

$$\varepsilon'_{\Sigma} = 1 + 1,5995\rho + 1,86\rho^3; \quad 0 \leq \rho \leq 0,4 \frac{\text{гр}}{\text{см}^3}, \quad (11)$$

$$\varepsilon'_{\Sigma} = ((1 - v)\varepsilon_o + v\varepsilon_i)^3; \quad \rho > 0,4 \frac{\text{гр}}{\text{см}^3},$$

где $\varepsilon_o = 1$; $\varepsilon_i = 3,215$; $v = \frac{\rho}{\rho_i}$, $\rho_i = 0,917 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, ρ – плотность СП. Мнимая часть диэлектрической проницаемости СП дается выражением

$$\varepsilon''_{\Sigma} = \sqrt{\varepsilon'_{\Sigma}} k^2 v \varepsilon_i'',$$

где k – экспериментально найденный параметр:

$$k^2 \approx 0,44 \text{ при } v \leq 0,33; \quad k^2 \approx 0,54 \text{ при } v = 0,5. \quad (12)$$

Мнимая часть ДП для многослойной структуры влажного СП получена Tiuri [39]:

$$\varepsilon''_{\Sigma} = \varepsilon_i'' (0,52 \rho + 0,62 \rho^2), \quad (13)$$

где ρ – плотность снега,

$$\alpha = (0,00504 + 0,0062 * \theta) * \exp(-22,1 * \theta),$$

$$\theta = \frac{300K}{T} - 1,$$

$$\beta = \frac{B_1}{T} * \frac{\exp\left(\frac{b}{T}\right)}{\left(\exp\left(\frac{b}{T}\right) - 1\right)^2} + B_2 f^2 + \exp(-10,02 + 0,0364 * (T - 273K)),$$

где f – частота, ГГц; T – абсолютная температура снега; $B_1 = 0,0207 K * ГГц^{-1}$, $b = 335 K$; $B_2 = 1,16 * 10^{-11} ГГц^{-3}$ [43].

Для влажного снега, в случае диаметров зерен льда и воды, равных $0,1 \div 2$, мм следуя [39], получаем

$$\varepsilon'_{сн} = 1 + 1,7 \left(\frac{\rho_{сн}}{\rho_{в}}\right) + 0,7 \left(\frac{\rho_{сн}}{\rho_{в}}\right)^2 + 8,7W_V + 70W_V^2; \quad (14)$$

$$\varepsilon''_{сн} = \left(\frac{f}{10^9}\right) * (0,9W_V + 7,5W_V^2), \quad (15)$$

где $\rho_{сн} \left(\frac{г}{см^3}\right)$ – плотность сухого снега; $\rho_{в} \cong 1 \left(\frac{г}{см^3}\right)$ – плотность воды; W_V – объемная влажность (объем воды по отношению к общему объему СП); f – частота, Гц. Формула соответствует частотному диапазону $f = 500 \div 10^3$ МГц.

Используя формулу смеси Polder and van Santen [35], в работе [40] получена формула для вычисления ДП мокрого снега:

$$\varepsilon'_{\Sigma} = \varepsilon'_d \left[1 - \frac{W}{3} (81 - \varepsilon'_d) * \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\varepsilon'_{\Sigma} + (81 - \varepsilon'_{\Sigma}) A_i} \right]^{-1}, \quad (16)$$

где A_i – коэффициент деполяризации для частиц льда в виде эллипса ($A_1 + A_2 + A_3 = 1$); ε'_d – ДП сухого снега (может быть вычислена по этой же формуле (16) при значениях, равных $A_i = (0, 0, 1)$, соответствующих распределению в виде ледяных дисков).

Приведенные модели снежного покрова и формулы расчета ε'_{Σ} и ε''_{Σ} не исчерпывают всего многообразия состояний снежной среды. Наличие влаги во время таяния приводит к значительному изменению ее физических и радиофизических характеристик, поэтому модели снежного покрова непрерывно совершенствуются.

Таким образом, в статье рассмотрены физико-механические и физико-электрические параметры СП, которые взаимосвязаны друг с другом. Это дает возможность с помощью дистанционного измерения параметров рассеянного СВЧ-излучения от снежного покрова измерить эффективную диэлектрическую проницаемость снега и, по приведенным в данной статье формулам, восстановить плотность и влажность снежного покрова.

Библиографический список

1. **Беляков, В.В.** Взаимодействие со снежным покровом эластичных движителей специальных транспортных средств: дисс. ... д-р техн. наук: 05.05.03 / Беляков В.В. – Нижний Новгород 1999. – 485 с.
2. **Макаров, В.** Расчет проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу / В. Макаров, В. Беляков, LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. 2012. – 160 с.
3. Снегоходные машины / Л.В. Барахтанов [и др.]. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1986. – 191 с.
4. **Макаров, В.С.** Формирование снежного покрова в зависимости от ландшафта местности и оценка подвижности транспортно-технологических машин в течение зимнего периода / В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, А.М. Беляев, А.В. Папунин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. №1. С. 155–160.
5. **Макаров, В.С.** Оценка эффективности движения колесных машин на основании статистических характеристик снежного покрова / В.С. Макаров [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. №1. С. 150-157.
6. **Макаров, В.С.** Методика расчета и оценка проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс... канд. техн. наук: 05.05.03 / Макаров В.С. – Н. Новгород, 2009. – 161 с.

7. **Зезюлин, Д.В.** Расчетный анализ влияния параметров двигателей на показатели эффективности колесных машин при движении по снежному полотну пути / Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Леса России и хозяйство в них. 2012. Т. 1-2. № 42-43. С. 41-42.
8. **Зезюлин, Д.В.** Разработка методики выбора конструкционных параметров двигателей, обеспечивающих эффективность движения колесных машин по снегу: дисс... канд. техн. наук: 05.05.03 / Зезюлин Д.В. – Н. Новгород, 2013. – 218 с.
9. **Зезюлин, Д.В.** Влияние параметров двигателей на показатели эффективности колесных машин при движении по снегу / Д.В. Зезюлин [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5; URL: www.science-education.ru/105-6927 (дата обращения: 17.09.2012).
10. **Беляков, В.В.** Оценка эффективности специальных транспортных средств при движении по снегу // В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е.Алексеева. 2012. № 2 (95). С. 156–166.
11. **Беляков, В.В.** Транспортно-технологические проблемы Северного Кавказа / В.В. Беляков, У.Ш.Вахидов, Ю.И. Молев; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н.Новгород, 2009. – 330 с.
12. Вездеходные транспортно-технологические машины. Основы теории движения. Научно-техническое издание: монография / под ред. В.В. Белякова и А.П. Куляшова. – Н. Новгород: ТАЛАН, 2004. – 961 с.
13. Макаров, В.С. Статистический анализ характеристик снежного покрова // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 1; URL: <http://www.science-education.ru/107-8289> (дата обращения: 05.02.2013).
14. **Бутенков, С.А.** Математические модели сред с фрактальной структурой на основе методов пространственной грануляции / С.А. Бутенков [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. №9. С. 209–218.
15. **Сухинов, А.И.** Моделирование снежного покрова на кластерных вычислительных системах с использованием методов гранулирования многомерных данных / А.И. Сухинов, С.А. Бутенков, А.Л. Жуков // Известия ЮФУ. Технические науки. 2009. №8. С. 213–223.
16. **Бутенков, С.А.** Гранулирование геометрических данных в задачах автоматизированного проектирования / С.А. Бутенков, А.Л. Жуков // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. №9. С. 87–92.
17. **Жуков, А.Л.** Интеллектуальный прогноз и классификация состава свежевыпавшего снега // Доклады Адыгской (Черкесской) международной академии наук. – Нальчик: 2010. Т.12. №2. С. 99–103.
18. **Kendra, J. R.** Radar Measurements of Snow: Experiment and Analysis / J. R. Kendra, K. Sarabandi, F.T. Ulaby // IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing. 1998. V. 36. NO. 3. P. 864–879.
19. **Bernier, M.** The Potential of Times Series of C-Band SAR Data to Monitor Dry and Shallow Snow Cover / M. Bernier, J.P. Fortin // IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing. 1998. V. 36. NO. 1. P. 226–243.
20. **Tsang, L.** Modeling Active Microwave Remote Sensing of Snow Using Dense Media Radiative Transfer (DMRT) Theory With Multiple-Scattering Effects / L. Tsang [et al.] // IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing. 2007. V. 45. NO. 4. P. 990–1004.
21. Подповерхностная радиолокация / М.И. Филькенштейн [и др.] / под ред. М.И. Филькенштейна. – М.: Радио и связь. 1994. – 216 с.
22. Введение в георадиолокацию: учеб. пособие / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. – М.: Издательство МГУ, 2004. – 153 с.
23. **Кренке, А.Н.** Геоинформационные технологии в исследованиях сопряженности полей параметров снежного покрова, климата и гидрологических процессов / А.Н. Кренке [и др.] // Мат. гляциологич. исслед. 2000. Вып. 88. С. 60.
24. Matzler C., Huppi R. Review of signature studies for microwave remote sensing of snowpacks // Advances Space Research. 1989. V. 9. N. 1. P. 253.
25. **Боярский, Д.А.** Микроволновая радиометрия снежного покрова и мерзлой почвы на частоте 3,95 ГГц // Изв. вузов. Радиофизика. 1997. Т. XL. № 8. С. 1050.
26. **Stogrin, A.** Study of the Microwave Brightness Temperature of Snow from the Point of View of Strong Fluctuation Theory // IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing. 1986. V. GE24. N. 2. P. 220.
27. **Tsang, L.** Theory and experiment for passive microwave remote sensing of snowpacks / L. Tsang [et al.] // J. Geophysical Research. 1979. V. 84. N. B10. P. 5669.
28. **Tiuri, M.E.** Theoretical and experimental studies of microwave radiation from a natural snow field / M.E. Tiuri, H.Schultz // NASA Workshop on the Microwave Remote Sensing of Snowpack Prop. Ft. Collins. Colorado, 20–22 May. 1980. P. 225.

29. **Davis, R.E.** Snow property measurement correlative to microwave emission at 35 GHz / R.E. Davis, J. Dozier, A.T.C. Chang // IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing. 1987. V. 25. N. 6. P. 751.
30. Миллиметровая радиолокация: методы обнаружения и наведения в условиях естественных и организованных помех / А.Б. Борзов [и др.]. – М.: Радиотехника, 2010. – 376 с.
31. **Дмитриев, В.В.** Расчет излучательной способности снежного покрова квазистатическим методом и методом уравнения переноса излучения / В.В. Дмитриев [и др.] // Изв. вузов. Радиофизика. 1990. Т. 33. № 9. С. 1020.
32. **Frolov, A.D.** On dielectric properties of dry and wet snow / A.D.Frolov, Y.Y. Macheret // Hydrological Processes. 1999. № 13. P. 1755–1760.
33. Hallikainen, M., Ulaby, F.T., and Abderazik, M. (1982) Measurements of the dielectric properties of snow in the 4-18 GHz. European Microwave Conference. Helsinki Finland, 151-156.
34. **Looyenga, H.** Dielectric constant of heterogeneous mixture // Physica. 1965. № 31. P. 401–406.
35. **Polder, D.** The effective permeability of mixtures of solids / D. Polder, J.H. Van Santen // Physica. 1946. № 12. P. 257–271.
36. **Sihvola, H.** Effective permittivity of dielectric mixtures / H. Sihvola, J. Kong // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1988. № 26(4). P. 420–429.
37. D.A.G. Bruggeman. Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen/Ann.Phys. (Leipzig) 24. 1935. P. 636–679.
38. J.C.M. Garnett. Colours in metal glasses and in metallic films // Phil.Trans. R. Soc. Lond. 203. 1904. P. 385–420.
39. **Tiuri, M.E.** The complex dielectric constant of snow at microwave frequencies / M.E. Tiuri // IEEE J. Oceanic Eng., OE-9. 1984. P. 377–382.
40. **Wiesmann, A.** and Mätzler, C. Microwave emission model of layered snowpacks. Remote Sensing of Environment. 1999. 70(3), 307-316.
41. **Mätzler, C.** Microwave permittivity of dry snow // IEEE Transactions Geosci. and Rem. Sens. 1996. V. 34. No. 2. P. 573–581.
42. **Cumming, W. A.** (1952). The dielectric properties of ice and snow at 3.2 centimeters // Applied Physics, 23(7), 768-73.
43. **Wiesmann, A.** Microwave Emission Model of Layered Snowpacks / A. Wiesmann, C. Mätzler // Research Report, Microwave Dept., Institute of Applied Physics, University of Bern. 1998. No. 98-2.

*Дата поступления
в редакцию 10.02.2014*

V.A. Uzlov, G.I. Shishkov, V.V. Sherbakov

THE BASIC PHYSICAL PARAMETERS OF THE SNOW COVER

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

Purpose The knowledge physical parameter snow allows to forecast the development an snow-water situations, condition and estimation to avalanche danger, condition snow as road.

Design/methodology/approach The brought results experiment studies characteristic snow and teoretic researches dielectric to permeability of the snow on base of the presentation of the snow as geterogeneous mixture.

Findings The brought review article published domestic and foreign author on questions of the advantages snow cover and creation his mathematical models, linking such his parameters as density and moisture with complex dielectric permeability of the snow.

Research limitations/implications The brought formulas for диэлектрической permeability snow can not take into account all possible conditions of the snow. The Snow this natural mineral formation, differring from the other mineral that that his existence runs on triple point of water so processes of his formation contains the uncertainty, but change occur vastly quicker, than beside other mineralov.

Originality/value They are brought empirical formulas involving complex dielectric permeability with density and moisture of the snow working at frequency from 0,1 MHZ before 18 GHZ.

Keywords: snow cover, density snow, moisture snow, dielectric permeability snow.