

УДК 537.226

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ НА МЕТРОВЫХ — САНТИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

Ю. И. Лещанский, Н. В. Ульянычев

На примере песчано-глинистых грунтов показаны возможности предлагаемого метода расчета, позволяющего по имеющимся экспериментальным данным для отдельных длин волн в указанном диапазоне при некоторой плотности и температуре песка и глины найти дисперсионные характеристики электрических параметров песчано-глинистого грунта в зависимости от заданной объемной плотности, механического состава, влажности и температуры этого грунта.

Для расчета структуры электромагнитного поля вблизи поверхности земли необходимо знать электрические параметры грунта ϵ' и ϵ'' . Однако до настоящего времени не имелось методов расчета электрических параметров для песчано-глинистых грунтов, дающих в диапазоне метровых — сантиметровых радиоволн хорошее совпадение с известными экспериментальными данными [1] и отражающих физику явлений. Так, формулы для погонного затухания радиоволн — Q (дБ/м), приведенные в [2], представляют собой линейно-ломаную аппроксимацию экспериментальных результатов и не учитывают влияния температуры и механического состава грунта. Кроме того, знание Q (дБ/м) не дает полной информации об электрических свойствах грунта.

Ограничившись диапазоном длин волн в свободном пространстве — λ_0 от 0,8 см до 3 м и пренебрегая в связи с этим рассеянием на отдельных частицах грунта, считаем, что реальный грунт можно рассматривать с точки зрения его диэлектрических характеристик как статистическую механическую смесь твердых частиц, воздуха, пленочной влаги и порового электролита. Для выражения эффективной диэлектрической проницаемости этой смеси через проницаемости и объемные концентрации компонент p_i , где p_i есть отношение объема компоненты к полному объему образца, в литературе существует более десятка формул [3–7]. Из них путем предварительного сравнения с экспериментом были отобраны две формулы: формула Оделевского [6] как наиболее часто применяемая для статистических смесей и формула Беренцвейга [7]. Как показал расчет, формула Оделевского, несколько занижая значения ϵ' , дает сильно заниженное значение потерь по сравнению с экспериментом. Поэтому в дальнейшем для расчета использовалась формула Беренцвейга, которая имеет вид

$$\epsilon = \bar{\epsilon} + \frac{\sum_{i=0}^k p_i \frac{\epsilon_i - \bar{\epsilon}}{\epsilon_i + 2\bar{\epsilon}}}{\sum_{i=0}^k p_i \frac{1}{\epsilon_i + 2\bar{\epsilon}}}, \quad (1)$$

где

$$\bar{\epsilon} = \sum_{i=0}^k p_i \epsilon_i.$$

Для трехфазной смеси $k=2$, а остальные параметры определяются следующим образом: $p_0 = n - p_1$ — объемное содержание воздуха, n — пористость грунта, равная в нашем случае 35%, а p_1 — объемная влажность, равная отношению объема воды в образце к объему образца и являющаяся в нашем случае переменной величиной, $p_2 = 1 - n$ — объемное содержание твердой фазы, ϵ_2 — диэлектрическая проницаемость твердой фазы, равная в нашем случае 4,6 (кварц, полевой шпат [8]), ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость воздуха, которая принималась равной единице, ϵ_1 — диэлектрическая проницаемость электролита и пленочной влаги, представляющая собой алгебраическую сумму двух слагаемых:

$$\epsilon_1 = \epsilon_d - j\epsilon''_{пр}. \quad (2)$$

В выражении (2) ϵ_d — диэлектрическая проницаемость дистиллированной воды, определяемая по формуле Дебая [9],

$$\epsilon_d = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{1 + j \frac{\lambda_m}{\lambda_0}} + \epsilon_\infty, \quad (3)$$

где λ_m , ϵ_0 , ϵ_∞ имеют при $T = 18^\circ\text{C}$ значения 1,66; 81 и 5,5 см соответственно [10], λ_0 выражается в сантиметрах. Потери $\epsilon''_{пр}$ обусловлены ионной удельной проводимостью σ . Их величина выражается формулой

$$\epsilon''_{пр} = 60 \sigma \lambda_0. \quad (4)$$

Переход от объемной влажности к абсолютной $p_{абс}$, измеряемой в эксперименте, был сделан при помощи следующей модели. При увеличении влажности от 0 до предельной вода заполняет поры и объем образца не меняется, что дает следующую зависимость:

$$p_{абс} = \frac{p_1}{p_1 + (1 - n)\rho},$$

где ρ — удельный вес твердой фазы, равный в нашем случае 2,65 г/см³ [8]. При дальнейшем увлажнении приращение объема образца равно избыточному объему воды и

$$p_{абс} = \frac{p_1}{p_1 + (1 - p_1)\rho}.$$

Полученные зависимости были проверены экспериментально и удовлетворительно подтвердились.

Расчет показал, что величина $\epsilon''_{пр}$ дает несущественный вклад в ϵ_1 в диапазоне длин волн $\lambda_0 = 1 \div 10$ см, и поэтому здесь кривые зависимости ϵ' и ϵ'' от влажности совпадают для песка и глины, поскольку они имеют практически равные остальные из вышеперечисленных параметров.

Существенно заметить, что расчет кривой для влажности, превышающей 17%, производился по формуле для двухфазной смеси, в которую превращается трехфазная при полном вытеснении воздуха водой. В этом случае использовалась формула (1) при $p_0 = 0$ и $p_2 = 1 - p_1$. При этом расчетная кривая для глины воспроизводит изгиб экспериментальной кривой в точке предельной влажности (17%). Песок при влажности выше предельной расплывается, и поэтому для него нет экспериментальных точек, соответствующих $p_{абс} \geq 17\%$.

На длинах волн больше $\lambda_0 = 10$ см начинает сказываться ионная проводимость. Величина удельной ионной проводимости σ определялась по экспериментальным значениям комплексной диэлектрической проницаемости ϵ для песка и глины на длине волны $\lambda_0 = 226$ см в точке предельной влажности путем использования формулы (1) для двухфазной смеси, разрешенной относительно ϵ_1 , а также формул (2)–(4). Оказалось, что величина σ для песка имеет значение $9,2 \cdot 10^{-2}$ Сим·м⁻¹ и сохраняет постоянное значение по всему рассматриваемому диапазону длин волн. Величина удельной проводимости для глины не является постоянной, а подчиняется зависимости $\sigma = 14,5/\sqrt{\lambda_0}$ Сим·м⁻¹, которая была получена путем аппроксимации экспериментальных данных, соответствующих пяти длинам волн: $\lambda_0 = 3,17; 10; 30; 90$ и 226 см. Как видно из рис. 1, и в этом случае получаем удовлетворительное согласие расчета с экспериментом.

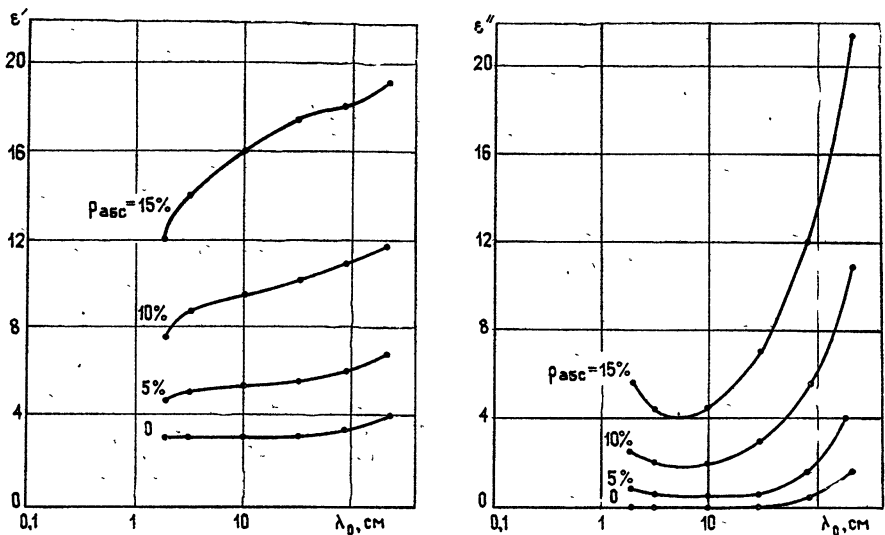


Рис. 1. Дисперсионные кривые для глины при различных значениях влажности: точки — экспериментальные значения.

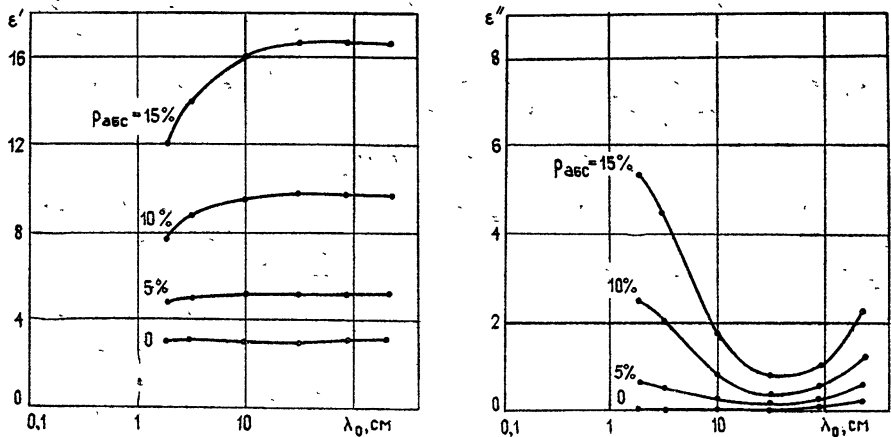


Рис. 2. Дисперсионные кривые для песка при различных значениях влажности: точки — экспериментальные значения.

Учет дисперсии воздушно-сухих образцов, которая возникает на метровых волнах, производился на основе экспериментальных значений комплексной диэлектрической проницаемости ϵ воздушно-сухих образцов путем разрешения формулы (1) при $p_1 = 0$ относительно ϵ_2 .

Дисперсионные кривые, изображенные на рис. 1, 2, иллюстрируют поведение диэлектрических характеристик глины и песка и позволяют определить их при любой влажности и на любой частоте в рассматриваемом диапазоне.

Для расчета диэлектрических характеристик при температурах, отличных от $T = 18^\circ\text{C}$, можно воспользоваться, например, таблицей, приведенной в [10], в которой даны значения ϵ_d в диапазоне от 0 до 40°C . Зависимость $\epsilon'_{\text{пр}}$ от температуры определяется температурной зависимостью σ , которая для слабых электролитов приведена в [11]. Остальные параметры можно считать не зависящими от температуры.

Для определения диэлектрических характеристик реального песчано-глинистого грунта необходимо вначале рассчитать диэлектрические характеристики каждой из его составных частей (влажного песка и глины), пользуясь вышеприведенной методикой, а затем, зная объемную плотность грунта и его механический состав, т. е. относительное содержание в нем песка и глины, рассчитать его диэлектрические характеристики по формуле (1) для двухфазной смеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. И. Лешанский, Г. Н. Лебедева, В. Д. Шумилин, Изв. вузов — Радиофизика, 14, № 4, 562 (1971).
2. Ю. И. Лешанский, Г. Н. Лебедева, Изв. вузов — Радиофизика, 11, № 2, 205 (1968).
3. R. S. Smith, Appl. Phys, 27, № 7, 824 (1972).
4. J. Loeb, Onde électrique, 42, № 424—425, 613 (1969).
5. W. Niesel, Ann Phys, 10, № 6, 336 (1952).
6. В. И. Оделевский, ЖТФ, 21, № 6, 667 (1951).
7. Р. А. Беренцвейг, Тр. НИИ асбестоцемент, № 25, 73 (1969).
8. С. В. Нерпин, А. Ф. Чудновский, Физика почвы, изд. Наука, М., 1967.
9. П. Дебай, Г. Закк, Теория электрических свойств молекул, под ред. Л. Э. Гуревича, Объединенное научно-техническое издательство, М.—Л., 1936.
10. Распространение ультракоротких радиоволн, под ред. Б. А. Шиллерова, изд. Сов. радио, М., 1954.
11. Г. Я. Черняк, Диэлектрические методы исследования влажных грунтов, изд. Недра, М., 1964.

Московский физико-технический институт

Поступила в редакцию
2 июля 1979 г.

CALCULATION OF ELECTRIC PARAMETERS OF SANDY-CLAY SOILS AT METER AND CENTIMETER WAVELENGTHS

Yu I. Leshchanskij, N. V. Ul'yanychev

A calculation method is suggested for dispersion characteristics of electric soil parameters over the given volume density of the soil, its mechanical composition, humidity and temperature. The possibilities of the method are considered with the help of experimental data for sandy-clay soil in centimeter-meter wavelengths.