



УДК 551.341

Особенности электрофизических свойств механических смесей лед - песок

Копосов Г. Д., Тягунин А. В.

ГОУ ВПО «Поморский государственный университет», Архангельск

Аннотация

В диапазоне температур 77 – 270К исследовались температурные зависимости компонентов комплексной диэлектрической проницаемости смеси гранулированный лед – песок при различных соотношениях льда и песка. Обнаружены аномалии в величинах и концентрационных зависимостях относительной диэлектрической проницаемости. Проведена обработка результатов на основе рефракционной модели. Дополнительными экспериментами установлен факт перехода тонкой пленки воды с гранул льда на гранулы песка. Аномалии диэлектрической проницаемости связываются с появлением пленки связанной воды на гранулах песка.

Ключевые слова: Гранулированный лед, песок, диэлектрическая проницаемость, рефракционная модель, температурная зависимость

Within the range of temperatures 77 - 270K temperature dependences of components of complex dielectric permeability of an mixture the granulated ice and sand were studied at various propotion of ice and sand. The anomalies in sizes and concentration dependences of relative dielectric permeability were discovered. Processing of results on the basis of refractive model was made. The fact of transition of thin film of waters from granules of ice on granules of sand was established with the help of additional experiments. Anomalies of dielectric penetration are connected with the appearance of film of combined water on granules of sand.

Keywords: The granulated ice, sand, dielectric permeability, refractive model, temperature dependence

Введение

Обстоятельный обзор исследований электрофизических свойств мерзлых влагосодержащих дисперсных сред (ВДС) представлен в монографии А. Д. Фролова [1] В работе [2] одним из авторов настоящей статьи сформулированы недостатки ранее проводившихся исследований мерзлых ВДС. Одним из таких недостатков является отсутствие исследований механических смесей лед – порошок. Наше внимание к механической смеси гранулированный лед – песок было обусловлено необходимостью выявления специфических свойств льда находящегося в дисперсной фазе. Меняя соотношение компонентов в смеси, можно было бы, используя дифференциальную методику, определить вклад компонентов в диэлектрическую проницаемость.

С практической точки зрения исследование подобных систем позволяет смоделировать земную поверхность, когда ветер приводит к смешиванию снега и частиц грунта. Знание об электрофизических свойствах смесей снег – песок становится важным для расшифровки сигналов СВЧ зондирования земной поверхности в условиях ветровой эрозии почв при отрицательных температурах

Методика эксперимента

Приготовление смесей осуществлялось при температурах $-8 \div -10$ °С в специальной термокамере. Гранулированный лед получался осаждением распыленной воды в жидкий азот. Размеры гранул льда составляли 10 – 90 мкм. Песок дробился до тех же размеров.

Исследовались смеси при начальных объемных соотношениях компонентов лед – песок 9:1, 8:2, 7:3, 6:4, 5:5, 4:6, 3:7, 2:8, 1:9, а также каждая из компонент отдельно.

Измерялись с использованием измерителя иммитанса Е7-14 емкость (С), проводимость (G) и добротность (Q) измерительной ячейки, заполненной исследуемой смесью. Измерения осуществлялись в диапазоне температур 77 – 270К на частотах 0,1; 1 и 10 кГц

После измерения определялась масса смеси, а после высушивания находилась масса песка. Это позволяло определить относительные объемы песка и льда в смеси.

$$V_n = \frac{m_n}{\rho_n \cdot V_{яч}} \text{ и } V_l = \frac{m_l}{\rho_l \cdot V_{яч}}$$

Действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости рассчитывалась по формуле:

$$\varepsilon_1 = \frac{(C_{зя} - C_{ня}) \cdot d_{зя}}{\varepsilon_0 \cdot S} + \frac{d_{зя}}{d_{ня}},$$

где индексы “зя” и “ня” относятся соответственно к заполненной и пустой ячейке.

Мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости находилась:

$$\varepsilon_2 = \frac{d_{зя}}{\varepsilon_0 S} \left(\frac{C_{зя}}{Q_{зя}} - \frac{C_{ня}}{Q_{ня}} \right)$$

Результаты эксперимента

На рис. 1 а, б представлены температурные зависимости действительной части комплексной диэлектрической проницаемости ($\varepsilon = \varepsilon_1 - j\varepsilon_2$) на частоте 1 и 10 кГц и при различных соотношениях объемов льда и песка при составлении смеси.

На рис. 2 а, б приведены аналогичные зависимости для мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости ε_2 .

На рис. 3 приведена зависимость действительной части комплексной диэлектрической проницаемости от соотношения смешиваемых объемов лед – песок. Температурные зависимости величин ε_1 и ε_2 подобны тем, что

наблюдаются для диспергированного и объемного льда [3]. Возрастание ε_1 и ε_2 при $T > 150\text{K}$ связано с возбуждением релаксаторов во льду [4].

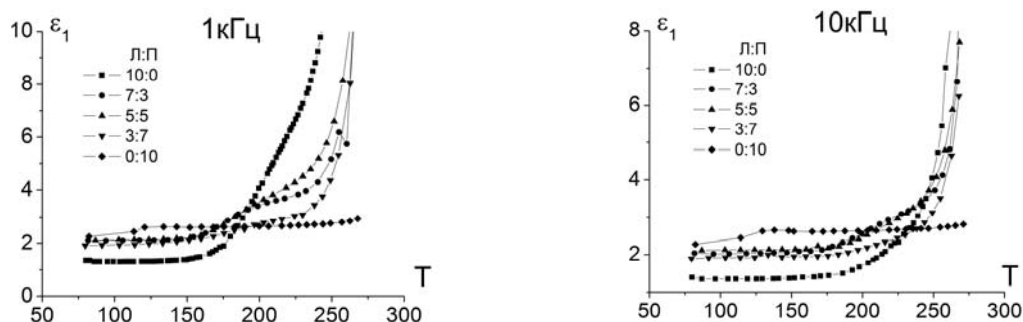


Рис. 1 а,б. Температурные зависимости действительной части комплексной диэлектрической проницаемости механической смеси гранулированный лед – песок при различных соотношениях компонент на частотах 1кГц и 10кГц

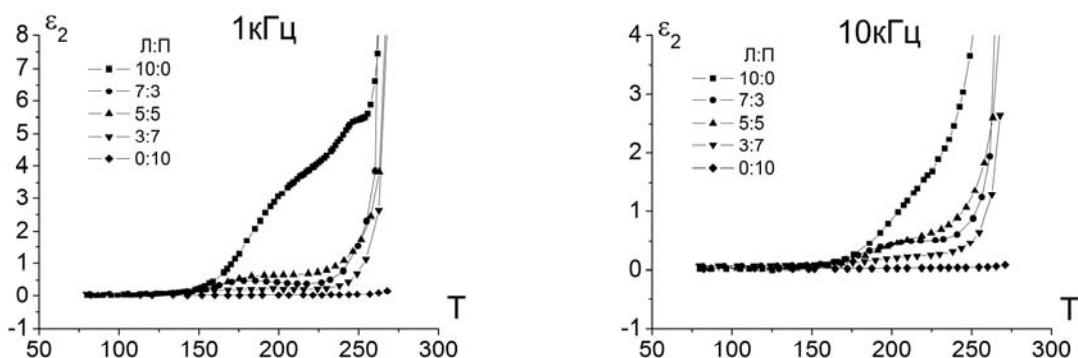


Рис. 2 а,б. Температурные зависимости мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости механической смеси гранулированный лед – песок при различных соотношениях компонент на частотах 1кГц и 10кГц

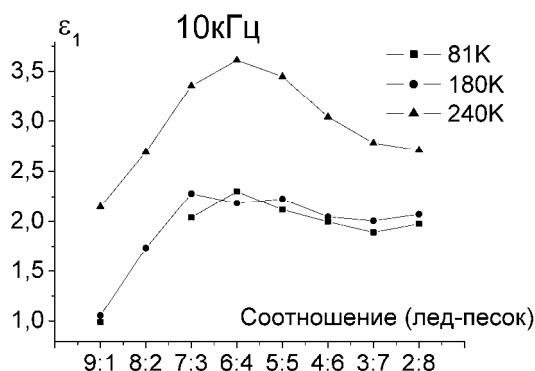


Рис. 3. Зависимость действительной части комплексной диэлектрической проницаемости от соотношения компонент механической смеси

Вместе с тем, следует отметить ряд особенностей:

- Резкое возрастание ε_1 при приближении к точке плавления льда начинается с 250K, что свидетельствует о явлении предплавления льда;

- Зависимость ε_1 от соотношения компонентов в смеси немонотонная (при соотношении лед – песок 6:4 наблюдается максимум);
- при увеличении содержания льда в смеси после соотношения 6:4 наблюдается уменьшение ε_1 при $T < 200\text{K}$ до значений близких к 1.

Температурная зависимость удельной электрической проводимости представлена на рис. 4. Рост проводимости начинается с $T=150\text{K}$, что соответствует объемному льду [3].

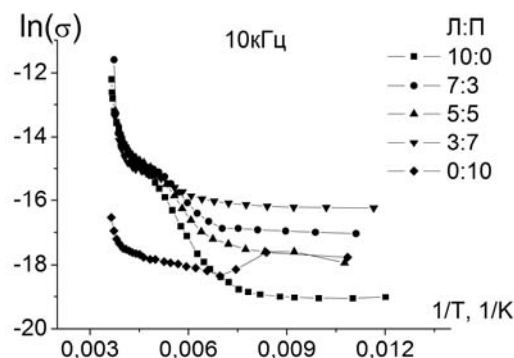


Рис. 4. Температурная зависимость удельной проводимости механической смеси гранулированный лед - песок

Обработка результатов

Методология обработки результатов разработана и описана в [5]. Она базируется на рефракционной модели для смесей, согласно которой

$$\varepsilon^{1/2} - 1 = (\varepsilon_q^{1/2} - 1)\nu_q + (\varepsilon_l^{1/2} - 1)\nu_l$$

где ε_q и ν_q - диэлектрическая проницаемость и относительный объем гранул, покрытых пленкой связанной воды, а ε_l и ν_l - подобные величины для льда.

Полагая выполнимость приведенного соотношения в комплексной форме, для действительной и мнимой частей, получаем систему уравнений:

$$f_1 = f_{1q}\nu_q + f_{1l}\nu_l \text{ и } f_2 = f_{2q}\nu_q + f_{2l}\nu_l,$$

в которой

$$f_1 = (\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2})^{1/2} \left[\cos \frac{1}{2} \arccos \frac{\varepsilon_1}{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2}} \right] - 1;$$

$$f_2 = (\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2})^{1/2} \left[\sin \frac{1}{2} \arccos \frac{\varepsilon_1}{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2}} \right]$$

Для нахождения ε_{1l} и ε_{2l} в [5] использовались полиномиальные представления f_1 и f_2 от ν_l , полученных на основе экспериментальных результатов с одной стороны и предполагаемые зависимости f_{1l} и f_{2l} от ν_l с другой стороны.

В результате вычислений получены значения $\varepsilon_{1л}$. Зависимости $\varepsilon_{1л}$ от $V_{л}$ представлены на рис. 5

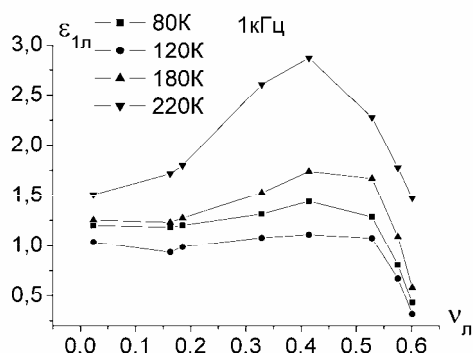


Рис. 5. Зависимость действительной части комплексной диэлектрической проницаемости для льда от относительного объема льда на частоте 1 кГц

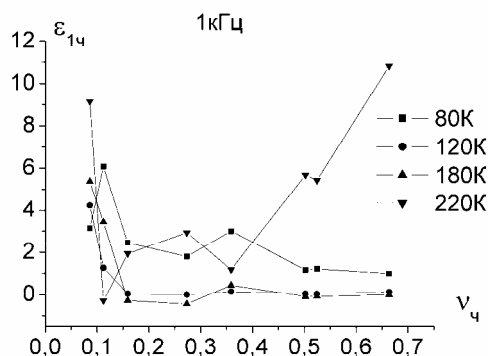


Рис. 6. Зависимость действительной части комплексной диэлектрической проницаемости для гранул песка, покрытых пленкой воды от относительного объема таких гранул на частоте 1 кГц

Вместе с тем, несомненный интерес представляет иная постановка организации расчетов, когда за основу берется зависимость f_1 и f_2 от $V_{ч}$. Итог такого расчета представлен на рис. 6

Сравнение результатов, полученных по обоим вариантам расчета показывает, что получающиеся числовые значения как для льда (рис. 5) так и для частиц (рис. 6) меньше чем значения ε_1 , наблюдаемые для однокомпонентной системы – песок или гранулированный лед. Это позволяет высказать предположение о появлении фазы в системе с отрицательными значениями ε_1 .

В работе [5] при исследовании влагосодержащего мелкозернистого кварца наблюдалось уменьшение ε_1 при добавлении воды. Авторами при расчете с использованием подобной методики были получены отрицательные значения для ε_1 связанной воды, покрывающей гранулы кварца. Вполне естественно ожидать подобное и в наших экспериментах. Но тогда естественен вопрос о происхождении воды покрывающей гранулы песка.

В работе [6] была высказана гипотеза о том, что ответственной за низкие значения ε_1 для льда является тонкая пленка связанной воды, покрывающей гранулы песка. Возникновение этой пленки связывалось с переходом водной пленки, покрывающей гранулы льда, на гранулы песка.

Для подтверждения гипотезы о существовании водной пленки на гранулах льда было проведено 3 серии специальных экспериментов по адсорбции воды промокательной бумагой при температуре -10°C . Порция порошка из гранул льда последовательно пересыпалась на тонкие листы промокательной бумаги. После каждой операции пересыпания лист впитывал $20 \pm 0,6$ мг H_2O . В последней серии из 70 операций удалось адсорбировать 1445 мг, что составляло 42% от исходной массы порошка. Используя эти результаты можно оценить толщину пленки на поверхности гранул. Она оказалась равной $d = 93$ нм.

Вопрос о существовании водной пленки на переходе гранула матрицы – лед в мерзлых ВДС и на свободной поверхности льда ранее обсуждался в работе [1].

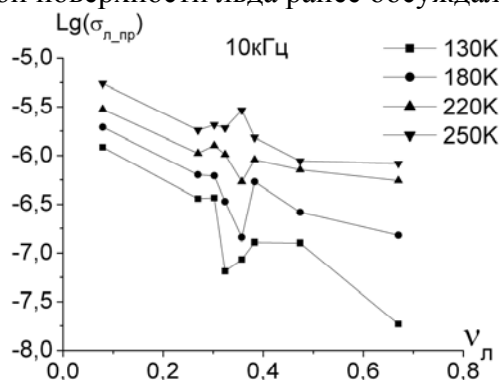


Рис. 7. Зависимость приведенной электрической проводимости от содержания льда в механической смеси лед - песок

Второй дополнительный эксперимент был призван подтвердить переход воды с гранул льда. Такой переход на гидрофильные гранулы песка должен сопровождаться выделением поверхностной энергии. В тепловой камере при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ в ячейке осуществлялась послойная засыпка гранулированного льда и песка. При это наблюдалось повышение температуры ячейки на $4 - 5$ градусов.

Резюмируя результаты дополнительных экспериментов, можно сделать заключение о правдоподобности гипотезы.

Для обсуждения поведения удельной электрической проводимости рассчитывалась приведенная ко льду электрическая проводимость $\sigma_{\text{л_пр}} = \sigma / V_{\text{л}}$. Зависимость приведенной $\sigma_{\text{л_пр}}$ от содержания льда в смеси представлена на рис. 7.

Убывание $\sigma_{\text{л_пр}}$ от $V_{\text{л}}$ свидетельствует о том, что проводимость осуществляется по тонким пленкам воды, покрывающих гранулы песка. Если бы гранулы песка оставались сухими, то при уменьшении содержания льда величина $\sigma_{\text{л_пр}}$ уменьшалась бы или, скорее всего, наблюдался бы перколяционный скачок от проводимости льда к проводимости песка

Заключение

Проведенное исследование показало, что в смеси гранулированный лед – песок при температурах около $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходят процессы перехода воды с поверхности гранул льда на поверхность гранул песка.

Поэтому модель дисперсной системы гранулированный лед – песок следует представлять как многокомпонентную: гранулы льда, покрытые пленкой воды + воздух + гранулы песка, покрытые пленкой воды. При понижении температуры до криогенных происходит уменьшение толщины водных пленок.

Появление водных пленок связанной воды приводит к понижению диэлектрической проницаемости по причине отрицательного вклада этих пленок в диэлектрическую проницаемость системы. Поверхностная проводимость по водной

пленке, покрывающей гранулы песка, вносит существенный вклад в электрическую проводимость механической смеси гранулированный лед - песок

Авторы осознают, что необходимо дальнейшее продолжение исследований и в частности с вариацией размеров гранул льда.

Список литературы

1. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов.// Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1998. 515с.
2. Копосов Г.Д. Проблемы физики влагосодержащих дисперсных систем в области отрицательных температур: Монография.// Архангельск: Поморский университет, 2004. 125с
3. Копосов Г.Д., Тягуни А.В. Электрофизические свойства объемного и дисперсного льда: сравнительный аспект // Сорбционные и хроматографические процессы, 2007. Т.7, Вып. 2. С. 353 – 361.
4. Тонконогов М.П. Диэлектрическая спектроскопия кристаллов с водородными связями. Протонная релаксация // УФН, 1998. Т 168, вып. №1. С. 29 – 54.
5. Копосов Д.Г., Копосов Г.Д. Анализ влажностных зависимостей диэлектрической проницаемости мерзлой дисперсной среды на основе мерзлого кварца //Физический вестник Поморского университета. Сб. науч. тр. Вып. 6. Архангельск: Поморский университет, 2007. С. 100 – 110.
6. Тягуни А.В., Копосов Г.Д. Исследование электрофизических свойств механических смесей песок – гранулированный лед на частотах 0,1, 1, 10 кГц //Физический вестник Поморского университета. Сб. науч. тр. Вып. 6. Архангельск: Поморский университет, 2007. С. 110 – 120.

Копосов Геннадий Дмитриевич - кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей физики Поморского государственного университета

Тягуни Анатолий Вячеславович - аспирант кафедры общей физики Поморского государственного университета.

Koposov Gennady D. - the candidate of physical and mathematical sciences, the senior lecturer, chief general physics department Pomor State University, e-mail: fc.genphys@pomorsu.ru

Tyagunin Anatoly V. - a post-graduate student of general physics department Pomor State University.