

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА МАКСВЕЛЛА—ВАГНЕРА В МЕРЗЛЫХ КРУПНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОДАХ С ПОРФИРОВОЙ СТРУКТУРОЙ

И.В. Артеменко, Н.О. Кожевников

Иркутский государственный технический университет, 664074, Иркутск, Лермонтова, 83, Россия

На основе формулы для комплексной диэлектрической проницаемости двухкомпонентной гетерогенной среды с порфировой структурой исследовано влияние эффекта Максвелла—Вагнера на величину и частотную дисперсию диэлектрической проницаемости мерзлых крупнодисперсных пород. На примере мерзлых песков показано, что при объемном содержании льда порядка единиц и более процентов учет эффекта Максвелла—Вагнера позволяет объяснить примерно до одной трети их аномально-высокой низкочастотной диэлектрической проницаемости. В тех случаях, когда ориентационная поляризация молекул льда протекает быстрее по сравнению с поляризацией незамерзшей воды, определение эффективного времени диэлектрической релаксации мерзлых песков возможно позволит оценивать их температуру в условиях естественного залегания.

Мерзлые породы, эффект Максвелла—Вагнера, диэлектрическая проницаемость, электроразведка

MODELLING THE MAXWELL—WAGNER EFFECT IN FROZEN UNCONSOLIDATED ROCKS

I.V. Artyomenko, N.O. Kozhevnikov

Technical University of Irkutsk, Irkutsk, 664074, Lermontov st., 83, Russia

The effect of Maxwell—Wagner polarization in frequency-domain dielectric response of frozen sands was simulated using the formula for complex dielectric permittivity of materials with porphyritic texture. It is shown that in frozen sand with ice volume content of more than few percents, the Maxwell—Wagner effect accounts for about one third of anomalously large low-frequency dielectric permittivities. In the cases when the polarization process in ice is faster compared with unfrozen water domains, determination of the effective time of dielectric relaxation in frozen sands may be useful to estimate its in-situ temperatures.

Frozen ground, Maxwell-Wagner effect, dielectric permittivity, electrical prospecting

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость изучения диэлектрической проницаемости геологических сред обусловлена широким применением переменных электромагнитных полей при поисках и разведке полезных ископаемых, решении разнообразных задач геокриологии, гидрогеологии и геоэкологии, развитием высокочастотных методов разрушения горных пород. Интерес к диэлектрической проницаемости природных и антропогенных геологических образований стимулируется внедрением малоглубинной технологии — георадара [Davis, Annan, 1989 и др.], а в последние годы — феноменом высокоразрешающей электроразведки [Светов и др., 1996]. Диэлектрическая проницаемость играет принципиально важную роль в геофизике криолитозоны, так как неотъемлемыми особенностями мерзлых пород, определяющими закономерности формирования и изменения многих их физических свойств, являются многофазность и гетерогенность [Фролов, 1976]. Для гетерогенных систем типично наличие дисперсии диэлектрической проница-

мости на частотах, которые существенно смещены относительно характеристических частот дисперсии компонентов системы [Духин, Шилов, 1972; Челидзе и др., 1977]. Одним из механизмов, обуславливающих такой характер дисперсии диэлектрической проницаемости, может быть межповерхностная поляризация — эффект Максвелла—Вагнера [Хиппель, 1960].

Экспериментальное исследование эффекта Максвелла—Вагнера в гетерогенных системах с произвольной структурой представляет собой сложную задачу. Главная проблема, заключающаяся в необходимости контролировать параметры системы, решена для синтетических композиций с относительно простой структурой, однако осуществление подобного контроля в столь сложных средах, какими являются мерзлые породы, наталкивается на непреодолимые трудности. Поэтому в своих исследованиях возможных проявлений эффекта Максвелла—Вагнера в мерзлых крупнодисперсных породах мы ориен-

тировались на имитационное моделирование, выполненное с помощью оригинальной компьютерной программы для расчета частотной дисперсии комплексной диэлектрической проницаемости гетерогенных систем с порфиrowой структурой.

ОБЗОР ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основной объем экспериментальных и теоретических исследований эффекта Максвелла—Вагнера выполнен применительно к потребностям диэлектрики различных гетерогенных сред [Духин, Шилов, 1972; Челидзе и др., 1977]. Среди специалистов в области разведочной геофизики повышенный интерес к этому явлению возник в связи с необходимостью дать объяснение немонокотным индукционно-вызванным переходным процессам, неоднократно отмечавшимся при выполнении геофизических исследований в Западной Якутии [Вопросы поляризации..., 1985; Сидоров, 1985, 1987] и на севере Аляски [Walker, Kawasaki, 1988]. Главная роль в постановке этой проблемы и привлечении к ней внимания специалистов-электроразведчиков принадлежит В. А. Сидорову. Хотя в своих работах, посвященных эффекту Максвелла—Вагнера, он не вышел за рамки модели, описанной Максвеллом, но первым применил данную модель для объяснения низкочастотной дисперсии диэлектрической проницаемости геологических сред и оценки ее влияния на результаты импульсной индуктивной электроразведки. Вместе с соавторами им выполнены скважинные и лабораторные исследования эффекта Максвелла—Вагнера в мерзлых породах [Вопросы поляризации..., 1985].

На рис. 1,а показана модель, которую использовал Максвелл, а после него многие другие исследователи. Модель представляет собой плоский конденсатор, между обкладками которого располагаются два слоя толщиной d_1 и d_2 . Удельная электропроводность σ_1 , σ_2 и относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_1 , ϵ_2 слоев — действительные, частотно-независимые величины. Анализ тока, протекающего через конденсатор при приложении к нему переменного напряжения, показывает, что его полное сопротивление не изменится, если двухслойный композит между прокладками заменить однородным слоем (толщиной $d = d_1 + d_2$) с диэлектрической проницаемостью [Хинпель, 1960; Духин, Шилов, 1972; Alvarez, 1973]

$$\epsilon_c = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} - j \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}, \quad (1)$$

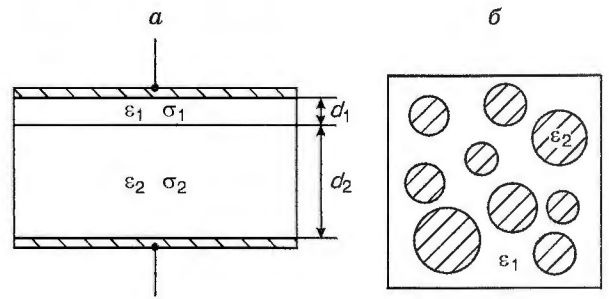


Рис. 1. Простейшая модель двухкомпонентной гетерогенной системы — конденсатор Максвелла (а) и модель геологической среды с порфиrowой структурой, образованная непрерывной вмещающей фазой и сферическими включениями (б).

Расшифровка буквенных обозначений приведена в тексте.

где ω — угловая частота; ϵ_s и ϵ_∞ — соответственно, статическая ($\omega \rightarrow 0$) и динамическая ($\omega \rightarrow \infty$) диэлектрическая проницаемость эквивалентного однородного слоя; σ — его удельная электропроводность; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, τ — время релаксации. Величины ϵ_s , ϵ_∞ , σ и τ определяются выражениями:

$$\epsilon_s = \frac{\epsilon_1 d_1 \sigma_2^2 + \epsilon_2 d_2 \sigma_1^2}{(\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1)} (d_1 + d_2),$$

$$\epsilon_\infty = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 (d_1 + d_2)}{d_1 \epsilon_2 + d_2 \epsilon_1},$$

$$\sigma = \frac{\sigma_1 \sigma_2 (d_1 + d_2)}{d_1 \sigma_2 + d_2 \sigma_1},$$

$$\tau = \epsilon_0 \frac{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1}.$$

Хотя эффект Максвелла—Вагнера не имеет ничего общего с поляризацией дипольных молекул, первые два слагаемых в формуле (1) представляют собой классическую формулу Дебая для диэлектрической проницаемости полярного диэлектрика [Хинпель, 1960]. Третье слагаемое в (1) отражает потери за счет сквозной (омической) проводимости. Анализ приведенных выражений показывает, что сочетание тонкого высокоомного и толстого проводящего слоев при сравнительно высокой удельной электропроводности двухслойного композита обеспечивает очень большие значения его диэлектрической проницаемости и времени релаксации. В свое время именно это обстоятельство побудило В. А. Сидорова выдвинуть гипотезу о существовании в окрестностях кимберлитовых тел так называемых природных конденсаторов, диэлектрические

прослой в которых представлены льдом, мерзлым гипсом и другими льдыстыми образованиями, заполняющими микро- и макротрещины [Вопросы поляризации..., 1985; Сидоров, 1985, 1987]. Подробный анализ максвелл-вагнеровской поляризации для одномерной геоэлектрической модели выполнен В. П. Губатенко [1989, 1991]. На основе решений уравнений электродинамики в квазистационарном приближении им получены и проанализированы выражения, описывающие эффективную диэлектрическую проницаемость среды, удельная электропроводность и диэлектрическая проницаемость которой являются периодическими функциями глубины. Наиболее детально изучена модель гетерогенной среды в виде чередующихся немагнитных слоев толщиной d_1 и d_2 с частотно-независимыми параметрами σ_1 , ϵ_1 и σ_2 , ϵ_2 . Показано, что на низких частотах горизонтально-слоистая среда ведет себя — в перпендикулярном по отношению к напластованию направлении — подобно несовершенному диэлектрику, причем параметры слоев можно выбрать таким образом, что величина низкочастотной диэлектрической проницаемости вкост напластования будет сколь угодно большой. Аналогичным образом, варьируя параметрами слоев, можно получить очень большие значения эффективной постоянной времени максвелл-вагнеровской поляризации.

Во всех перечисленных и многих других работах, посвященных анализу проявлений эффекта Максвелла—Вагнера в геоэлектроразведке, используется рассмотренная Максвеллом простая и наглядная плоско-параллельная модель гетерогенной среды. К сожалению, те случаи, когда с помощью такой модели удастся осуществить имитационное моделирование эффективной диэлектрической проницаемости, ϵ_m , реальных геологических сред при использовании конкретных электроразведочных методов и систем наблюдения, крайне немногочисленны.

ЭФФЕКТ МАКСВЕЛЛА—ВАГНЕРА В ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕДАХ С ПОРФИРОВОЙ СТРУКТУРОЙ

При изучении эффекта Максвелла—Вагнера в геофизике не рассмотрены достаточно широко распространенные породы с порфириковой структурой. Среди рыхлых мерзлых образований к ним можно отнести многие породы с простыми криогенными текстурами — массивной, базальной, корковой, порфириковой [Методы региональных..., 1986]. При вычислении диэлектрической проницаемости гетерогенных сред с порфириковой структурой их рассматривают как двухкомпонентные смеси, представляющие собой непре-

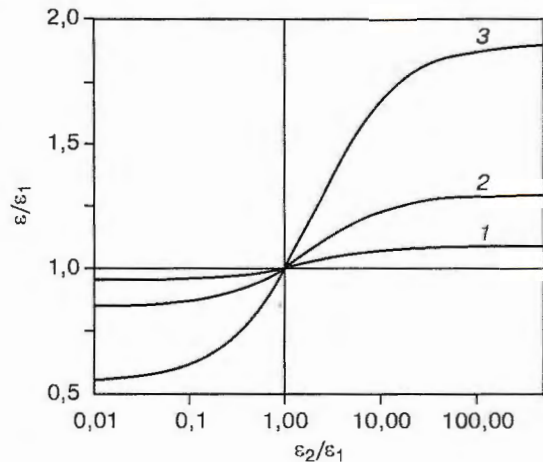


Рис. 2. Графики, иллюстрирующие формулу Максвелла.

Нормированная диэлектрическая проницаемость смеси (ϵ) в зависимости от величины соотношения проницаемостей включений (ϵ_2) и вмещающей среды (ϵ_1) при различных значениях содержания объемного включения (P): 1 — 0,03; 2 — 0,1; 3 — 0,3.

рывную фазу с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 , в которой рассеяны частицы с проницаемостью ϵ_2 (см. рис. 1,б). Максвеллом была получена формула в предположении, что включения имеют сферическую форму, а их объемное содержание P не слишком велико [Хинпель, 1960; Челидзе и др., 1977]:

$$\epsilon = \epsilon_1 \left(1 + 3P \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \right). \quad (2)$$

На рис. 2 приведены графики зависимости нормированной проницаемости ϵ/ϵ_1 смеси от отношения ϵ_2/ϵ_1 , рассчитанные по формуле (2) для некоторых значений P . При увеличении ϵ_2 проницаемость смеси сначала быстро растет, затем рост замедляется и наступает насыщение, причина которого заключается в деполяризации включений. Так, для $P = 0,1$ и $(\epsilon_2/\epsilon_1) \rightarrow \infty$ проницаемость смеси не может превысить проницаемость вмещающей среды более чем на 30%. При $(\epsilon_2/\epsilon_1) \rightarrow 0$ влияние включений на проницаемость смеси менее выражено, однако и здесь наблюдается насыщение.

При условии потенциальности электрического поля формулу (2) можно использовать для расчета эффективной диэлектрической проницаемости двухфазной среды с учетом эффекта Максвелла—Вагнера [Духин, Шилов, 1972; Челидзе и др., 1977]. В наиболее общем случае вмещающая среда и дисперсная фаза характе-

ризуются комплексными значениями диэлектрической проницаемости (ϵ_c и ϵ_d) и электропроводности (σ_c и σ_d). Тогда для порфировой структуры достаточно в уравнении (2) заменить ϵ_1 и ϵ_2 соответственно на

$$\epsilon_{\epsilon_1} = \epsilon_{\epsilon_c} - j \frac{\sigma_c}{\omega \epsilon_0} \quad \text{и} \quad \epsilon_{\epsilon_2} = \epsilon_{\epsilon_d} - j \frac{\sigma_d}{\omega \epsilon_0}.$$

В результате получается известная формула Вагнера [Духин, Шилов, 1972]:

$$\epsilon_s = \epsilon_{\epsilon_1} \left(1 + 3P \frac{\epsilon_{\epsilon_2} - \epsilon_{\epsilon_1}}{\epsilon_{\epsilon_2} + 2\epsilon_{\epsilon_1}} \right). \quad (3)$$

Найденная с помощью этой формулы диэлектрическая проницаемость будет комплексной и частотно-зависимой даже в том случае, когда проницаемость и электропроводность вмещающей среды и включений таковыми не являются. Выделив в формуле (3) действительную и мнимую части, представим ее в виде

$$\epsilon_s = \epsilon' - j\epsilon''.$$

Очевидно, ϵ' имеет смысл эффективной проницаемости ϵ_m смеси, тогда как ϵ'' определяет ее эффективную электропроводность $\sigma_m = \omega \epsilon_0 \epsilon''$:

$$\epsilon_s = \epsilon_m - j \frac{\sigma_m}{\omega \epsilon_0}.$$

Как известно, сущность эффекта Максвелла—Вагнера заключается в том, что каждая, в том числе микроскопическая, поверхность раздела под действием внешнего электрического поля приобретает электрический заряд, пропорциональный нормальной по отношению к границе составляющей приложенного электрического поля и разнице $(\epsilon_1/\sigma_1) - (\epsilon_2/\sigma_2)$ [Челидзе и др., 1977; Alvarez, 1973]. В случае низких частот заряд положителен там, где ток направлен от хорошего проводника к плохому, и отрицателен при противоположном направлении тока. Для порфировой структуры принято считать, что заряды на границе раздела дисперсной и непрерывной фазы принадлежат включениям, а не вмещающей среде. Легко доказать, что при этом суммарный заряд, связанный с каждым включением, равен нулю. В случае относительно хорошо проводящего включения обусловленный зарядами электрический дипольный момент направлен антипараллельно электрическому полю, а в случае относительно плохо проводящего — параллельно. В математическом отношении эту ситуацию можно уподобить поляризации диэлектрика, и поэтому вместо названия эффект Максвелла—Вагнера часто используется термин „поляризация в результате скопления зарядов на поверх-

ности включений“ или „межповерхностная поляризация“.

Как уже отмечалось, теория Максвелла—Вагнера предполагает, что поле E безвихревое, т. е. $\nabla \times E = 0$. Строго говоря, это неверно, но может быть принято в качестве удобного приближения для частот, настолько низких, что длина электромагнитных волн в любой из фаз намного превышает линейный масштаб гетерогенности. Достоинство такого приближения заключается в возможности сведения задачи (в математическом смысле) к статической для идеальных диэлектриков.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Сначала рассмотрим проявления классического эффекта Максвелла—Вагнера, когда проницаемость и электропроводность как вмещающей среды, так и включений — действительные и не зависящие от частоты величины [Alvarez, 1973]. Влияние электропроводности включений поясняет рис. 3, где приведены графики частотной зависимости эффективной проницаемости смеси, вмещающая среда и дисперсная фаза которой характеризуются одинаковой проницаемостью ($\epsilon_1 = \epsilon_2 = 10$) и различной электропроводностью. При расчетах было принято, что электропроводность вмещающей среды $\sigma_1 = 10^{-3}$ Ом/м, а объемное содержание включений $P = 0,1$. Как легко видеть, при $\sigma_2/\sigma_1 \neq 1$ эффективная проницаемость смеси превышает 10, причем влияние на ϵ_m более проводящих включений ($\sigma_2 > \sigma_1$) по сравнению с относительно ме-

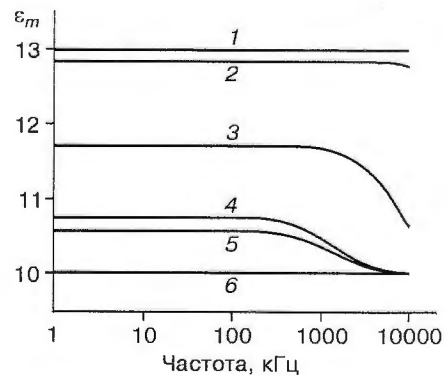


Рис. 3. Влияние электропроводности включений на частотную зависимость эффективной проницаемости (ϵ_m) гетерогенной среды с порфировой структурой при различных значениях σ_2 , Ом/м.

1 — 1, 2 — 10^{-1} , 3 — 10^{-2} , 4 — 10^{-5} , 5 — 10^{-4} , 6 — 10^{-3} .
 Параметры модели: $\sigma_1 = 10^{-3}$, $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 10$, $P = 0,1$.

нее проводящими ($\sigma_2 < \sigma_1$) проявлено сильнее. Если σ_2 превосходит σ_1 более чем на два порядка, влияние включений приводит к таким же значениям ϵ_m , которые наблюдалось бы в случае непроводящих включений с очень большой ($\epsilon_2 \rightarrow \infty$) проницаемостью. Частотная дисперсия ϵ_m для смеси с высокоомной дисперсной фазой, по сравнению с тем случаем, когда включения являются относительно проводящими, проявлена в области более низких частот.

Влияние проницаемости включений на эффективную проницаемость смеси иллюстрирует рис. 4. В отличие от предыдущего рисунка, представленные здесь зависимости ϵ_m от частоты рассчитаны для смеси, вмещающая среда и дисперсная фаза которой имеют одинаковую электропроводность ($\sigma_1 = \sigma_2 = 10^{-4}$ Ом/м), однако различаются по диэлектрической проницаемости. При расчетах было принято, что проницаемость вмещающей среды $\epsilon_1 = 5$, а объемное содержание включений, как и в предыдущем случае, составляет 10 %. Все представленные на рис. 4 графики (за исключением 1), свидетельствуют о дисперсионном характере ϵ_m . Представляется важным, что в области низких частот ϵ_m пропорциональна диэлектрической проницаемости включений. Отметим, что если бы для расчета низкочастотной диэлектрической проницаемости рассматриваемой модели мы вместо комплексных проницаемостей ϵ_{ϵ_1} и ϵ_{ϵ_2} подставили в формулу (2) ϵ_1 и ϵ_2 , т. е. пренебрегли эффектом Максвелла—Вагнера, то найденная таким обра-

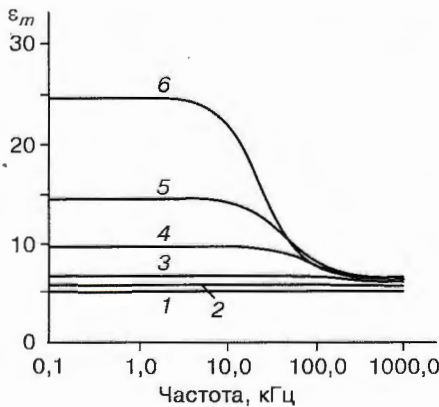


Рис. 4. Влияние диэлектрической проницаемости включений (ϵ_2) на эффективную проницаемость гетерогенной среды с порфировой структурой при различных значениях ϵ_2 .

1 — 5, 2 — 10, 3 — 20, 4 — 50, 5 — 100, 6 — 200. Параметры модели: $\sigma_1 = \sigma_2 = 10^{-4}$ Ом/м; $\epsilon_1 = 5$, $P = 0,1$.

зом ϵ_m оказалась бы частотно-независимой, а ее величина не могла бы превысить ϵ_1 более чем на 30 % (см. рис. 2).

В качестве следующего шага в изучении проявлений межповерхностной поляризации в средах с порфировой структурой логично выполнить расчеты эффективной диэлектрической проницаемости гетерогенной системы, все или некоторые параметры компонентов которой являются комплексными и частотно-зависимыми. В контексте данной статьи важный и интересный пример такой природной системы представляет модель мерзлой крупнодисперсной породы с простой массивной криотекстурой, например, песка, диэлектрическая релаксация в котором изучалась не только в лабораторных [Фролов, 1976, 1977; Фролов, Федюкин, 1983], но и полевых [Кожевников и др., 1995] экспериментах. Как известно, в таких породах, в отличие от тонкодисперсных, уже при сравнительно небольших отрицательных температурах почти вся поровая влага превращается в лед. В незамерзшем состоянии остается лишь ее незначительная часть в виде включений и тонких пленок, которые обуславливают довольно высокую (порядка 10^{-5} — 10^{-3} Ом/м) сквозную (омическую) электропроводность вмещающей среды. Поскольку электропроводность включений льда значительно ниже, гетерогенную систему можно представить в виде модели, образованной относительно проводящей непрерывной фазой с распределенными в ней слабопроводящими ледяными включениями [King et al., 1988].

Ввиду того, что проницаемость связанной воды меньше, чем свободной [Духин, Шилов, 1972], а ее объемное содержание в крупнодисперсных мерзлых породах мало [Ершов, 1990], проницаемость квазинепрерывной вмещающей среды определяется преимущественно свойствами минеральных частиц. Исходя из этих соображений, можно предположить, что для мерзлого кварцевого песка $\epsilon_1 \approx 5$. Что касается удельной электропроводности σ_1 , то по порядку величины она составляет около 10^{-4} Ом/м [Фролов, 1976; King et al., 1988].

Диэлектрическая проницаемость воды и льда описывается формулой Дебая [Хиппель, 1960]:

$$\epsilon_{\epsilon} = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + j\omega\tau}$$

Ориентационная поляризация молекул воды протекает быстро ($\tau \approx 10^{-11}$ с), но как только вода замерзает и превращается в лед, время релаксации возрастает более чем на 6 порядков [Маэно, 1988] и для пресного (из дистилли-

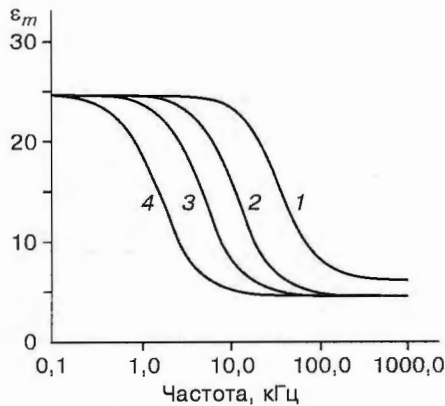


Рис. 5. Частотная дисперсия эффективной проницаемости ϵ_m модели мерзлого песка с учетом эффекта Максвелла—Вагнера при различных значениях τ , мкс.

1 — 0, 2 — 10, 3 — 30, 4 — 100. Параметры модели: $\sigma_1 = 10^{-4}$ Ом/м, $\epsilon_1 = 5$, $\sigma_2 = 10^{-5}$ Ом/м; $\epsilon_{2S} = 100$, $\epsilon_{2\infty} = 3$, $P = 0,1$.

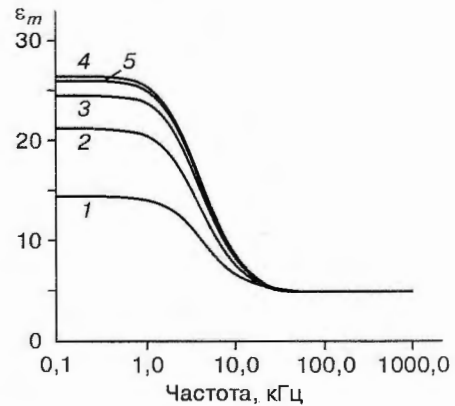


Рис. 6. Частотная дисперсия эффективной проницаемости ϵ_m модели мерзлого песка с учетом эффекта Максвелла—Вагнера при различной электропроводности включений σ_2 , Ом/м.

1 — 10^{-4} , 2 — 3×10^{-5} , 3 — 10^{-5} , 4 — 3×10^{-6} , 5 — 10^{-6} . Параметры модели: $\sigma_1 = 10^{-4}$ Ом/м, $\epsilon_1 = 5$, $\epsilon_{2S} = 100$, $\epsilon_{2\infty} = 3$, $\tau = 30$ мкс, $P = 0,1$.

рованной воды) поликристаллического льда τ приближенно определяется выражением

$$\lg \tau = 2900/T - 15,3, \quad (4)$$

где T — абсолютная температура, °К. Вблизи точки замерзания τ составляет около 20 мкс, а при понижении температуры до -60 °С возрастает до 20 мс.

Рисунок 5 иллюстрирует частотную дисперсию эффективной проницаемости модели влажного мерзлого песка, состоящей из непрерывной вмещающей среды с параметрами $\epsilon_1 = 5$, $\sigma_1 = 10^{-4}$ Ом/м и дисперсной фазы в виде включений поликристаллического льда с проницаемостью, описываемой формулой Дебая ($\epsilon_{2S} = 100$, $\epsilon_{2\infty} = 3$), и электропроводностью $\sigma_2 = 10^{-5}$ Ом/м. Графики зависимости ϵ_m от частоты построены для значений τ в диапазоне от нуля (недиспергирующие включения) до 100 мкс. Согласно выражению (4) значение $\tau = 30$ мкс соответствует температуре -5 °С; а $\tau = 100$ мкс — температуре -15 °С.

Главный вывод, который можно сделать на основе анализа представленных на рис. 5 графиков, заключается в том, что по мере увеличения постоянной времени дебаевской релаксации включений льда наблюдается закономерный рост эффективного времени диэлектрической релаксации модели в целом. Данное обстоятельство вселяет надежду на то, что измерение эффективного времени диэлектрической релаксации в мерзлых песках и других крупнодиспер-

сных грунтах позволит оценивать их температуру в условиях естественного залегания. При этом весьма перспективным представляется метод переходных процессов, позволяющий выполнять подобные оценки бесконтактным способом [Артеменко и др., 1996а, б; Кожевников, 1991; Кожевников и др., 1995]. График 1 на рис. 5 соответствует классическому эффекту Максвелла—Вагнера, когда проницаемость и электропроводность обоих компонентов смеси — реальные и частотно-независимые величины.

Влияние электропроводности включений σ_2 на эффективную проницаемость ϵ_m модели мерзлого песка поясняет рис. 6. Уменьшение σ_2 сопровождается ростом низкочастотных значений ϵ_m . Сначала рост ϵ_m происходит быстро, однако затем (при $\sigma_2 < 10^{-5}$ Ом/м) наступает насыщение и при дальнейшем уменьшении σ_2 эффективная низкочастотная проницаемость практически не изменяется. Для представленных на рис. 6 зависимостей эффективное время релаксации модели составляет 20—34 мкс при одинаковом времени дебаевской релаксации включений $\tau = 30$ мкс.

На рис. 7,а в виде графиков с кружками, ромбами и треугольниками представлены экспериментальные зависимости ϵ_m мерзлого кварцевого песка от частоты при значениях влажности $W = 2, 5$ и 10 % [Фролов, 1976]. Измерения выполнены при температуре $-1,8$ °С. Существенно, что уже при влажности 2 % наблю-

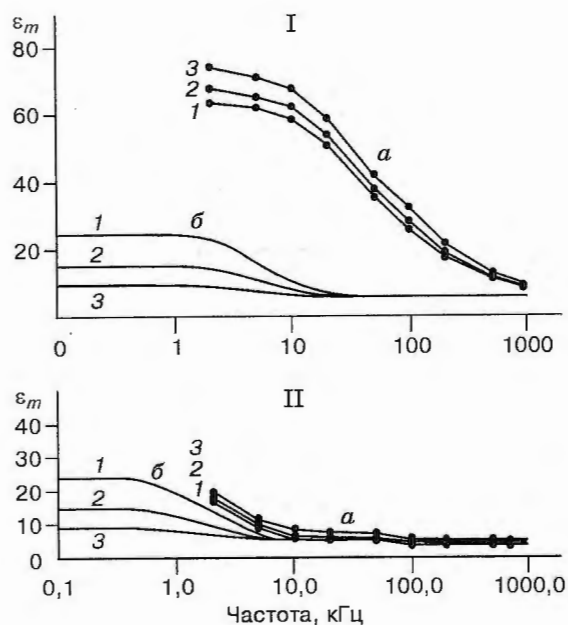


Рис. 7. Экспериментальные (а) и рассчитанные с учетом максвелл-вагнеровской поляризации (б) графики частотной дисперсии (ϵ_m) мерзлого песка при разной температуре.

I — $-1,8$ °C, II — $-15,5$ °C. Экспериментальные данные при значениях объемной влажности ($W, \%$): 1 — 2, 2 — 5, 3 — 10. Расчетные данные при значениях объемного содержания включений (P): 3 — 0,02, 4 — 0,05, 5 — 0,1.

дается сильная частотная дисперсия и аномально высокие значения ϵ_m . Увеличение влажности приводит к росту низкочастотных значений ϵ_m при сохранении характера частотной дисперсии. На этом же рисунке приведены графики частотной дисперсии ϵ_m , рассчитанные на основе модели среды с порфиновой структурой и параметрами: $\sigma_1 = 10^{-4}$ Ом/м, $\epsilon_1 = 5$, $\sigma_2 = 10^{-5}$ Ом/м, $\epsilon_{2S} = 100$, $\epsilon_{2\infty} = 3$, $\tau = 25$ мкс. Модельные графики рассчитаны при объемных содержаниях включений, численно равных влажности соответствующих образцов мерзлого песка. При понижении температуры (см. рис. 7,б) разница между экспериментальными и модельными зависимостями уменьшается. При этом экспериментальные зависимости смещаются в область более низких частот.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Хотя приведенные материалы свидетельствуют о том, что учет эффекта Максвелла—Вагнера при моделировании диэлектрической проницаемости мерзлого песка в принципе позволя-

ет предсказать ее низкочастотную дисперсию, в количественном отношении соответствие между экспериментальными и модельными данными едва ли можно признать удовлетворительным: в низкочастотной области измеренные значения ϵ_m намного больше рассчитанных. Однако более внимательный анализ представленных на рис. 7,а зависимостей позволяет подметить некоторые интересные особенности. Так, при температуре $-1,8$ °C и частоте 2 кГц увеличение влажности приводит к уменьшению отношения экспериментальной проницаемости к модельной от 7,5 (при $W = 2 \%$) до 3,3 (при $W = 10 \%$). Однако разница между экспериментальными и расчетными значениями ϵ_m почти не изменяется ≈ 51 —55. По-видимому, уже при незначительном содержании влаги в мерзлом кварцевом песке включается механизм, ответственный за дисперсию и аномально высокие значения низкочастотной диэлектрической проницаемости. Сущность этого механизма заключается в том, что изолированные скопления незамерзшей воды, образуют так называемые макродиполи, поляризация которых проявляется в виде аномально большой и частотно-зависимой эффективной диэлектрической проницаемости [Фролов, 1976, 1977, 1997]. Дальнейшее увеличение влажности песка почти не усиливает этот эффект, поскольку вся остальная вода превращается в лед. С другой стороны, увеличение содержания льда приводит к росту максвелл-вагнеровской поляризации и, как это можно видеть на рис. 7,а, ее относительного вклада в эффективную диэлектрическую проницаемость мерзлого песка. Согласно формуле (3), этот рост пропорционален содержанию льда, которое для песка и других крупнодисперсных пород при $t < -1 \div -2$ °C мало отличается от их влажности [Фролов, 1996; Ершов, 1990; King et al., 1988].

Понижение температуры приводит к уменьшению содержания жидкой фазы и как следствие относительный вклад в ϵ_m механизма макродиполя и его зависимость от влажности также уменьшаются (см. рис. 7,б). В отличие от предыдущего случая ($t = -1,8$ °C) при температуре $-15,5$ °C изменение влажности от 2 до 10 % сопровождается уменьшением отношения измеренной и модельной проницаемостей в значительно более узком диапазоне (от 2,5 до 1,5). Разница между экспериментальными и модельными значениями ϵ_m на частоте 2 кГц составляет 6,4—9,8, т. е. Skf_j зависит от влажности. Все это указывает на аддитивность эффектов макродиполя и Максвелла—Вагнера в области низких температур.

Интерпретируя результаты моделирования, необходимо иметь в виду, что скопления неза-

мерзшей воды, обладая значительной электропроводностью, могут экранировать окруженные ими зерна силикатов и льда от внешнего электрического поля и тем самым снижать их влияние на эффективную диэлектрическую проницаемость мерзлой породы. Степень этого экранирования определяется соотношением между эффективным временем τ_{eff} , в течение которого за счет смещения ионов осуществляется макродипольная поляризация, и постоянной времени τ дебаевской релаксации ледяных включений. Если $\tau_{eff} \ll \tau$, поляризация макродиполей происходит настолько быстро, что осуществляется значительное экранирование зерен льда от внешнего электрического поля. Если $\tau_{eff} \gg \tau$, внешнее электрическое поле успевает поляризовать лед, и тогда можно измерить его отклик до того, как возникнет экранирование.

По результатам лабораторных исследований [Фролов, Федюкин, 1983, см. рис. 1] эффективное время релаксации τ_{eff} пресных отмытых кварцевых мерзлых песков при температуре $-1,8^\circ\text{C}$ и суммарной влажности (льдистости) $W_n = 2\%$ составляет 200 мкс, а при $W_n = 20\%$ — около 500 мкс. При понижении температуры эффективное время релаксации быстро возрастает. Так, при -17°C и $W_n = 2\%$ оно равно $\sim 1,5$ мс, а при той же температуре и $W_n = 20\%$ $\tau_{eff} \approx 10$ мс. Что касается постоянной времени τ дебаевской релаксации в ледяных включениях, то, согласно формуле (4), при понижении температуры от $-1,8^\circ\text{C}$ до -17°C ее величина возрастает от 25 до 100 мкс. Таким образом, в рассматриваемом диапазоне температур τ_{eff} почти на порядок превышает τ льда и дистиллированной воды. Это указывает на принципиальную возможность на фоне отклика, создаваемого макродиполями, выделить дебаевскую поляризацию ледяных включений и использовать ее для оценки температуры и льдистости неконсолидированных мерзлых пород.

В свое время переход от частотных к временным измерениям позволил резко повысить чувствительность и разрешающую способность индуктивных методов электроразведки [Сидоров, 1985]. По-видимому, и в диэлектрии мерзлых сред дальнейший прогресс может быть достигнут за счет измерения диэлектрической релаксации во временной области. В этой связи уместно напомнить, что по переходным характеристикам незаземленной петли, измеренным в Муйской котловине над толщей мерзлых песков, четко идентифицируются два поляризационных процесса с постоянными времени порядка 20—30 и 150—200 мкс [Кожевников и др., 1995].

ВЫВОДЫ

1. Эффект Максвелла—Вагнера в геологических средах с порфириковой структурой обуславливает аномальную дисперсию их низкочастотной диэлектрической проницаемости.

2. Проявление эффекта Максвелла—Вагнера в мерзлых крупнодисперсных породах зависит от их температуры и льдистости. При температурах порядка долей — единиц градусов ниже нуля и малой льдистости эффект Максвелла—Вагнера маскируется механизмом макродиполя. По мере понижения температуры и/или повышения льдистости максвелл-вагнеровская поляризация играет все более заметную роль.

3. По сравнению с дебаевской релаксацией поликристаллического льда макродипольная поляризация пресного мерзлого песка является медленным процессом. Это обстоятельство в совокупности с результатами полевых измерений во временной области дает основания надеяться, что дальнейшая разработка методов диэлектрической спектроскопии мерзлых крупнодисперсных пород позволит осуществлять оценку их температуры и льдистости в условиях естественного залегания.

Литература

- Артеменко И. В., Кожевников Н. О., Никифоров С. П. К проблеме устойчивости геологической среды в условиях многолетнемерзлых пород // Мат-лы всерос. науч.-тех. конф. Экология и геофизика. Дубна, 1995, с. 67—68.
- Артеменко И. В., Кожевников Н. О., Никифоров С. П. Новые возможности метода переходных процессов при исследовании мерзлых неконсолидированных пород // Тез. докл. междунар. конф. Фундаментальные исследования криосферы Земли в Арктике и Субарктике. Пуццино, Объед. совет РАН по криолог. Земли, 1996а, с. 212—215.
- Артеменко И. В., Кожевников Н. О., Никифоров С. П. Моделирование переходных и частотных характеристик мерзлых грунтов с учетом диэлектрической релаксации в кристаллах льда // Тез. докл. междунар. геофиз. конф. Электромагнитные исследования с контролируемыми источниками. С.-Петербург, 1996б, с. 35—36.
- Вопросы поляризации горных пород // Сб. статей под ред. А. А. Молчанова, В. А. Сидорова. 1985, 109 с. Деп. в ВИНТИ, № 5847-85.
- Губатенко В. П. Частотная дисперсия и эффект Максвелла—Вагнера в макроанизотропных средах. 1989, 15 с. Деп. в ВИНТИ, № 3907-В89.
- Губатенко В. П. Эффект Максвелла—Вагнера в электроразведке // Изв. АН СССР, Физика Земли, 1991, № 4, с. 88—98.
- Духин С. С., Шилов В. Н. Диэлектрические явления и двойной слой в дисперсных системах и полиэлектrolитах. Киев, Наукова Думка, 1972, 206 с.
- Ершов Э. Д. Общая геокриология: Учеб. для вузов. М., Недра, 1990, 559 с.
- Кожевников Н. О., Никифоров С. П., Снопков С. В. Исследование быстропротекающих процессов вызванной поляризации в мерзлых породах // Геоэкология, 1995, № 2, с. 118—126.

- Кожевников Н. О. Влияние диэлектрической релаксации на переходную характеристику криогенных образований // Геофизические исследования в гидрогеологии и инженерной геологии. Ч. II. Ташкент, САИГИМС, 1991, с. 61—64.
- Мазно Н. Наука о льде. М., Мир, 1988, 231 с.
- Методы региональных инженерно-геокриологических исследований для равнинных территорий. М., Недра, 1986, 207 с.
- Светов Б. С., Агеев В. В., Лебедева Н. А. Поляризуемость горных пород и феномен высокоразрешающей электроразведки // Геофизика, 1996, № 4, с. 42—52.
- Сидоров В. А. Импульсная индуктивная электроразведка. М., Недра, 1985, 192 с.
- Сидоров В. А. Об электрической поляризуемости неоднородных пород // Изв. АН СССР, Физика Земли, 1987, № 10, с. 58—64.
- Фролов А. Д. Электрические и упругие свойства криогенных пород. М., Недра, 1976, 254 с.
- Фролов А. Д. Основные закономерности формирования и изменения электрических и упругих свойств мерзлых пород: Автореф. дис. д-ра техн. наук. М., МГИ, 1977, 32 с.
- Фролов А. Д., Федюкин И. В. О поляризации мерзлых дисперсных пород в переменных электрических полях // Изв. вузов, геол. и разв., 1983, № 6, с. 90—95.
- Фролов А. Д. Диэлектрическая влагометрия мерзлых грунтов // Матер. первой конф. геокриологов России, М., 1996, кн. 2, с. 271—279.
- Фролов А. Д. Комплексная диэлектрическая проницаемость мерзлых грунтов // Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике. Сб. науч. тр. (ред. Е. С. Мельников). Новосибирск, Наука, 1997, с. 102—109.
- Хиппель А. Р. Диэлектрики и волны. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960, 440 с.
- Челидзе Т. Л., Деревянко А. И., Куриленко О. Д. Электрическая спектроскопия гетерогенных систем. Киев, Наукова Думка, 1977, 230 с.
- Alvarez R. Complex dielectric permittivity in rocks: a method for its measurements and analysis // Geophysics, 1973, vol. 38, p. 920—940.
- Davis J. L., Annan A. P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy // Geophys. Prosp., 1989, vol. 37, p. 531—551.
- King M. S., Zimmerman R. W., Corwin R. F. Seismic and electrical properties of unconsolidated permafrost // Geophys. Prosp., 1988, vol. 36, p. 349—364.
- Walker G. G., Kawasaki K. Observation of double sign reversals in transient electromagnetic central induction soundings // Geoprospection, 1988, vol. 25, p. 245—254.

Поступила в редакцию
24 апреля 1998 г.