

Sbor. geol. věd.	Užitá geofyz., 24	Стр. 159—184	14 рис.	3 табл.	— прил.	Praha 1990 ISSN 0036—3319
---------------------	----------------------	-----------------	------------	------------	------------	------------------------------

**Изменения удельных сопротивлений
и относительных диэлектрических
проницаемостей от влажности
при частоте $f = 80$ МГц**

**Změny měrných odporů a poměrných permitivit
s vlhkostí při frekvenci $f = 80$ MHz**

Josef Kozel¹

Представлено 9-го марта 1988 г.

*Resistivity
Relative permittivity
Water saturation
Effect of clay
High frequency*

Kozel, J. (1990): *Izmenenija udeľnych soprotivlenij i otnositelnyh dielektričeskich pronicaemostej ot vlažnosti pri častote $f = 80$ MHz. — Sbor. geol. Věd, užitá Geofyz., 24, 159-184. Praha.*

Экстракт: В представленной работе приводятся теоретические формулы для зависимости удельных сопротивлений и относительных диэлектрических проницаемостей от влажности осадочных, а также изверженных, рудоносных горных пород. Описывается так называемая перколяционная теория, с помощью которой в последнее время объясняются аномальные изменения удельных сопротивлений от влажности, и целый ряд практических определений этих зависимостей в случае горных пород на территории ЧССР. Изучаются также некоторые технические материалы, которые близки к горным породам. В заключении работы с помощью электрической модели порового канала осадочной породы дается объяснение экспериментально установленного нелинейного изменения относительных диэлектрических проницаемостей глинистых пород в зависимости от степени насыщения пор слабоминерализованной водой. Подыскиваются способы аналитического выражения этой зависимости.

¹ *Geofyzika, s. p., Brno, Ječná 29a, 612 46 Brno*

Введение

В последние годы в геофизическую разведку внедряются новые высокочастотные методы, как напр. геофизический радиолокационный метод, который в ЧССР проводится преимущественно с помощью импортного прибора СИР-7.

При исследованиях в скважинах все чаще применяется метод диэлектрического каротажа, который получил большое распространение в СССР (Даев 1980, Карус и др. 1980). Оба названных метода проводятся на частотах порядка 10^7 Гц; частота $f = 80$ МГц — это одна из несущих частот аппаратуры СИР-7.

Накопленный до сих пор опыт свидетельствует о том, что для определения глубинности радиолокационных исследований, для облегчения и уточнения интерпретации результатов полевых работ, в том числе каротажных, очень важно знать изменения удельных сопротивлений и относительных диэлектрических проницаемостей от влажности. На небольших глубинах обычно встречается влажность, значения которой колеблются от степени насыщения $S_w = 0$ вплоть до значений $S_w = 100\%$. Следует заметить, что в порых этих горных пород обычно находится слабоминерализованная вода, удельное сопротивление которой составляет десятки омметров.

Настоящая работа, являющаяся продолжением работы „Относительные диэлектрические проницаемости и удельные сопротивления горных пород в диапазоне частот $10^6 - 10^8$ Гц“ (Kozel 1989), в которой, кроме прочего, приводится детальное описание методов измерения относительных диэлектрических проницаемостей и удельных сопротивлений на образцах горных пород, должна содействовать решению данной проблематики. Необходимо заметить, что измерения проводились с помощью высокочастотного моста Тесла ВМ 431 Е. Средняя погрешность измерения указанных параметров колебалась в пределах от 2 до 5 % в зависимости от точности изготовления образцов.

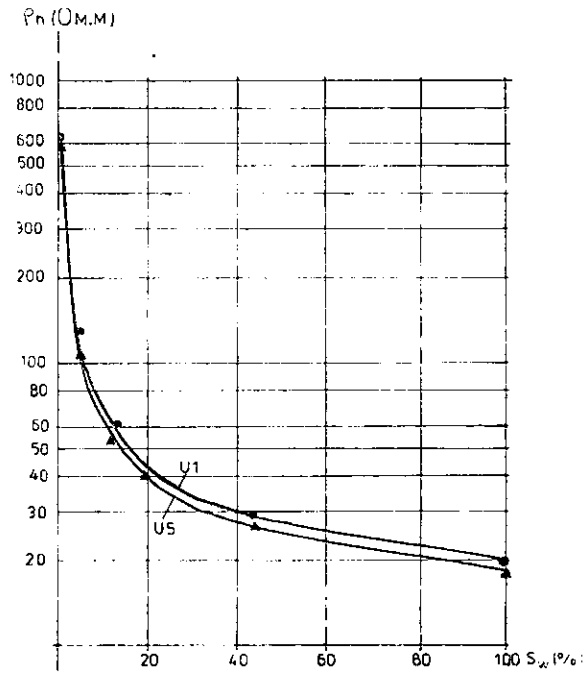
Некоторые знания об изменениях удельных сопротивлений и относительных диэлектрических проницаемостей от влажности

Изучение зависимости удельных сопротивлений от влажности — это часто встречающееся задание, решение которого нужно для интерпретации данных различных методов электроразведки. В качестве примеров можно назвать работы: Bitterlich — Wöbking (1972), Дахнов (1962), Keller (1966), Kozel (1983, 1985), Пархоменко (1965) и др. Ради иллюстрации можно привести, напр., определение зависимости удельного сопротивления ρ_n от степени насыщения пор S_w аргиллитов с органическим компонентом (Kozel 1989) (рис. 1).

Значение S_w вычисляется по формуле $S_w = \frac{m_w - m_0}{m_{100} - m_0}$, где m_w — масса частично насыщенной горной породы, m_{100} — масса горной породы со 100%-ым насыщением и m_0 — масса совершенно сухой горной породы.

Из рис. 1 вытекает, что по мере увеличения влажности происходит понижение удельного сопротивления. Сначала это понижение является довольно быстрым, с $S_w = 30\%$ оно становится уже более медленным, а приблизительно с 60 % оно является уже довольно малым. Форма зависимости у обоих образцов U1, U5 в принципе одинакова.

Однако более часто, чем определение зависимости удельного сопротивления от степени насыщения пор, встречается определение удельных сопротивлений или параметров пористости F от пористости p ; $\rho_h/\rho_w = F = f(p)$, где ρ_w — удельное сопротивление раствора в порах. В данном случае влажность выражается не посредством процента заполнения порового пространства одного образца



1. Зависимость удельных сопротивлений от степени насыщения водой аргиллитов с органическим компонентом (образцы U1, U5)

породы, а посредством пористости совокупности горных пород (формации пород), в которой находятся горные породы разной пористости. При этом обычно предполагается, что $S_w = 100\%$. Одной из наиболее применяемых формул для выражения этой зависимости является эмпирическая формула, введенная Арчи: $F = p^{-m}$, где m — т. наз. коэффициент сцементированности. Впоследствии эта формула была модифицирована разными авторами. Дахновым (1962), напр., для коэффициентов сцементированности вводятся значения m в пределах $m = 1,3 - 2,2$. В настоящее время применяется закон Арчи в форме $\rho_h = a \cdot \rho_w \cdot p^{-m}$, где константа a может обладать значениями от 0,6 до 3,0 в зависимости от литологии и текстуры горных пород (Handbook of physical properties of rocks, Carmichael, ed., 1986).

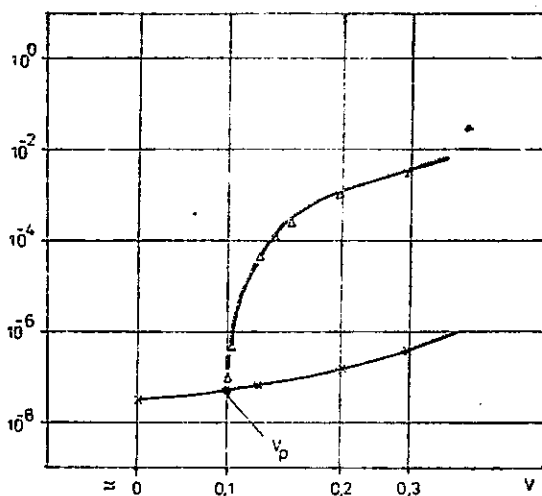
В течение прошедшего десятилетия авторы Schante-Kirkpatrick (1971) и Kirkpatrick (1973) опубликовали новую теорию для объяснения сущности электропроводности в неоднородных системах — теорию перколяции (просачивания, протекания). Впервые эта теория была применена для объяснения

электропроводности горных пород, по всей вероятности, в работе авторов Schankl—Waff (1974).

В СССР была аналогично использована теория протекания (Шкловский—Эфрос 1975) для объяснения проводимости сильно неоднородных сред. В 1979 г. Челидзе была опубликована работа „Перколяционная модель электропроводности минералов“. Для наглядного объяснения проблематики ниже приводится часть его работы в свободной переработке.

Экспериментальным путем (Пархоменко—Мкртчян 1974) была получена зависимость удельной проводимости минералов от содержания проводящих окислов (рис. 2). Для численного выражения такой зависимости обычно применяются законы для смесей Максвелла, Лихтенеккера и других. Челидзе использовал закон Максвелла—Вагнера—Ханая в форме $\sigma = \sigma_1(1 - V_2)t^{-3}$, где σ_1 — удельная проводимость относительно непроводящего скелета (основной массы), V_2 — объем проводящих частиц удельной проводимостью σ_2 .

$\log \sigma \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$



2. Зависимость удельной проводимости минералов от содержания проводящих окислов. Перколяционная модель по Т. Л. Челидзе

Действительно, что σ_1 существенно меньше σ_2 . Однако, законом предполагается, что взаимное воздействие друг на друга частиц проводимостью σ_2 не имеет места. Графическое изображение этой зависимости позволило установить, что эта формула соответствует эксперименту лишь до значения V_p , которое называется пороговым значением. В случае более высоких значений ($V_2 > V_p$) проводимость резко увеличивается. Это явление объясняется с помощью теории перколяции (просачивания) тем, что происходит объединение, скапливание проводящих частиц. Для проводимости такой системы по установлению авторов Schante—Kirkpatrick (1971) действительна формула $\sigma(V) \approx (V - V_p)^t$, где t — критический коэффициент; в случае двумерной

модели его значение составляет 1–1,3, в случае трехмерной – 1,5–1,6. Объединив таким образом обе частные формулы, Челидзе находит окончательную формулу

$$\sigma = \left[\begin{array}{l} \sigma_1(1 - V)^{-3} \text{ для } V < V_p \\ k(V - V_p)^t \text{ для } V > V_p \end{array} \right].$$

Если ради сравнения взять классический закон Арчи, его можно написать в форме $F = \frac{\rho_h}{\rho_w} = p^{-m}$, откуда $\rho_h = \rho_w \cdot p^{-m}$ и, следовательно, обратная величина

удельного сопротивления $\sigma_h = \frac{1}{\rho_h} \cdot p^m = \sigma_w \cdot p^m$, где m , как уже было сказано, находится в пределах $m = 1,3-2,2$. Коэффициент m представляет собой сложную функцию сцементированности, структуры пор или же глигистости пород.

Пористость, как известно, определяется как $p = V_{\text{пор}}/V$ (V – общий объем горной породы). Следовательно, для вышеприведенной части экспоненциального прироста проводимости можно получить близкое функциональное отношение.

Относительные диэлектрические проницаемости

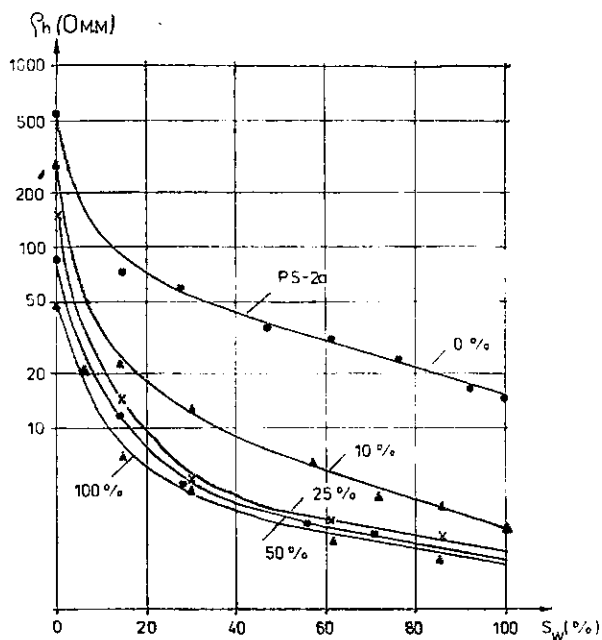
Зависимости относительных диэлектрических проницаемостей ϵ_r от влажности w изучаются уже в меньшей степени, чем аналогичная зависимость для удельных сопротивлений. В литературе встречаются два вида данных. Часто находят или предполагают линейную зависимость $\epsilon_r = f(w)$ (Zemčiková 1981; Jašek 1984 и др.), иногда результаты соответствуют нелинейным, степенным зависимостям. Интересные данные по группам пород разной пористости опубликованы, напр., Краевым (1951).

Чтобы можно было лучше изучать характер изменений удельных сопротивлений и переменных диэлектрических проницаемостей от влажности и сформулировать определенное мнение относительно образцов горных пород из наших областей, была выполнена совокупность исследований разных типов горных пород, а с целью сравнения – также некоторых технических материалов.

Результаты исследования зависимости удельных сопротивлений от влажности или же от степени заполнения пор пород слабоинерализованной водой

Кроме приведенного уже примера для аргиллитов с органическим компонентом были проведены исследования мелкозернистого слабоглинистого песка из района карьера Брно-Черновице, в котором параметрически увеличивалось

содержание бентонита (от 10, 25, 50 объемных % до 100 %) вплоть до „чистого“ бентонита. Результаты приводятся на рис. 3. Из графиков ясно, что по мере увеличения влажности происходит сначала резкое увеличение проводимости (резкое понижение сопротивления) и что приблизительно с 30 % S_w понижение сопротивления становится более медленным, являясь более или менее линейным. Заметно также, что при 50%-ном содержании бентонита зависимость близка к значениям сопротивлений для 100%-ного бентонита. Однако, в общем характер зависимостей очень близок к уже обсуждавшимся зависимостям для аргиллитов с органическим компонентом (образцы U1, U5).



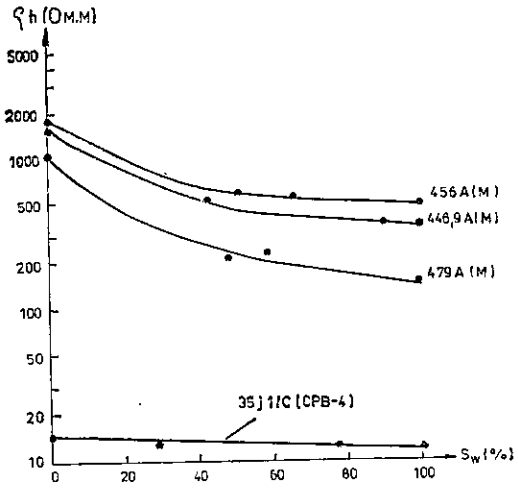
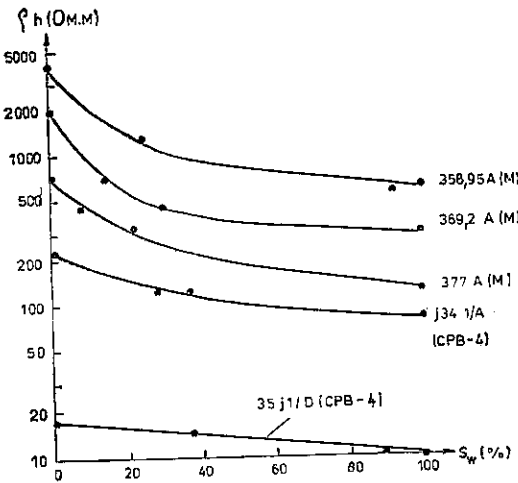
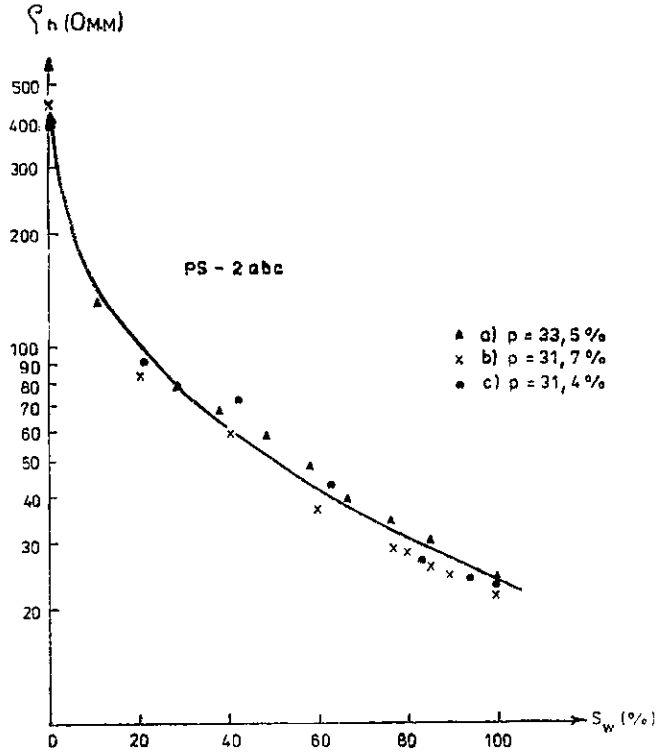
3. Влияние содержания бентонита на изменения удельных сопротивлений песка PS-2a при разной влажности S_w

Если сравнить характер изменений зависимости с предполагаемым изменением по теории перколяции, необходимо отметить, что зависимости не содержат „линейной“ части до т. наз. порогового значения, или что порог смещен к значению близкому к $S_w = 0$.

Для проверки воспроизводимости результатов исследований были проведены контрольные исследования второго и третьего образцов из того же района (рис. 4). Графики свидетельствуют о том, что характер изменений такой же, рассеяние точек вызвано несколько другой пористостью, т. е. неточностью при заполнении пор.

Изучались также горные породы из некоторых рудоносных областей, именно из районов Злате Горы (скважина ЗГ-2093) и Суха Рудна (скважина СРВ-4), содержащие разные количества пирита, пирротина, иногда также графита.

4. Зависимость удельных сопротивлений от влажности образцов слабоглинистых песков PS-2a, PS-2b, PS-2c. Контроль воспроизводимости результатов



5. Примеры зависимости удельных сопротивлений от влажности некоторых образцов из районов Злате Горы (скважина ЗГ-2093) и Суха Рудна (скважина CPB-4)

Полученные результаты приводятся на рис. 5. Зависимости удельных сопротивлений от влажности обладают обычным характером, значения ρ_n понижаются с ростом влажности, сначала быстрее, а при более высокой степени насыщения — медленнее. Необходимо обратить внимание на то, что пористость этих образцов низка и колеблется в пределах $p = 0,2-2\%$ (Kozel 1985), так что понижение удельных сопротивлений от влажности довольно низко. Далее видно, что высокое содержание графита (см. керны N°N° 35C, D) вызывает существенное понижение удельного сопротивления уже у сухих образцов, так что характер зависимости в данном масштабе нельзя четко различить, однако понижение удельного сопротивления от влажности хорошо заметно. В заключение к этим примерам (рис. 5) хотелось бы еще заметить, что влияние пирита и графита на удельные сопротивления и относительные диэлектрические проницаемости детальнее рассматривается в частном заключительном отчете (Kozel 1985).

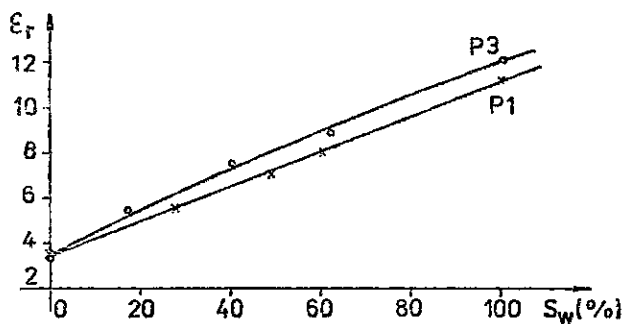
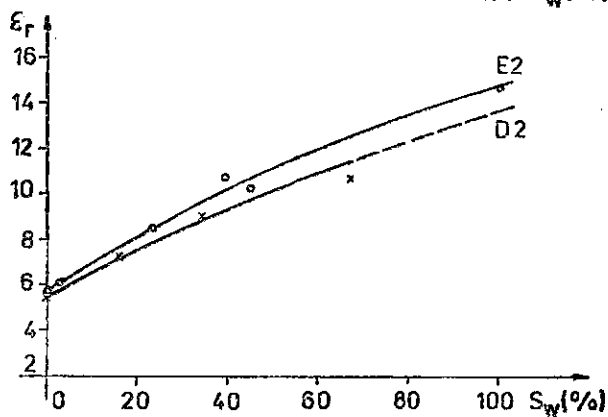
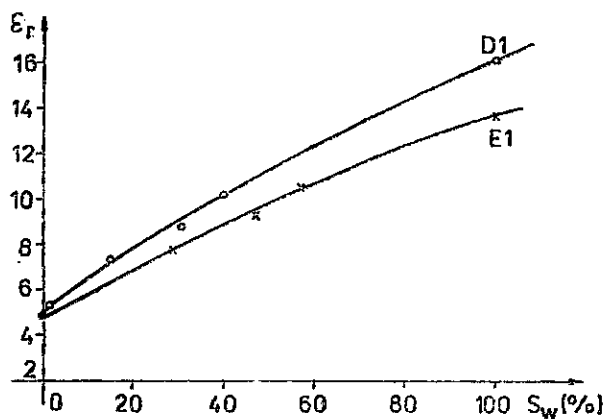
Если обобщить результаты названных выше исследований, можно сказать, что „перколяционного характера“, т. е. резкого увеличения удельной проводимости с какого-то порога V_p установлено не было, только, допустим, в случае, если бы порог V_p был сдвинут в область значений $S_w = 0$. Однако, мы ни в коем случае не собираемся существование перколяционного характера отрицать. Вполне логично, что при увеличении объема проводящих частиц, находящихся в непроводящей среде, при определенном, пороговом количестве, когда зерна начнут соприкасаться, должно произойти резкое увеличение проводимости. Однако, кажется, что у общераспространенных горных пород, особенно если они частично влажны, нет такого контраста между проводящим и непроводящим компонентами, чтобы перколяционный характер мог проявиться.

Что касается факта, что не слишком сухие породы отличаются удельным сопротивлением близким к сопротивлению совершенно мокрых пород, как об этом говорилось в предыдущей работе автора (Kozel 1989), то легко понять, что этот факт вытекает из общих изменений $\rho_n = f(S_w)$. Целый ряд полученных результатов свидетельствует о том, что приблизительно с $S_w = 50\%$ понижение удельных сопротивлений является довольно низким. Этот факт может иметь большое значение для практики полевых малоуглубинных исследований.

Характер изменений относительной диэлектрической проницаемости от влажности разных типов горных пород и технических материалов

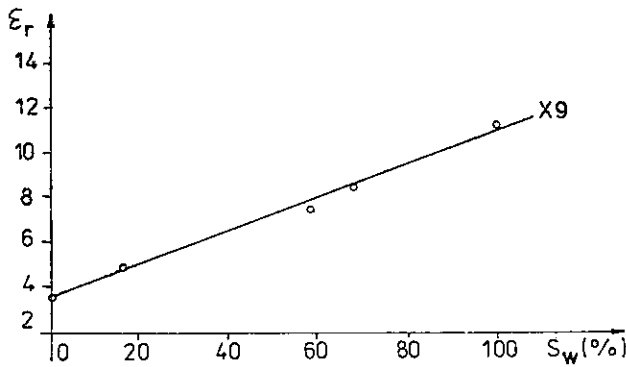
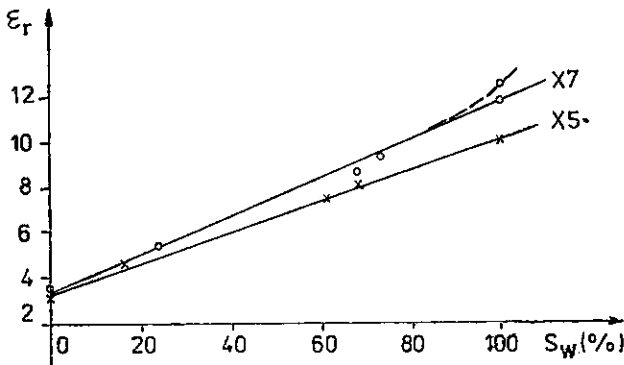
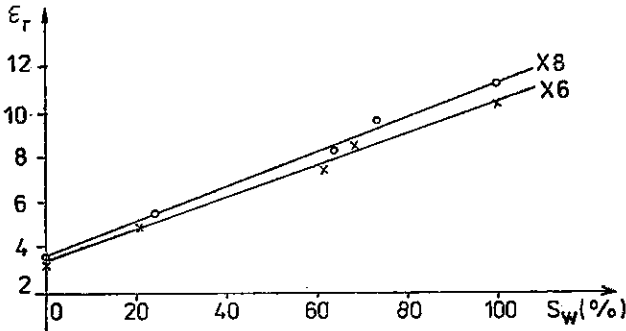
В предыдущей работе автора (Kozel 1989) сказано, что изучение зависимостей относительных диэлектрических проницаемостей от влажности будет продолжено с целью объяснения петрофизических условий для существования лесей-

ного или нелинейного характера зависимости $\epsilon_r = f(S_w)$. Для целей решения этого вопроса проводились следующие измерения.



6. Примеры зависимости относительных диэлектрических проницаемостей от степени насыщения туфов и песчаников

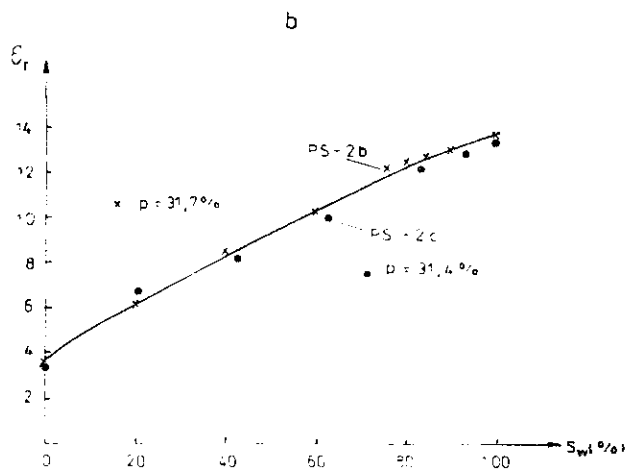
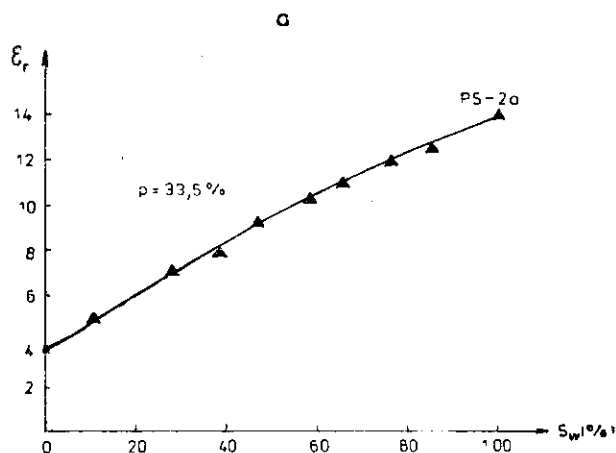
пронумерованных X1 – X9. Для целей проверки однородности кирпича у всех образцов определялись параметры плотности. Полученные результаты приводятся в табл. 3, которая дополнена значениями относительных диэлектрических проницаемостей совершенно сухих и полностью насыщенных водой образцов, где $\rho_w = 7$ омметров.



7. Зависимость относительной диэлектрической проницаемости от влажности кирпичного пола

Что касается параметров плотности, видно, что значения плотности друг от друга не слишком отличаются. Пористость этого материала является довольно большой, в большинстве случаев она приближается к значениям $p = 30\%$, однако значения относительных диэлектрических проницаемостей при $S_w = 100\%$ относительно низки, $\epsilon_r \approx 11,4$. Это значение гораздо меньше значения, установленного для той же частоты $f = 80$ МГц и приблизительно такой же пористости аргиллитов с органическим компонентом, где $\epsilon_r = 16$.

Для целей более детального изучения изменений $\epsilon_r = f(S_w)$ образцы X5–X9 после частичного насыщения порового пространства подверглись более детальным исследованиям. Полученные результаты приводятся на рис. 7. Можно сказать, что в случае всех этих образцов значения относительной диэлектри-



8. a — зависимость относительной диэлектрической проницаемости от влажности слабоглинистого песка PS-2a; b — контроль воспроизводимости результатов — образцы PS-2b, PS-2c

ческой проницаемости линейно растут с влажностью. Что касается отклонения (обозначено штриховой линией) по образцу X7, то оно вызвано чрезмерной влажностью поверхности образца при измерении при $S_w = 100\%$. После удаления этой избыточной влажности значение понизилось и зависимость стала линейной.

В конце настоящей части необходимо коснуться еще результатов измерений песка PS-2a из карьера Брно-Черновице, по которому зависимость удельного сопротивления от степени насыщения S_w уже обсуждалась. Кривая на рис. 8 (a) свидетельствует о том, что зависимость является слегка нелинейной. Для контроля воспроизводимости результатов на рис. 8 (b) показаны результаты по второму и третьему образцам из того же района (PS-2b, PS-2c). Сравнение обоих рисунков подтверждает, что зависимости являются практически тождественными и что было достигнуто очень хорошей воспроизводимости.

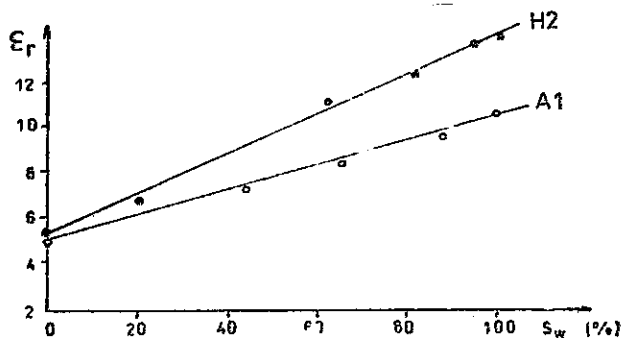
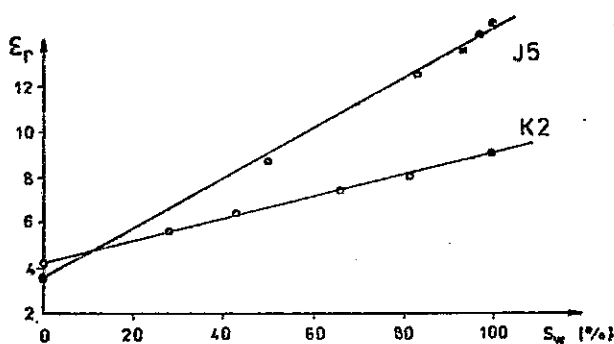
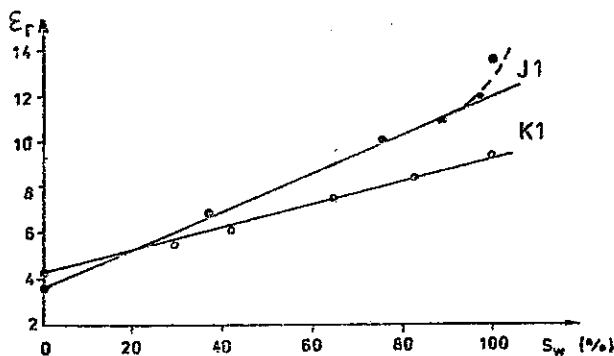
Ради полноты необходимо сказать, что в работе Kozel (1985) изучались также другие образцы рыхлых горных пород, а именно, образцы грунтов с примесью глин, трав, хвои и т. п., а также образцы без этих примесей. Также в этом случае подтвердилось, что примесь глин вызывает нелинейный характер зависимости $\epsilon_r = f(S_w)$ и повышение значений ϵ_r для $S_w = 0$.

Анализы зависимости относительной диэлектрической проницаемости от степени насыщения горных пород из наших районов, которые исследовались некоторыми другими авторами

В дипломной работе Яшека (Jašek 1984) описывается большее количество определений зависимости $\epsilon_r = f(S_w)$. Эти работы проводились в нашей лаборатории. Исследованию подверглись прежде всего технические материалы, как кирпич из терезианской крепости, образцы из дорожного полотна, каменно-керамический материал больших труб и т. п. Результаты приводятся Яшеком в форме таблиц. Некоторые его измерения показаны на рис. 9. Образцы J1 и J6 — это пластинки из терезианского кирпича, K1 и K2 — образцы из каменно-керамической трубы, A1 — образец из битумного слоя и H2 — образец из верхнего слоя бетона автомагистрали.

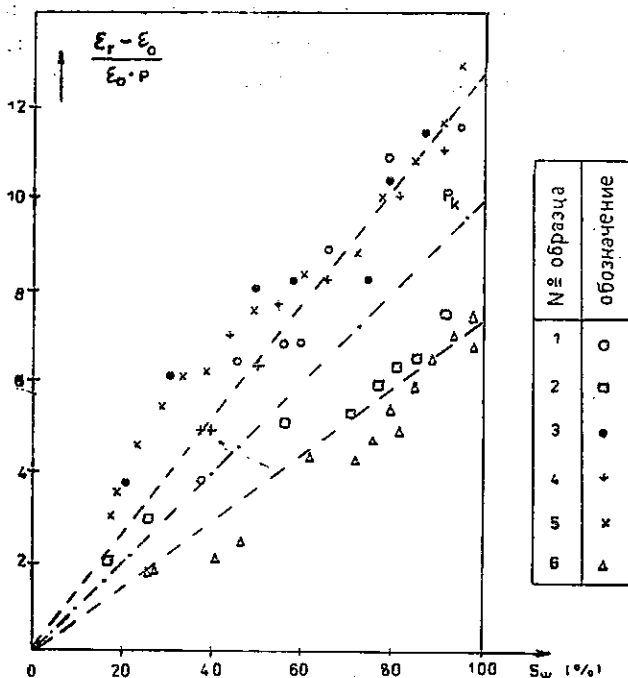
Кривые на рис. 9 свидетельствуют о том, что в большинстве случаев имеют место приблизительно линейные зависимости ϵ_r от S_w . Однако, необходимо заметить, что в случае приведенного образца J1 (и то же самое было установлено нами также у других образцов, приведенных в работе Яшека) происходит резкое, фиктивное увеличение ϵ_r при $S_w \rightarrow 100\%$. Мы думаем, что это вызвано т. наз. избыточной по сравнению с предположением для $S_w = 100\%$ водой на поверхности образца. С этим явлением мы встретились при исследовании кирпичного пола (рис. 7, образец X7). После поправки за это явление линейная зависимость $\epsilon_r = f(S_w)$ становится еще более четкой.

В заключительном отчете Земчковой (Zemčiková 1981) основное внимание уделяется определению влияния влажности на поведение относительной диэлектрической проницаемости. Было проведено исследование шести разных образцов пористостью $p = 1,3-8,5\%$ при разной степени насыщения порового пространства. У всех предполагается приблизительно линейная зависимость $\epsilon_r = f(S_w)$. С помощью обработки результатов этих исследований, которые приводятся нами в виде кривых на рис. 10, Земчкова находит способ опреде-



9. Зависимость относительных диэлектрических проницаемостей от влажности некоторых технических материалов (по результатам Г. Яшека)

ния измерений ϵ_r под влиянием влажности, если известны пористость p , степень насыщения S_w и относительная диэлектрическая проницаемость в сухом состоянии ϵ_0 .



10. Нормированное изменение относительной диэлектрической проницаемости в зависимости от степени насыщения (по данным Я. Земчиковой)

Влияние „глинистости“ на изменения относительных диэлектрических проницаемостей в зависимости от влажности

Анализы, проведенные в предыдущей части, имели своей целью накопление данных, которые привели бы к объяснению разного характера зависимости $\epsilon_r = f(S_w)$. Так как классификация по пористости (см. Краев 1951) может быть проблематичной (аргиллит с органическим компонентом U1 обладает p приблизительно 30 % и той же пористостью отличается также кирпичный пол, образцы X1–X9), напрашивается возможность заниматься влиянием глинистости. С этой точки зрения приходим к заключению, что для т. наз. неглинистых горных пород или технических материалов будем, как правило, получать линейные зависимости относительных диэлектрических проницаемостей от степени насыщения пор водой. К этой группе можно относить породы и технические материалы, как напр. кристаллические породы с м. Дубрава, измерение которых описано автором (Kozel 1989), разные типы гранитных пород, обожженные глины, кирпич из терезианской крепости Йосефов, образцы из пола собора

в г. Збраслав, образцы из битумного слоя автомагистрали, каменно-керамический материал сточных труб и другие образцы. Можно предполагать, что к этой группе будет относиться большая часть изверженных и метаморфических горных пород.

Ко второй группе т. наз. глинистых горных пород можно отнести прежде всего аргиллиты с органическим компонентом, пески с бентонитом, частично доломитовые туфы, к ней относятся также песчаники с большей степенью глинистости. В работе авторов Umann—Kozel (1957) приводятся также примеры резкого увеличения зависимости ϵ_r от влажности в начальной стадии насыщения аргиллитов из района Лужице. С этим хорошо согласуется также работа, опубликованная Рикитаки (Rikitaki 1951). По результатам его исследований относительная диэлектрическая проницаемость почвы ϵ_r при увеличении влажности S_w от 0 до 50 % увеличивается по кривой, близкой к параболе, от $\epsilon_r = 3$ до $\epsilon_r = 40$.

Необходимо также заметить, что под понятием глинистость в данном случае не подразумевается только содержание частиц, размеры которых меньше 0,01 мм, как это часто имеет место. Глинистость считается физико-химическим проявлением породы, где наряду с содержанием частиц, меньших 0,01 мм, роль играют также качество цемента, степень цементированности, криволинейность пор и т. д., т. е. понятие глинистости в данном случае соответствует понятию глинистости в электрическом каротаже. Известны также способы количественного определения глинистости (Вендельштейн 1960, Kozel 1969, Schumberger Corp. 1972a,b).

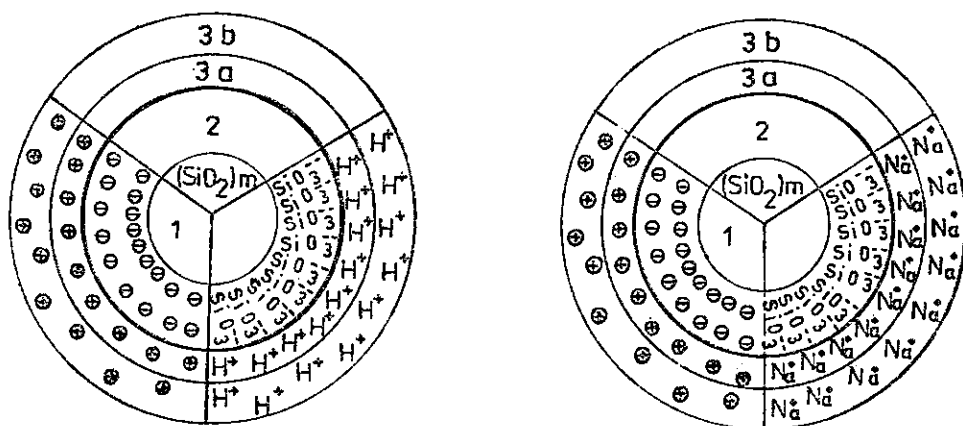
Электрическая модель порового пространства

Относительно резкое увеличение значений относительных диэлектрических проницаемостей глинистых пород в начальной фазе насыщения (в случае аргиллитов с органическим компонентом это было приблизительно до $S_w = 20\%$) объясняем с помощью следующего представления, опирающегося на модель электрического двойного слоя, образующегося внутри порового канала осадочных пород.

Согласно часто применяемому представлению поровое пространство отложений можно заменить системой капилляров, на стенках которых находится электрический заряд. Этот в большинстве случаев отрицательный заряд компенсируется ионами H^+ , Na^+ , Ca^{++} ... из порового раствора. Таким образом на границе твердой и жидкой фаз образуется электрический двойной слой.

В случае глинистых горных пород возникновение заряда можно по Гриму (Grim 1959) иллюстрировать на примере мицеллы SiO_2 (рис. 11). В результате диссоциации кремневой кислоты образуются катионы H^+ и анионы SiO_3^{--} . Анионы SiO_3^{--} остаются на поверхности ядра SiO_2 и придают ему отрицатель-

ный заряд; таким образом они образуют внутреннюю оболочку электрического двойного слоя. Внешней оболочкой являются катионы H^+ , которые с определенной интенсивностью притягиваются к отрицательной поверхности.



11. Образование электрического двойного слоя на примере мицеллы SiO_2
 1 — ядро мицеллы; 2 — внутренняя оболочка электрического двойного слоя; 3a, б — внешняя оболочка двойного слоя

Таким образом образуется трехслойная модель:

- 1 — ядро мицеллы, т. е. твердая фаза, которая с электрической точки зрения нейтральна;
- 2 — слой отрицательного заряда, прилипающий к поверхности ядра и относящийся к твердой фазе породы (внутренняя часть электрического двойного слоя);
- 3 — слой положительного заряда, образованный катионами, находящимися в контактном растворе (наружная часть электрического двойного слоя); по некоторым представлениям (Vuzagh 1958) его можно разделить на две части 3a, 3b (рис. 11).

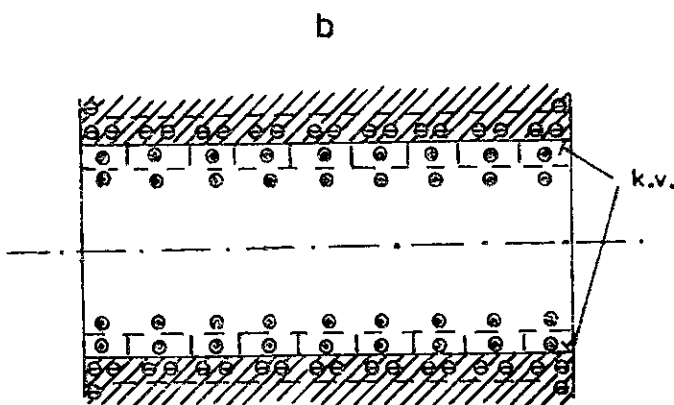
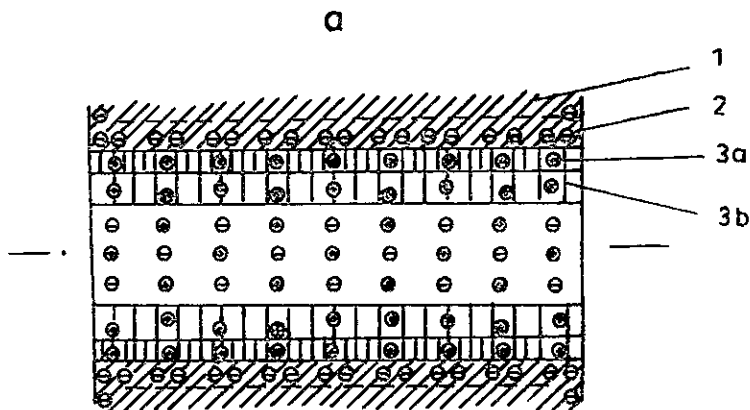
В естественных условиях под влиянием разной минерализации поровых растворов происходят разные ионообменные процессы. Таким образом по Вендельштейну (1960) и Козелу (Kozel 1966) глинистую породу можно перевести на тип Na^+ , K^+ или Ca^{++} . Пример электрического двойного слоя с внешней оболочкой, сложившейся из ионов Na^+ приводится также на рис. 11.

Применением приведенных моделей для объяснения возникновения диффузионно-адсорбционных потенциалов занимались Эйдманн (1956), а также Kozel (1966). На основании этих работ электрическую модель порового канала можно себе представить способом, приведенным на рис. 12:

(а) При 100 %-ном насыщении пор раствор заполняет пространство внешней части электрического двойного слоя и в середине пор находится т. наз. свобод-

ный раствор, на который электрическое поле двойного слоя уже не действует.

(b) При полном (ввиду имеется стандартном) высушивании $S_w = 0$, что у глинистых пород является в определенной степени относительным (кристаллическая вода), предполагаем, что вода удаляется сначала из мест свободного раствора и затем из обоих слоев внешнего двойного слоя (3a, 3b).



12. Электрическая модель порового канала породы

- 1 — ядро мицеллы; 2 — внутренняя оболочка электрического двойного слоя; 3a — адсорбционный слой; 3b — диффузионный слой;
 a — насыщение $S_w = 100\%$; b — насыщение $S_w = 0\%$;
 k. v. — „кристаллическая вода“ (при стандартном высушивании)

Для частичного насыщения глинистой породы (в размере единицы S_w) у гидрофильных пород можно предполагать, что влажность распределяется более или менее равномерно по стенкам пор и заполняет пространства слоев 3a и 3b

(т. наз. слоев Стерна и Гуйова). Ионы этих слоев по отношению к слою 2 можно себе представить как параллельно расположенные микроконденсаторы, которые существенно содействуют увеличению относительной диэлектрической проницаемости.

После заполнения пространства внешней части электрического двойного слоя происходит постепенное заполнение пространства т. наз. свободного раствора и относительная диэлектрическая проницаемость увеличивается уже практически линейно.

Для случая экстремально глинистых горных пород (мембран) можно предполагать, что пространством т. наз. свободного раствора можно пренебречь и, следовательно, участок с линейным увеличением $\epsilon_r = f(S_w)$ в форме зависимости не проявится.

Аналитическое выражение зависимости $\epsilon_r = f(S_w)$

Для неглинистых горных пород можно принять формулу

$$\epsilon_r = \epsilon_{r_{100}} \cdot S_w + \epsilon_{r_0} \cdot (1 - S_w).$$

Для глинистых пород ищутся пути, как долю, которая при частичном и полном насыщении приводит к повышению относительных диэлектрических проницаемостей, учесть в предыдущей формуле. Из разных возможностей было бы, может быть, подходящим введение в формулу т. наз. глинистостей B . В результате этого можно было бы получить:

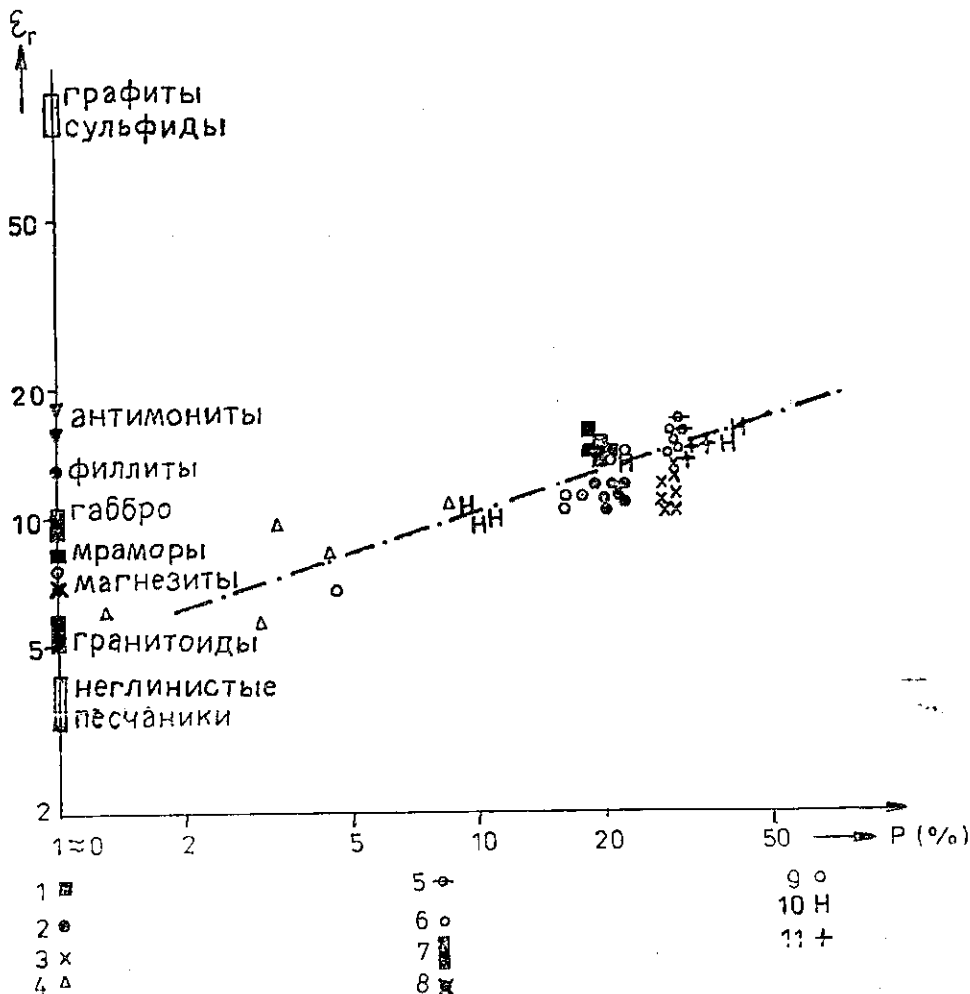
$$\epsilon_r = \epsilon_{r_{100}} \cdot S_w + \epsilon_{r_0} \cdot (1 - S_w) + B \cdot f(S_w).$$

Однако, в данной стадии работ пока еще нет достаточного материала для количественного определения члена $B \cdot f(S_w)$. Затруднение заключается в том, что в нашем распоряжении имеется лишь небольшое количество результатов измерений глинистых горных пород и их глинистость B в большинстве случаев оценивается по макроскопическому описанию горной породы. Поэтому желательно продолжить работы по этой проблематике, постепенно проводить дальнейшие исследования и на следующем этапе эту формулу уточнить.

Зависимость относительных диэлектрических проницаемостей от пористости горных пород

При полном заполнении порового пространства можно в общем сказать, что относительная диэлектрическая проницаемость будет увеличиваться по мере увеличения пористости. Если полученные результаты выразить графически, можно получить очень свободную связь относительной диэлектрической прони-

цаемости с пористостью (рис. 13). Рассеяние данных обусловлено прежде всего горными породами низкой пористости $p \approx 1-3\%$, минеральный состав которых вызывает относительно высокие значения относительных диэлектрических проницаемостей. Это, напр., изученный автором антимонит (Kozel 1989), из литературы известны мраморы ($\epsilon_r = 8,3$), филлиты ($\epsilon_r = 13,0$), габбро ($\epsilon_r = 9$ до 10) и т. д. (Пархоменко 1956). Наоборот, значения относительных диэлектрических проницаемостей большинства осадочных пород, особенно неглинистых, находятся в предполагаемом диапазоне пористостей $\epsilon_r = 3-5$.



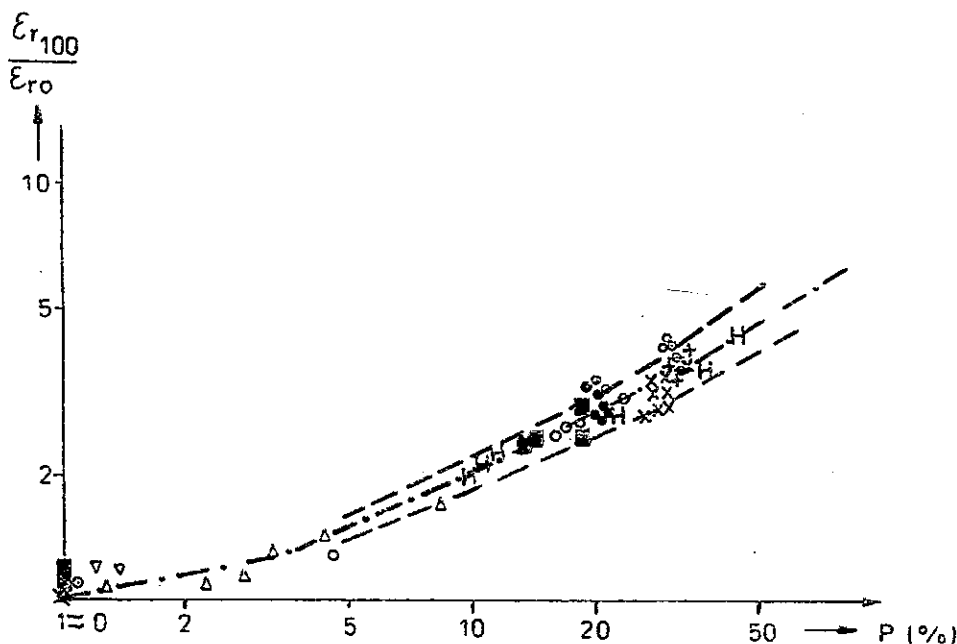
13. Связь относительной диэлектрической проницаемости с пористостью пород
 1 — доломитовые туфы; 2 — песчаники P1—P8; 3 — образцы X1—X9; 4 — образцы Я. Земчиковой; 5 — аргиллиты с органическим компонентом; 6 — порцелланиты; 7 — гранодиориты с м. Дубрава; 8 — магнезиты; 9 — графитовые сланцы; 10 — образцы Г. Яшека; 11 — песок из карьера Брно-Черновице

По мере увеличения пористостей (при $S_w = 100\%$) происходит увеличение относительных диэлектрических проницаемостей, которые по данным исследований достигают значений $\epsilon_r \approx 15$, причем для той же пористости (напр. $p \approx 30\%$) можно предполагать большее увеличение относительных диэлектрических проницаемостей глинистых пород, чем в случае неглинистых. Однако, и здесь может иметь место целый ряд исключений. Значения, превышающие 81, т. е. ϵ_r воды, отмечены у графита, некоторых сульфидов и т. д. (Пархоменко 1965).

Для целей более удобной обработки зависимости относительных диэлектрических проницаемостей от пористости мы ввели отношение относительных диэлектрических проницаемостей совершенно насыщенной и совершенно сухой горных пород $\epsilon_{r100}/\epsilon_{r0}$. Таким образом как будто исключается влияние минерального состава. Потом, в отличие от свободной связи (рис. 13), находим зависимость отношения относительных диэлектрических проницаемостей от пористости, которая приводится на рис. 14.

Для частот $f = 80$ МГц, при которых исследовались обсуждаемые образцы, зависимость $\epsilon_{r100} = \epsilon_{r0} \cdot f(p)$ можно выразить также посредством приближенной аналитической формулы. Для пористых рыхлых и уплотненных горных пород и близких к горным породам материалов приблизительно действительно:

$$\epsilon_{r100} \doteq \epsilon_{r0}(1 + 0,080 \cdot p); p(\%)$$



14. Зависимость отношения относительных диэлектрических проницаемостей от пористости горных пород и технических материалов

Результаты исследований, приведенные на рис. 14, целесообразно будет в течение дальнейшего этапа дополнить еще исследованием глинистых пород, почв и других покрывающих материалов и в случае необходимости уточнить, напр., по литологическим типам горных пород и т. д.

Обобщение результатов

В работе обсуждаются теоретические формулы для зависимости удельных сопротивлений и относительных диэлектрических проницаемостей от влажности осадочных, изверженных, рудоносных пород. Описывается т. наз. перколяционная теория, с помощью которой в последнее время объясняются аномальные характеристики изменений удельных сопротивлений в зависимости от влажности. Был проведен целый ряд практических исследований этих зависимостей на выбранных породах ЧССР. Изучались также некоторые технические материалы, близкие к горным породам, как напр. кирпичный пол, каменно-керамический материал сточных труб, образцы из дорожного полотна и т. д. Исследования предоставили целый ряд новых, конкретных данных как по исследованным породам, так и по техническим материалам, которые при частоте $f = 80$ МГц в литературе описываются лишь изредка.

Из изучения зависимости удельных сопротивлений от влажности вытекает, что у исследованных образцов горных пород из разных районов ЧССР лишь с трудом можно говорить о т. наз. перколяционной характеристике зависимости; может быть, лишь тогда, когда порог V_p резкого увеличения проводимости сдвинут в область значений, близких $S_w \approx 0$. Такой же результат можно установить также по модели порового канала осадочной горной породы.

На основании изучения зависимостей $\epsilon_r = f(S_w)$ разных типов горных пород и технических материалов были получены новые, оригинальные сведения о поведении относительных диэлектрических проницаемостей глинистых пород разной влажности. В случае этих пород с помощью электрической модели порового канала новым способом объяснены нелинейные изменения зависимости $\epsilon_r = f(S_w)$. Ведутся поиски способов аналитического выражения этой зависимости.

В заключительной части работы проведен анализ зависимости относительных диэлектрических проницаемостей от пористости. Введение отношения $\epsilon_{r,100}/\epsilon_{r0}$ позволило учитывать и количественно выражать зависимость отношения относительных диэлектрических проницаемостей от пористости глинистых и неглинистых горных пород.

K tisku doporučila M. Laštovičková

Přeložila E. Pešková

Литература

- Вендельштейн, Б. Ю. (1960): О природе диффузионно-адсорбционных потенциалов. — Прикл. геофиз., 26. Москва.
- Даев, Д. С. (1980): Диэлектрический каротаж. — Труды 25-го междунар. геофиз. симп., 2. Секешфехервар.
- Дахнов, В. Н. (1962): Интерпретации результатов геофизических исследований разрезов скважин. — Гостехиздат. Москва.
- Карус, Е. В. и др. (1980): Выделение и оценка коллекторов нефти и газа. — Труды 25-го междунар. геофиз. симп., 2. Секешфехервар.
- Краев, А. П. (1951): Основы геоэлектрики. — Гос. издат. научно-техн. литературы. Москва, Ленинград.
- Пархоменко, Э. И. (1965): Электрические свойства горных пород. — Издат. Наука. Москва.
- Пархоменко, Э. И.—Мкртчян, С. А. (1974): Химический состав и электропроводность минералов при высоких давлениях и температурах. — Изв. Акад. наук СССР, Физ. Земли, 12. Москва.
- Челидзе, Т. Л. (1979): Перколяционная модель электропроводности минералов. — Изв. Акад. наук СССР, Физ. Земли, 11. Москва.
- Шкловский, Б. И.—Эфрос, А. Л. (1975): Теория протекания и проводимость сильно неоднородных сред. — Усп. физ. наук, 117. Москва.
- Эйдманн, И. Е. (1956): Об электрокаротажных параметрах. — Прикл. геофиз., 14. Москва.
- Bitterlich, W.—Wöbking, H. (1972): Geoelektronik. — Springer Verl. Wien, New York.
- Buzagh, A. (1958): Koloidika. — Vyd. Slov. akad. vied. Bratislava.
- Carmichael, R. S., ed. (1986): Handbook of physical properties of rocks, vol. I. — CRC Press, Inc., Sec. Printing. New York.
- Grim, R. E. (1959): Минералогия глин. — Издат. иностр. лит. (перевод с англ.). Москва.
- Jašek, H. (1984): Geofyzikální radiolokační metoda. — Dipl. práce, přírodověd. fak. Karl. univ. Praha.
- Keller, G. V. (1966): Electrical properties of rock and minerals. — Handbook of physical constants. New York.
- Kirkpatrick, S. (1973): Percolation and conduction. — Rev. mod. Phys., 45. New York.
- Kozel, J. (1966): Difúzně adsorpční potenciály. — Kand. dis. práce, Úst. užité geofyz. Brno.
- (1969): Зависимость собственных потенциалов от удельной поверхности осадочных горных пород. — Sbor. geol. Věd, užitá Geofyz., 8, 117—138. Praha.
- (1983): Výzkum měření elektrické permitivity hornin. — MS Geofond. Praha.
- (1985): Výzkum elektrických vlastností hornin s iontovou a elektrickou vodivostí v oblasti 10^8 Hz. — MS Geofond. Praha.
- (1989): Относительные диэлектрические проницаемости и удельные сопротивления горных пород в диапазоне частот 10^6 — 10^8 Гц. — Sbor. geol. Věd, užitá Geofyz., 23, 85—102. Praha.
- Rikitaki, T. (1951): Electrical properties of soil at radio frequencies. — Bull. Earthquake Res. Inst., 29. Tokyo.
- Schankl, T. J.—Waff, H. S. (1974): Conduction in fluid-bearing rock. — J. geophys. Res., 79. Washington.
- Schante, V. K.—Kirkpatrick, S. (1971): An introduction to percolation theory. — Advances in Geophys., 20. London, New York.
- Schlumberger Corp. (1972a): The essentials of log interpretation practice. — Paris.
- (1972b): Log interpretation, vol. I. Principles. — Washington.
- Uhmann, J.—Kozel, J. (1957): Výzkum elektrických vlastností hornin naftonadějných oblastí ČSR. — MS Úst. pro naft. výzk. Brno.
- Zemčíková, J. (1981) in Záhora, R.—Kunzmann, R. et al. (1981): Geofyzikální radiolokační metoda, část I. — MS Geofyzika, s. p. Brno.

Změny měrných odporů a poměrných permitivit s vlhkostí při frekvenci $f = 80$ MHz

(Résumé ruského textu)

Josef Kozel

Předloženo 9. března 1988

V předložené práci byly diskutovány teoretické vztahy pro závislost měrných odporů a poměrných permitivit na vlhkosti hornin sedimentárních i hornin vyvřelých, rudonosných. Byla popsána tzv. perkolační teorie, kterou se v poslední době vysvětlují anomální průběhy změn měrných odporů na vlhkosti (obr. 2). Byla provedena řada praktických měření těchto závislostí u vybraných hornin z území ČSSR (obr. 1, 3, 4, 5). Rovněž byly zkoumány i některé technické materiály blízké horninám, jako je například cihlová dlažba, cihly, kamenina odpadních rour, vzorky z dálničního tělesa apod. (obr. 6 až 11). Měření přineslo řadu nových konkrétních poznatků na studovaných horninách i technických materiálech, které při zvolené frekvenci $f = 80$ MHz jsou v literatuře uváděny jen ojediněle.

Ze studia závislosti měrných odporů na vlhkosti vyplynulo, že u sledovaných vzorků hornin z různých lokalit ČSSR lze s těžší hovořit o tzv. perkolačním průběhu závislosti, snad jen tak, že by byl práh V_p pro prudký nárůst vodivosti posunut do hodnot blízko $S_w = 0$. To lze vyvodit i z modelu pórového kanálku sedimentární horniny (obr. 12).

Na základě studia vztahů $\epsilon_r = f(S_w)$ u různých typů hornin a technických materiálů byly získány nové, původní poznatky o chování poměrných permitivit jílovitých hornin s různou vlhkostí. U těchto hornin byl pomocí elektrického modelu pórového kanálku (obr. 12) originálním způsobem vysvětlen nelineární průběh závislosti $\epsilon_r = f(S_w)$. Je hledána cesta pro analytické vyjádření tohoto vztahu.

V závěru práce je proveden rozbor závislosti poměrných permitivit na pórovitosti (obr. 13). Zavedením poměru $\epsilon_{r,100}/\epsilon_{r,0}$ se podařilo vystihnout a kvantitativně vyjádřit závislost poměru poměrných permitivit na pórovitosti pro jílovité i nejílovité horniny (obr. 14).

Vysvětlivky k tabulkám

Tabulka 1. Hustotní parametry a poměrné permitivity některých hornin z lokality Bankov.

Tabulka 2. Hustotní parametry a poměrné permitivity některých vybraných pískovců.

Tabulka 3. Hustotní parametry a poměrné permitivity vzorků z cihlové dlažby chrámu ve Zbraslavi.

Vysvětlivky k obrázkům

1. Závislost měrných odporů na stupni nasycení vodou pro uhelné jílovce U1, U5.
2. Závislost měrné vodivosti minerálů na obsahu vodivých oxidů. Perkolační model T. L. Čelidze.
3. Vliv obsahu bentonitu na změny měrných odporů písku PS-2a při různé vlhkosti S_w .
4. Závislost měrných odporů na vlhkosti pro vzorky slabě jílovitých písků PS-2a, PS-2b, PS-2c. Kontrola reprodukovatelnosti měření.
5. Ukázky závislosti měrných odporů na vlhkosti některých vzorků z oblasti Zlatých Hor (vrt ZH-2093) a Suché Rudné (vrt SRV-4).
6. Ukázky závislosti poměrných permitivit na stupni nasycení pro tufy a pískovce.
7. Závislost poměrné permitivity na vlhkosti cihlové dlažby.
- 8a. Závislost poměrné permitivity na vlhkosti pro slabě jílovitý písek PS-2a.
- 8b. Kontrola reprodukovatelnosti měření – vzorky PS-2b, c.
9. Závislost poměrných permitivit na vlhkosti pro některé technické materiály (podle měření H. Jaška).
10. Normovaná změna poměrné permitivity v závislosti na stupni nasycení (podle měření J. Zemčíkové).
11. Vznik elektrické dvojvrstvy na příkladu micely SiO_2 .
1 – jádro micely, *2* – vnitřní obložení elektrické dvojvrstvy, *3a, b* – vnější obložení dvojvrstvy.
12. Elektrický model pórovitého kanálku horniny.
1 – jádro micely, *2* – vnitřní obložení elektrické dvojvrstvy, *3a* – vrstva adsorpční (Sternova), *3b* – vrstva difúzní (Gouyova), *a* – nasycení $S_w = 100\%$, *b* – nasycení $S_w = 0$, *k. v.* – „krystalická voda“ (při standardním vysušení).
13. Vztah mezi poměrnou permitivitou a pórovitostí hornin.
1 – dolomitické tufy, *2* – pískovce P1–P8, *3* – vzorky X1–X9, *4* – vzorky J. Zemčíkové, *5* – uhelné jílovce, *6* – porcelanity, *7* – granitoidy ložiska Důbrava, *8* – magnezity, *9* – grafitické břidlice, *10* – vzorky H. Jaška, *11* – písek – Brno-Černovice.
14. Závislost poměru poměrných permitivit na pórovitosti hornin a technických materiálů.

Dependences of resistivities and relative permittivities on moisture content at the frequency of $f = 80$ MHz

The theoretical relations for dependences of resistivities and relative permittivities on the moisture content of ore-bearing sedimentary and igneous rocks are discussed. The so-called percolation theory is described which has recently served for an explanation of anomalous dependences of resistivities on the moisture content. Several measurements of these dependences are studied, which were conducted on the rocks from the Czechoslovak territory as well as for some technical materials. By means of an electric model of the pore channel of a sedimentary rock the detected nonlinear dependence of relative permittivities of argillaceous rocks on the rate of pore saturation with weakly mineralized water is explained. Attempts are made to express this relation analytically.

Přeložil G. Pliva