

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ СВЯЗАННОЙ ВОДЫ В КЕРНАХ НА СВЧ

Табарин В.А., Демьянцева С.Д.

*Сургутский государственный университет*

*В работе рассматривается одно из перспективных и экономически выгодных направлений в решении проблемы определения связанной воды с применением аппаратуры и методов оценки ее содержания по диэлектрическим свойствам геологического пласта с использованием электромагнитного излучения сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона длин волн. Особый интерес вызывает использование СВЧ методов для оценки водонасыщенности кернавого материала в тех случаях, когда традиционные электрические методы оказываются бессильными или ненадежными.*

*Очевидно, что наиболее полное представление о диэлектрических свойствах вещества можно получить из измерений его комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_k$ . В связи с этим в работе разработана методика и технология определения содержания связанной воды в цилиндрических образцах керна диаметром и высотой 0,03 м по результатам измерения их диэлектрических характеристик на СВЧ и осуществлена проверка разработанной методики на коллекции образцов различного состава с известными значениями коэффициентов пористости  $K_{\Pi}$  и остаточной воды  $K_{ОВ}$ . Значения  $K_{\Pi}$  образцов керна варьировались от 3 до 24 %, значения  $K_{ОВ}$  изменялись в пределах от 88.9 до 32.6 %. Погрешность в определении связанной воды не превышала 10 %.*

*Ключевые слова: керна, связанная вода, комплексная диэлектрическая проницаемость, сверхвысокие частоты, квазиоптический метод измерения.*

### Введение

В настоящее время остро стоит проблема получения данных о содержании связанной воды в образцах керна, отбираемого при разведочном бурении скважин. Среди известных способов определения связанной воды (капиллярметрический, центрифугирования, капиллярной вытяжки) в практике лабораторных исследований наибольшее распространение получил метод центрифугирования. Однако результаты измерений, полученные этим методом, зависят от технического совершенства используемой центрифуги и могут значительно отличаться для одних и тех же образцов. Это обстоятельство затрудняет интерпретацию полученных данных и снижает достоверность результатов измерений. В последние годы для задач геофизики, в том числе для обнаружения связанной воды,

интенсивно развиваются электронный и протонный магнитные резонансные методы (ЭПР и ЯМР). Однако они достаточно дороги и не совсем пригодны для создания малогабаритных полевых и лабораторных установок.

Одним из перспективных и экономически выгодным направлением в решении проблемы определения связанной воды, является применение аппаратуры и методов оценки ее содержания по диэлектрическим свойствам геологического пласта с использованием электромагнитного излучения сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона длин волн.

Разработанные более 40 лет назад СВЧ методы изучения диэлектриков начали внедряться в практику геофизических исследований лишь в начале 90-х годов, в основном, благодаря усилиям специалистов США и Канады.

Особый интерес вызывает использование СВЧ методов для оценки водонасыщенности кернового материала особенно в тех случаях, когда традиционные электрические методы оказываются бессильными или ненадежными. Очевидно, что наиболее полное представление о диэлектрических свойствах вещества можно получить из измерений его комплексной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_k$ :

$$\varepsilon_k = \varepsilon - j\sigma/\omega = \varepsilon' - j\varepsilon'' ,$$

где  $\omega$  - угловая частота гармонического электромагнитного излучения, взаимодействующего с веществом,  $\sigma$  - проводимость,  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость вещества,  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  - действительная и мнимая составляющие комплексной диэлектрической проницаемости вещества.

К достоинствам измерений  $\varepsilon$  на СВЧ следует отнести достаточно высокую контрастность между значениями  $\varepsilon$  воды ( $\varepsilon = (40-80) \varepsilon_0$ , где  $\varepsilon_0$  - абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума) и скелета породы ( $\varepsilon = (3-6) \varepsilon_0$ ), высокую точность измерения параметров СВЧ поля и широкий выбор вариантов СВЧ схем, позволяющих проводить измерения на образцах любой формы и размеров.

Вместе с тем, обзор научных статей показывает, что в литературе нет сообщений об определении связанной воды СВЧ методами.

Целью настоящей работы является разработка методики и технологии определения содержания связанной воды в цилиндрических образцах керна диаметром и высотой 0,03 м по результатам измерения их диэлектрических

характеристик на СВЧ и проверка разработанной методики на коллекции образцов различного состава с известными значениями коэффициентов пористости  $K_{II}$  и остаточной воды  $K_{ОВ}$ .

### **Особенности определения содержания связанной воды на СВЧ**

Модель геологической породы можно представить в виде смеси нескольких компонент минералов, пластовой воды, нефти и газа. Каждый из перечисленных компонент обладает определенными физико-химическими свойствами. В настоящее время известно более 80 физических величин, характеризующих свойства пород, объединенных в 11 групп [1].

Электрические свойства геологических пород объединены в 5 группу и их изучение занимает важное место при проведении исследований в петрофизической лаборатории. В группу электрических свойств входят электропроводность, диффузионно-адсорбционная, окислительно-восстановительная, фильтрационная и электрохимическая активности и диэлектрическая проницаемость.

В литературе имеется ряд работ [2,3], в которых делаются попытки предсказать диэлектрические характеристики многокомпонентной модели геологической породы. В частности, в [3] рассматриваются эмпирические формулы, связывающие комплексную диэлектрическую проницаемость смеси с пористостью, нефте- и водонасыщенностью, а также с диэлектрической проницаемостью отдельных компонент. Наличие такой связи подтверждается экспериментально. При этом наибольшие успехи достигнуты в создании двух- и трехкомпонентных моделей пласта, включающего в себя жидкий (нефть или вода) и один твердый (геологическая порода) или два жидких (нефть и вода) и один твердый компонент смеси. Это модели, описываемые формулами Клаузиуса-Моссотти, Бруггемана-Ханай-Чена [3], Духина-Шилова и Оделевского [2].

Как показали экспериментальные исследования, вода, благодаря своей высокой относительной диэлектрической проницаемости, наиболее сильно влияет на общие диэлектрические свойства геологического пласта по сравнению с другими его компонентами. В связи с этим целесообразно более подробно рассмотреть строение молекулы воды, классификацию ее видов и диэлектрические характеристики.

### Строение молекулы воды

Своеобразие физических свойств жидкой воды и льда обусловлено прежде всего структурой самих молекул воды. По современным представлениям три ядра молекулы  $\text{H}_2\text{O}$  образуют равнобедренный треугольник с протонами в основании и атомом кислорода в вершине. Длина связи ОН равна  $0.09572+0.00003$  нм, а угол связи Н-О-Н равен  $104.52^\circ+0.05^\circ$  [4]. Электронная конфигурация молекулы воды имеет вид тетраэдра, две вершины которого расположены на протонах, две другие - в центре облаков неподеленных пар  $2S_z^2$  и  $2P_z^2$  электронов. Таким образом, молекула воды имеет четыре полюса электрических зарядов - два положительных и два отрицательных. Смещение зарядов приводит к появлению у молекулы значительного дипольного момента -  $1.84 \pm 0.02$  Д. Особые свойства воды связаны также со способностью ее молекул участвовать в четырех водородных связях: в двух за счет своих протонов и в двух за счет неподеленных пар атомов кислорода. Различия параметров молекул  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{D}_2\text{O}$  (длины связей и углы связей) не превышают указанной выше точности определения этих параметров [4].

В 1936 г была впервые высказана гипотеза, что в зависимости от ориентации ядерных спинов двух протонов, входящих в состав молекулы воды, по аналогии с орто - и пара-модификациями водорода, может существовать две модификации молекул воды: орто - (спины протонов параллельны) и пара - (спины протонов антипараллельны). Поскольку величина ядерных магнитных спиновых моментов в 1836 раз меньше электронных, то ими обычно пренебрегают при теоретических расчетах водородных связей и свойств водных систем. Между тем, рядом авторов экспериментально установлено, что вероятности образования димерных молекул и кластеров зависят от вращательных состояний молекул воды. Например, в состав димера вода - углекислый газ преимущественно входят молекулы пара - воды  $\text{H}_2\text{O}$  (или молекулы орто - воды  $\text{D}_2\text{O}$ ), таким образом появилась возможность разделения молекул воды по спин-модификациям. В статически равновесной фазе воды содержится 1/4 часть пара - и 3/4 орто-воды  $\text{H}_2\text{O}$ , а в воде  $\text{D}_2\text{O}$  1/3 часть пара - и 2/3 - орто-воды.

### Диэлектрические свойства дистиллированной воды.

Молекула воды имеет постоянный дипольный момент, то есть вода относится к классу полярных диэлектриков. В общем случае комплексная амплитуда вектора поляризации диэлектрика  $\vec{P}$  связана с комплексной амплитудой усредненного электрического поля  $\vec{E}$ , в который помещается диэлектрик, следующим соотношением:  $\vec{P} = [(\varepsilon_k - 1)/4\pi] \vec{E}$ , где комплексная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_k = \varepsilon' - j\varepsilon''$  в общем случае тензор и обладает частотной и пространственной дисперсией [5].

Известно, что электромагнитные свойства воды определяются проводимостью, плотностью, температурой и являются частотнозависимыми. В переменных электрических полях вплоть до области сверхвысоких частот поляризация молекул воды обуславливается, по меньшей мере, тремя механизмами: электронной поляризацией, то есть смещением электронов относительно положительных ионов, ионной поляризацией, то есть смещением ионов в молекуле относительно друг друга и ориентационной поляризацией или релаксацией, которая определяется вращением полярных молекул. Электронная поляризация происходит за время порядка  $10^{-15}$  с и диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon'$  за счет этого механизма вплоть до области сверхвысоких частот примерно равняется двум. Электронная поляризация не зависит от температуры.

Характерные времена ионной поляризации —  $10^{-13}$  -  $10^{-12}$  с, а соответствующее значение относительной диэлектрической проницаемости находится в пределах 4-15. Ионная поляризация также не зависит от температуры.

Ориентационная поляризация характеризуется достаточно большими временами релаксации, которые сильно зависят от температуры, поскольку конкурирующие энергии теплового движения молекул и взаимодействия полярных молекул с приложенным внешним электрическим полем являются соизмеримыми. Компоненты относительной диэлектрической проницаемости «идеальной воды» (проводимость которой для постоянного тока равна нулю) хорошо описываются формулами Дебая, содержащими одно значение времени релаксации:

$$\varepsilon' = \varepsilon_T + (\varepsilon_0 - \varepsilon_T) / (1 + \omega^2 \tau^2)$$

$$\varepsilon'' = \omega \tau (\varepsilon_0 - \varepsilon_T) / (1 + \omega^2 \tau^2),$$

где  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_T$  - статическая и оптическая диэлектрические проницаемости соответственно,  $\tau$  - время релаксации молекул. Время релаксации,  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon_T$  непостоянны с изменением температуры.

### Виды воды

Содержание воды в горных породах определяется их влажностью. Способность же пород удерживать то или иное количество воды называется влагоемкостью. Полная влагоемкость - свойство породы удерживать разный максимально возможный объем  $V_B$  воды на определенный объем  $V_C$  сухой породы. При полной и других видах влагоемкости на границах фаз породы протекают электрохимические реакции, и по обе их стороны создается двойной электрический слой (ДЭС) - особое распределение электрических зарядов в приграничных областях. ДЭС бывает трех видов: ионный, адсорбционный и ориентационный. Ионный создается за счет остаточных электрических сил на поверхности твердого компонента пород. Адсорбционный возникает в результате избирательной адсорбции ионов индифферентного электролита на незаряженной поверхности твердой фазы. Ориентационный ДЭС формируется из дипольных молекул воды. Часть из них ориентируется и удерживается в поровом пространстве около положительных и отрицательных зарядов на поверхности твердой фазы пород, образуя слой прочно связанной воды. Поле этого слоя и остаточные электростатические силы ориентируют дополнительные количества воды, которые создают рыхлосвязанный ее слой. К рыхлосвязанной воде относят также воду, ориентированную у ионов диффузной части ДЭС. Эти оба слоя образуют двойной электрический слой ориентационного вида - связанную воду. Свободная вода - это жидкость в центральных участках пор [1]. В горных породах кроме свободной и адсорбционной воды иногда содержится вода кристаллизационная, и при нагревании некоторых из них возникает вода конституционная. Эти воды являются водами химически связанными.

Кристаллизационная вода входит в кристаллическую решетку многих минералов. Конституционная образуется при нагревании ряда минералов, чаще всего содержащих гидроксильные ионы. Поэтому она называется также гидроксильной. В противоположность свободной, адсорбционной и гидроксильной водам (водам набухания), которые покидают минералы, не разрушая их структуры,

удаление и синтез химически связанной воды, как правило, возможен только при более высоких температурах. При этом разрушается их кристаллическая решетка. Кристаллизационная вода, находящаяся в виде молекул  $H_2O$ , обычно удаляется при нагревании до 300 °С. Вода конституционная образуется из входящих в кристаллическую решетку минералов ионов  $OH^-$ ,  $H^+$  и иона оксония  $H_3O^+$ . Образование такой воды при нагревании пород обнаруживается химическими анализами. Эти минералы классифицируются как основные соли слабых оснований и основания, если имеют в своем составе ион  $OH^-$ , в данном случае вода из минералов удаляется при  $t = 300 - 1300$  °С. Кроме названных, имеются еще воды конституционно - кристаллизационные. Они возникают из солей иона оксония при нагревании минералов до температуры 300 °С. Итак, воду химически связанную с веществом, в которое она входит, называют конституционной. Молекулы  $H_2O$  образуются лишь в момент разложения вещества, например, при сильном нагревании:  $Ca(OH)_2 = CaO + H_2O$ .

Вода, входящая в ряд кристаллических веществ и различимая в этих кристаллах рентгенографически, называется кристаллизационной. Воду, поглощенную твердыми веществами, имеющими большое число пор, называют адсорбционной. Свободную воду, заполняющую тонкие каналы, называют капиллярной (гигроскопической).

### **Известные методы определения связанной воды**

Коэффициенты насыщения коллекторов связанной водой могут быть определены различными методами: сушки, капилляриметрическим, центрифугирования, испарения (капиллярной вытяжки) и др. Основным недостатком большинства этих методов является то, что они не позволяют выделить энергетически различные категории связанной воды. Исключение представляют способы, основанные на использовании методов ЯМР и термогравиметрического с применением дериватографа. В отличие от сушки образцов в термостате, эта установка позволяет получить кривые дегидратации образца, по которым можно оценить кинетику удаления и определить содержание различных типов воды при ступенчатом повышении температуры, а затем рассчитать соответствующие коэффициенты водонасыщения. В основе метода центрифугирования лежит получение значи-

тельных перепадов давления на границе двух фаз в коротких образцах. Гравитационный потенциал, развиваемый при центрифугировании, перемещает жидкость в образце и изменяется от нуля на условно принятом верхнем торце образца до максимума на нижнем торце образца.

Часто основной задачей исследования систем является не столько выделение разнообразных видов связанной воды, сколько разграничение воды, заполняющей поры, на свободную и связанную воду адсорбционного слоя [6]. К таким методам относится метод сушки при постоянной температуре, предложенный в 1951 г. в США Мессером. Особенность метода - граница между свободной и связанной водой определяется непосредственно по перегибу кривых сушки образцов без каких бы то ни было дополнительных построений. В точке перегиба интенсивности сушки влагосодержание называется максимальной гигроскопичностью [7].

В 1964 г. Шишигин и др. предложили метод электропроводности для определения той же категории связанной воды. Метод основан на измерении удельной электропроводности при различном заполнении пор. Полезные сведения о механизме связывания воды может дать исследование дифференциальных теплот адсорбции - того самого параметра, который непосредственно определяется энергией связи адсорбируемой молекулы [6].

### **Диэлектрические свойства пород-коллекторов**

В арсенале современных научных исследований диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_k$  используется как средство изучения свойств и состава сложных сред и многокомпонентных смесей. Наиболее полное представление о диэлектрических свойствах можно получить из измерений комплексной диэлектрической проницаемости. Согласно электромагнитной теории комплексная диэлектрическая проницаемость непосредственно влияет на электромагнитное поле в пласте. Из определения  $\varepsilon_k$  видно, что  $\varepsilon_{II} = \sigma/\omega$  доминирует на низких частотах. Вследствие этого, с помощью низкочастотных зондов можно точно измерять проводимость геологического пласта. Таковыми являются зонды электрического и индукционного методов. Однако интерпретация результатов измерений по методу сопротивлений или индукционному затруднена в тех случаях, когда изменяется или неизвестно заранее удельное сопротивление пластовой воды, состоящей, напри-



мер, из воды, пара или вытесняющей жидкости. Таким образом, из-за большой степени влияния минерализации пластовой воды на величину проводимости пласта получить достоверные данные о водо- или нефтенасыщенности породы в этом случае затруднительно.

С другой стороны, на очень высоких или сверхвысоких частотах становится существенным значение вещественной части  $\varepsilon_k$ , т.е.  $\varepsilon_k \approx \varepsilon^I$ . Значение  $\varepsilon^I$  находится между  $40 \varepsilon_0$  и  $80 \varepsilon_0$  для воды и между  $3 \varepsilon_0$  и  $\varepsilon_0$  для нефти и газа. И, что очень важно,  $\varepsilon^I$  не столь чувствительна к минерализации пластовой воды, как проводимость, определяемая по методу сопротивлений [2]. Вместе с тем установлено, что  $\varepsilon^I$  скелета геологических пород составляет от 3 до  $6 \varepsilon_0$  [2]. Вследствие этого определение диэлектрической проницаемости на ВЧ и СВЧ представляет интерес как метод оценки пласта, особенно его водонасыщенности там, где традиционные электрические методы бессильны или ненадежны.

Таким образом, керн имеет диэлектрическую проницаемость, равную приблизительно 6, тогда как свободная вода имеет диэлектрическую постоянную, приблизительно равную 80. Пусть вода в порах горной породы рассматривается как состоящая из 2-х фаз - общего объема поровой воды и воды, связанной с поверхностью горной породы. Тогда уровень водонасыщенности  $K_B^0$ , при котором диэлектрическая постоянная становится менее чувствительной к водонасыщенности, служит признаком количества связанной воды в горной породе. Тот факт, что  $K_B^0$  изменяется от образца к образцу, в [2] объясняется изменением количества связанной воды в разных породах. Таким образом, авторы [2] предвидели, что если этот подход к объяснению полученных результатов является верным, то площадь внутренней поверхности порового пространства, которая определяет процент содержания связанной воды в горной породе, будет управлять положением точки  $K_B^0$  на графике  $\varepsilon = \phi(K_B^0)$ . Для этого была измерена площадь поверхности пор и обнаружена хорошая корреляция с величиной  $K_B^0$ , а именно: величина  $K_B^0$  более конкретно связана с отношением площади поверхности  $S_{II}$  к объему порового пространства  $V_{II}$  (ход кривых в координатах  $K_B, \varepsilon$  соответствовал ходу кривых в координатах  $K_B, S_{II}/V_{II}$ ) - образцы с большим

отношением площади к объему содержат больший процент связанной воды в порах и это отражается на положении  $K_B^0$ .

Анализ содержания опубликованных работ по измерению диэлектрических свойств пород-коллекторов показывает, что прямых аналогов решения задачи определения связанной воды, стоящей перед нами, в литературе нет.

Таким образом, в работе проведено технико - методическое обоснование возможности оценки содержания связанной воды в цилиндрических образцах керна диаметром и высотой 0.03 м методами СВЧ, по результатам которого создана экспериментальная установка и получены предварительные результаты обследования ряда конкретных образцов.

### **Методы определения диэлектрической проницаемости на СВЧ**

Современные СВЧ методы определения диэлектрических свойств различных физических сред описаны в монографиях [8, 9] и в ряде научных статей [10, 11]. Для обоснования выбора методики измерения диэлектрических параметров образцов керна в СВЧ диапазоне длин волн кратко охарактеризуем основные методы определения диэлектрической проницаемости в этой области спектра электромагнитных колебаний.

В соответствии с принятой классификацией СВЧ методы измерений делятся на волноводные, резонансные и квазиоптические (в свободном пространстве). Дадим краткое описание основных особенностей каждого из методов с указанием их преимуществ и недостатков.

При использовании волноводных методов образец исследуемого материала располагается внутри коаксиального или прямоугольного отрезка волновода. При этом форма образца должна точно соответствовать профилю волновода. Для измерений в коаксиальном волноводе требуются образцы цилиндрической формы со сквозным отверстием в центре. Для прямоугольного волновода образцы изготавливаются в форме параллелепипеда.

В зависимости от того, параметры какой из волн отраженной или прошедшей определяются, различают измерительные схемы «на отражение» и «на проход». В первой образец располагается вплотную к короткозамкнутому концу отрезка волновода. Во время измерений электромагнитная волна заданной частоты,

распространяясь по волноводу, достигает образца, частично отражается и частично поглощается в нем. Фаза и амплитуда отраженной волны зависит от комплексной диэлектрической постоянной образца. Отраженная волна взаимодействует с падающей, в результате чего образуется интерференционная картина, называемая стоячей волной. Картина стоячей волны регистрируется электрическим зондом, перемещающимся в щели, прорезанной вдоль короткозамкнутого отрезка волновода. При этом непосредственно измеряемыми величинами являются коэффициент бегущей волны и положение максимумов и минимумов стоячей волны.

В схемах «на проход» образец располагается в центре отрезка волновода. В процессе измерений регистрируется амплитуда и фаза как отраженной, так и прошедшей волн, что позволяет определить параметры матрицы рассеяния и рассчитать величину комплексной диэлектрической проницаемости материала образца [8]. Преимущество схем «на проход» заключается в том, что не требуется прорезать щель вдоль отрезка волновода для перемещения измерительного зонда.

Недостатком волноводного метода, особенно его коаксиального варианта, является то, что образец должен быть изготовлен в точном соответствии с размерами волновода.

При использовании резонансных методов исследуемый образец размещается в СВЧ резонаторе. Резонатор представляет собой объем, полностью закрытый металлическими стенками, содержащими два малых отверстия связи, через одно из которых происходит возбуждение электромагнитных полей в резонаторе. При совпадении частоты излучения, поступающего от генератора СВЧ в резонатор, с собственными резонансными частотами внутри него устанавливаются и обнаруживаются сильные электромагнитные поля. Зависимость амплитуды электромагнитного поля от частоты падающего излучения характеризует резонансную кривую резонатора. Эта кривая имеет максимумы на собственных резонансных частотах резонатора. При измерениях резонансная кривая регистрируется сначала без образца, а затем с образцом. При наличии образца наблюдается смещение максимумов резонансной кривой в сторону более низких частот и изменение формы резонансной кривой. Она становится шире и ниже по сравнению с резонансной кривой пустого резонатора. Смещение резонансной частоты и расширение резонансной кривой, вызванные присутствием образца, используются для расчета

его комплексной диэлектрической проницаемости [8]. Наиболее точным резонансным методом в области СВЧ является метод, при котором резонатор полностью заполняется исследуемым материалом. Вместе с тем, возможны измерения для образцов в форме цилиндров и дисков. Различные резонансные методы имеют то преимущество перед волноводными, что требуют меньшей точности при механической обработке образцов. Однако проводимость образцов должна быть настолько малой, чтобы диэлектрические потери были небольшими. Другим недостатком резонансного метода является то, что измерения могут быть проведены только на одной фиксированной частоте, определяемой размерами СВЧ резонатора.

При определении комплексной диэлектрической проницаемости квазиоптическим методом образец располагается в свободном пространстве между излучающей и приемной антеннами. В диапазоне СВЧ обычно используются антенны в форме рупоров и диэлектрических стержней. В процессе измерений регистрируются такие характеристики распространения электромагнитных волн, как затухание и фаза волны. Основным преимуществом квазиоптических методов перед волноводными и резонансными является то, что они относятся к числу неразрушающих бесконтактных методов измерений. Кроме того, при использовании этих методов не накладывается жестких требований на размеры и точность механической обработки поверхности образцов.

Сравнение различных методов определения комплексной диэлектрической проницаемости показывает, что для оценки водонасыщенности цилиндрических образцов керна большого диаметра и длины предпочтительными оказываются квазиоптические методы. При этом наибольший интерес представляет метод распространения электромагнитной волны, в котором непосредственно регистрируемыми параметрами являются затухание  $\alpha$  и фаза волны  $\beta$ .

### **Вывод основных соотношений**

С феноменологической точки зрения электрические свойства любого вещества могут быть охарактеризованы одной из нескольких пар значений величин, принятых за основные в той или иной формальной трактовке [12]. Так, например, в уравнения Максвелла входят диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  и

проводимость  $\sigma$ . В другом варианте формальной трактовки свойств диэлектрика в электромагнитном поле вводится комплексная диэлектрическая проницаемость:

$$\varepsilon_k = \varepsilon' - j \varepsilon''.$$

Из решения уравнений Максвелла следует, что, определив экспериментально одну из двух пар величин ( $\varepsilon, \sigma$ ) или ( $\varepsilon', \varepsilon''$ ), можно вычислить другую пару величин, характеризующих диэлектрик.

Введение комплексной диэлектрической проницаемости позволяет весьма просто учитывать, как диэлектрические, так и проводящие свойства данного вещества. Значение вещественной части позволяет судить об интенсивности процесса поляризации, в то время как мнимая часть характеризует плотность токов проводимости.

Обоснуем выбор измеряемого параметра. Для этого рассмотрим плоскую монохроматическую волну, распространяющуюся вдоль оси  $Z$ :

$$\vec{E}(z, t) = \vec{e}_0 E_0 \cos(\omega t + \beta z).$$

Аргумент косинуса, называемый обычно фазой волны, является функцией времени  $t$  и пространственной координаты  $z$ . Число  $\beta = 2\pi/\lambda$  (где  $\lambda$  - длина волны) носит название постоянной распространения волны. Иногда это число называется фазовой постоянной или волновым числом. Введем комплексные амплитуды плоских волн. Тогда комплексная амплитуда для волны, распространяющейся в положительном направлении оси  $Z$ , будет иметь вид:

$$\vec{E}_{K+} = \vec{E}_0 e^{-j\beta z},$$

а для волны, идущей в противоположном направлении

$$\vec{E}_{K-} = \vec{E}_0 e^{j\beta z}.$$

Распространение волны в любой реальной среде неизбежно сопровождается уменьшением ее амплитуды за счет тепловых потерь. Закон затухания, очевидно, будет выглядеть следующим образом:

$$E_0(z) \propto e^{-\alpha z},$$

где  $\alpha$  - постоянная затухания волны. Величины  $\alpha$  и  $\beta$  можно объединить, введя комплексную постоянную распространения  $\gamma$ , т.е.

$$\gamma = \beta + j\alpha.$$

Таким образом, вещественная часть  $\gamma$  определяет закон изменения фазы в распространяющейся волне, в то время как мнимая часть характеризует затуха-

ние. Далее найдем связь фазовой скорости с постоянной  $\beta$ . Поскольку постоянная распространения комплексная величина, то в общем случае, когда  $E_0$  тоже комплексна, имеем

$$\vec{E}_{Kz} = \vec{E}_{K0} e^{-\alpha z} e^{j(\beta z - \omega t)}, \text{ где } \vec{E}_{K0} = \vec{E}_0 e^{j\theta}. \text{ Тогда } \vec{E}_{Kz} = \vec{E}_{K0} e^{j(\beta z - \omega t + \theta)},$$

где  $E_0, \alpha, \beta, \theta$  - действительные числа. Отсюда можно получить выражение для фазовой скорости в виде:  $v = \omega / \beta$ .

Действительно, так как  $v = dz / dt$  представляет скорость, с которой движется плоскость постоянной фазы

$$\varphi = \beta z - \omega t + \theta = const, \text{ то } d\varphi = \beta dz - \omega dt = 0, \text{ откуда } dz / dt = \omega / \beta.$$

Для определения степени затухания и фазовой скорости нужно вычислить  $\alpha$  и  $\beta$ .

$$\text{Из очевидного соотношения } (\beta + j\alpha)^2 = \omega^2 \epsilon_k \mu_a = \mu_a \epsilon \omega^2 + j\sigma \mu_a \omega.$$

$$\text{Получаем: } \alpha = \sigma \mu_a \omega / 2\beta, \beta^2 = \sigma^2 \mu_a^2 \omega^2 / 4\beta^2 = \mu_a \epsilon \omega^2 = 0$$

Введем обозначение  $\beta^2 = a$ , тогда

$$a^2 - \mu_a \epsilon \omega^2 a - \sigma^2 \mu_a \omega^2 / 4 = 0$$

или

$$\beta^2 = 1/2 \mu_a \epsilon \omega^2 + \sqrt{(\mu_a^2 \epsilon_2 \omega^4 + \sigma^2 \mu_a^2 \omega^2) / 4}.$$

Здесь мы оставили перед квадратным корнем знак +, так как  $\beta$  - действительное число:

$$\beta = \omega [\mu_a \epsilon / 2 (\sqrt{1 + \sigma^2 / \epsilon^2 \omega^2} + 1)]^{1/2}. \quad (1)$$

Аналогично получим выражение для  $\alpha$ :

$$\alpha = \omega [\mu_a \epsilon / 2 (\sqrt{1 + \sigma^2 / \epsilon^2 \omega^2} - 1)]^{1/2}. \quad (2)$$

Рассмотрим зависимость затухания  $\alpha$ , определяемого равенством (2), от электрических параметров среды. Выражение  $\sigma^2 / \epsilon^2 \omega^2$  представляет отношение  $(\epsilon'' / \epsilon')^2$ , т.к.  $\sigma = \omega \epsilon''$ .

Следовательно,

$$\alpha = \omega [\mu_a \epsilon' / 2 (\sqrt{1 + (\epsilon'' / \epsilon')^2} - 1)]^{1/2}, \quad (3)$$

$\beta$  можно записать аналогичным образом:

$$\beta = \omega [\mu_a \epsilon' / 2 (\sqrt{1 + (\epsilon'' / \epsilon')^2} + 1)]^{1/2} \quad (4)$$

Решив систему уравнений (3) и (4) относительно  $\varepsilon^I$  и  $\varepsilon^{II}$  получим связь вещественной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости с непосредственно измеряемыми характеристиками волны  $\alpha$  и  $\beta$  в виде:

$$\varepsilon^I = (\beta^2 - \alpha^2) / \omega^2 \mu_a, \quad (5)$$

$$\varepsilon^{II} = 2\alpha\beta / \omega^2 \mu_a. \quad (6)$$

Фазовая постоянная  $\beta$  и постоянная затухания  $\alpha$  - измеряемые параметры, и они оба нужны для определения  $\varepsilon^I$  и  $\varepsilon^{II}$ .

Коэффициент затухания  $\alpha$  можно определить по поглощению волны.

Пусть

$$\vec{E}_{K1} = \vec{E}_{K0} e^{-\alpha z_1}, \quad \vec{E}_{K2} = \vec{E}_{K0} e^{-\alpha z_2}, \quad \vec{E}_{K1} / \vec{E}_{K2} = e^{-\alpha(z_1 - z_2)}.$$

При  $(z_1 - z_2) = 1$  (единица длины) получаем  $\alpha = \ln(E_1 / E_2)$ .

Измеряется  $\alpha$  в неперах или децибелах. Например,

$$\alpha = \ln(E_1 / E_2) = \frac{1}{2} \ln(P_1 / P_2) \quad (\text{в неперах}),$$

$$\alpha = 20 \lg(E_1 / E_2) = 10 \lg(P_1 / P_2) \quad (\text{в децибелах}).$$

Здесь  $P_1, P_2$  - мощности электромагнитного излучения в точках с координатами  $z_1$  и  $z_2$ .

Анализ полученных соотношений показывает, что величины  $\varepsilon^I$  и  $\varepsilon^{II}$ , с использованием метода распространения электромагнитных волн (как и другими методами) измеряются косвенно. В данном случае в результате расчета по формулам (5) и (6). В то же время, каждый из непосредственно измеряемых параметров излучения  $\alpha$  и  $\beta$ , как это следует из соотношений (3) и (4), зависит от диэлектрических свойств исследуемого материала, а значит и от водонасыщенности образца. Именно это обстоятельство позволяет выбрать  $\alpha$  и  $\beta$  в качестве диэлектрических характеристик кернового материала при определении связанной воды в цилиндрических образцах. При этом нами было высказано предположение (которое подтвердилось впоследствии) о том, что зависимости  $\alpha = f(K_B)$  и  $\beta = \varphi(K_B)$  должны иметь особенности в области значений  $K_B$ , близких к  $K_B^0$ , определяющему содержание связанной воды в порах геологического образца породы.

### Блок-схема измерительной установки

В соответствии с выбранным методом измерения, обоснованным выше, экспериментальная установка должна обеспечивать измерение параметров  $\alpha$  и  $\beta$  электромагнитной волны диапазона СВЧ в зависимости от величины исследуемых образцов керна цилиндрической формы.

Анализ известных схем СВЧ – влагомеров [13] показал, что для реализации квазиоптического метода измерений  $\alpha$  и  $\beta$  больше всего подходят двухканальные схемы, где образец размещается между передающей и приемной антеннами. При выполнении настоящей работы нами была использована блок-схема установки, описанная в [13] и представленная на рис. 1.

Измерение зависимостей  $\alpha = f(K_B)$  и  $\beta = \varphi(K_B)$  проводилось в 3-сантиметровой области диапазона СВЧ на частоте 9 ГГц. Выбор именно этой частоты обусловлен тем, что на ней наблюдается сильное поглощение энергии СВЧ излучения в воде. Схема содержит генератор СВЧ излучения 1 (клизотрон К-54), включенный на вход двухканальной измерительной схемы, рабочий канал 2, которой содержит передающую 3 и приемную 4 антенны, между которыми располагается исследуемый образец керна 5. Измерительный канал сравнения 6 содержит последовательно соединенные измерительный 7 и компенсационный 16 фазовращатели.

Измерительная установка была собрана из стандартных СВЧ элементов 3-х сантиметрового диапазона длин волн, рассчитанных на соединение отрезками волноводов прямоугольного сечения размерами  $(23 \times 10)$  мм<sup>2</sup>. Приемная и передающая антенны были рассчитаны и изготовлены в форме рупоров (рис. 2 и 3). Ниже приводится расчет параметров рупорных антенн, позволяющих согласовать отрезки волноводов, подводящих энергию к образцу, со свободным пространством.



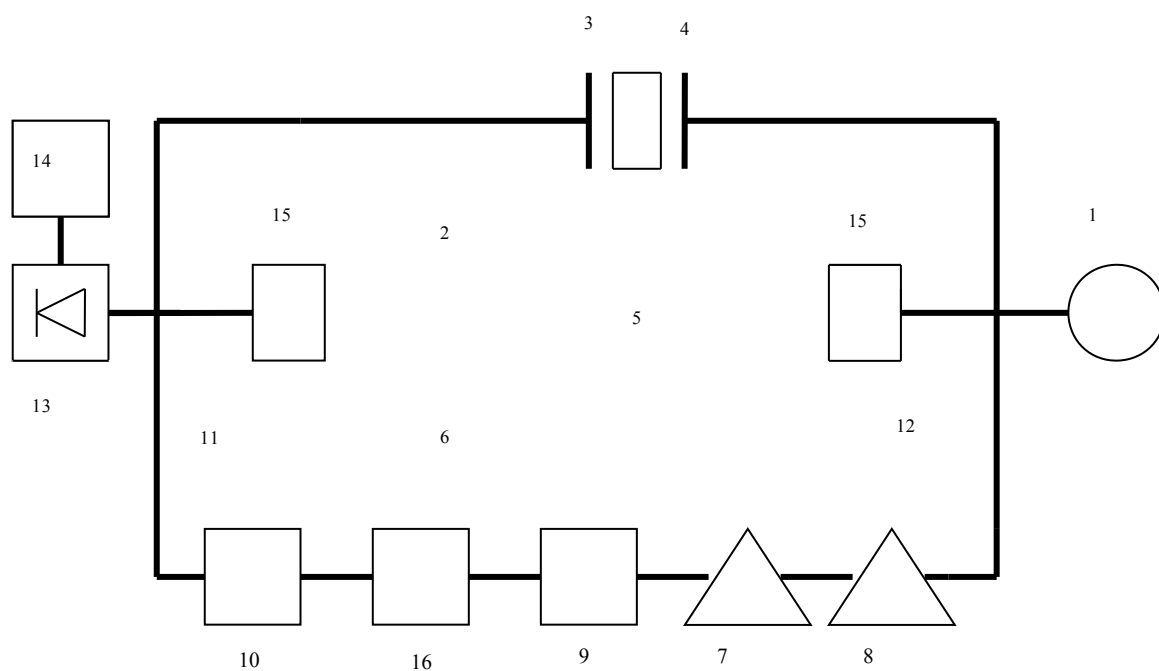


Рисунок 1. Блок- схема измерительной установки:

- 1- генератор СВЧ, 2 - рабочий канал, 3 - приемная, 4 - передающая антенны,  
 5 - исследуемый образец керна, 6 - измерительный канал,  
 7, 8 - измерительный и компенсационный аттенюаторы,  
 9, 16 - измерительный и компенсационный фазовращатели, 10 - вентиль,  
 11, 12 - двойные тройники, 13 - детекторная секция,  
 14 - регистрирующий прибор, 15 - согласованная нагрузка.

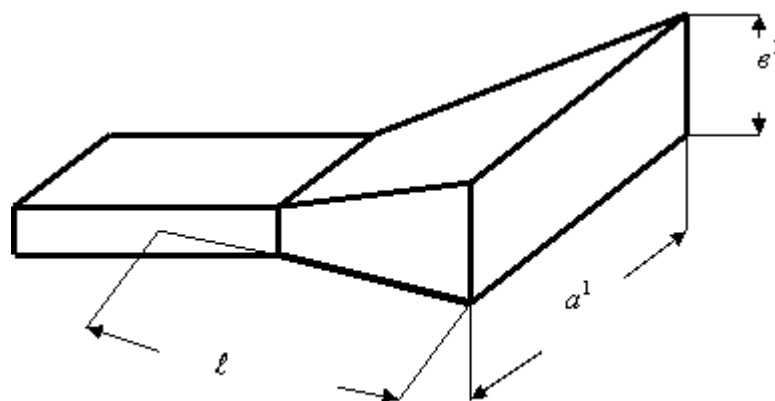


Рисунок 2. Рупор пирамидального типа

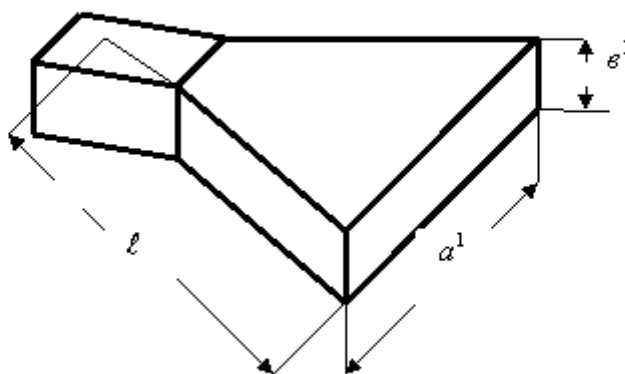


Рисунок 3. Рупор плоскостной секториальный

Отличие этих антенн заключается в том, что пирамидальные рупоры расширяются в обеих плоскостях  $E$  и  $H$  векторов, а  $H$ -секториальный рупор - только в одной плоскости  $H$ . Волны в любом рупоре несколько отличаются от волн в волноводе. В процессе движения волны в пирамидальном рупоре фронт волны преобразуется из плоского в сферический, а в секториальном - в цилиндрический. Фазовый центр полученных волн находится в точке пересечения расширяющихся сторон рупора. От этой точки отсчитывается длина рупора  $l$ . Существуют оптимальные соотношения между размерами рупора  $a^1$ ,  $b^1$  и  $l$ , причем оптимальным называется такой рупор, который при заданной длине  $l$  обладает максимальным коэффициентом направленного действия.

Для пирамидального рупора оптимальных размеров соотношения между длиной  $l$  и шириной раскрытия  $a^1$  и  $b^1$  имеют вид:

$$l = 0.3 (a^1)^2 / \lambda, \quad b^1 = 0.8 a^1, \quad \text{где } \lambda - \text{длина волны. Для } f = 9 \text{ ГГц, } a^1 = 0.13 \text{ м, } b^1 = 0.12 \text{ м, } l = 0.225 \text{ м.}$$

Для  $H$ -плоскостного секториального рупора оптимальные размеры равны:  $l = (a^1)^2 / 3.3 \lambda$ . Для  $f = 9$  ГГц,  $a^1 = 0.13 \text{ м}$ ,  $b^1 = 0.102 \text{ м}$ ,  $l = 0.155 \text{ м}$ .

КПД рупорных антенн можно считать равным 100 %, так как наблюдаемые в них потери ограничиваются внутренней поверхностью рупора и эти потери невелики. Кроме того, постепенное расширение рупора способствует согласованию волновода со свободным пространством.

Измерения осуществляются следующим образом: энергия СВЧ генератора через двойной тройник 12 проходит по каналам 2 и 6 измерительной схемы.

Разностная энергия через двойной тройник 11 поступает в детекторную секцию 13 и далее на регистрирующий прибор 14 (вольтметр В6-4). Для улучшения развязки двойного тройника 11 используется вентиль 10. Благодаря этому, сигнал из рабочего канала 2 не поступает в измерительный канал 6. Процесс измерения состоит в балансировке схемы (установления минимальных показаний регистрирующего прибора 14) с помощью компенсационных аттенюатора 8 и фазовращателя 9 судят о величинах  $\alpha$  и  $\beta$  электромагнитной волны, прошедшей через исследуемый образец. При калибровке установки по измеренным значениям  $\alpha$  и  $\beta$  определяют водонасыщенность керна.

### Методика и технология определения связанной воды

Методика определения связанной воды разрабатывалась с использованием коллекции образцов керна цилиндрической формы диаметром и высотой 0.03 м. Коллекция состояла из образцов с известными значениями коэффициента пористости  $K_{п}$  и остаточного водонасыщения  $K_{ов}$ . Значения  $K_{п}$  образцов керна варьировались от 3 до 24 %, значения  $K_{ов}$  изменялись в пределах от 88.9 до 32.6 %. Характеристики всех образцов коллекции представлены в табл.1.

Таблица 1

#### Физические свойства исследованных образцов керна

№ пп	№ образца	$K_{п}$ , %	$K_{ов}$ , %	$m_1$ , г	№ пп	№ образца	$K_{п}$ , %	$K_{ов}$ , %	$m_1$ , г
1	2329	3,4	88,9	51,86	12	9958	16,7	64,4	49,157
2	T-1	6,0	80,9	47,650	13	190-80	17,3	42,5	41,270
3	170-80	9,1	86,5	45,160	14	9943	17,8	43,1	45,370
4	10-80	12,4	79,8	43,950	15	16954	18,8	56,8	34,70
5	9941	13,6	52,7	46,360	16	17240	21	34,2	30,030
6	174-80	14,6	43	43,120	17	16956	21,4	30,9	28,956
7	9946	15,8	43,8	43,260	18	17210	21,4	27,6	34,235
8	9951	16,0	42,5	47489	19	1395B	21,6	-	40,050
9	9949	16,5	41,7	46,270	20	17215	21,8	24,8	29,738
10	9944	16,6	41,1	45,993	21	17239	22,0	35,8	34,000
11	9947	16,6	38,8	40,827	22	17219	23,9	32,6	30,520

В процессе измерений образцы насыщались дистиллированной водой и раствором  $NaCl$  различной концентрации (1.75, 8, 17.5 и 35 г/л). При изменении концентрации насыщающего раствора образцы предварительно отмывались в дистиллированной воде от 2 до 6 суток. Это делалось для того, чтобы отмыть соль от предыдущего насыщения. Качество отмывки проверялось с помощью серно-кислого серебра: если наблюдалось помутнение, то вода сливалась и процесс отмывки продолжался. После отмывки образцы заворачивались в фильтровальную бумагу и помещались в сушильный шкаф на сутки при температуре 105 °С. После сушки образцы взвешивались и размещались в эксикаторе, из которого откачивался воздух. После вакуумирования в эксикатор подавался насыщающий раствор  $NaCl$  требуемой концентрации, а образцы в растворе под вакуумом находились 24 часа. После этого в эксикатор подавался воздух и образцы были готовы к измерениям в СВЧ установке.

### Результаты лабораторных исследований

Для измерения величины затухания  $\alpha$  и фазы  $\beta$  электромагнитного излучения, прошедшего через образец, последний размещался на опорной диэлектрической площадке в центре пространства между рупорами так, что плоскость цилиндрического основания образца была строго перпендикулярна передающей и приемной плоскостям рупорных антенн.

Поскольку в процессе измерений образец многократно извлекался из СВЧ установки для контроля массы с целью определения  $K_B$ , то его положение в измерительной установке проверялось дополнительно по совмещению рисок, специально нанесенных на его боковую поверхность и опорную площадку.

Контроль массы образца осуществлялся с помощью аналитических весов, позволяющих проводить измерения с точностью до 0.001 г. Коэффициент водонасыщения вычислялся по формуле:

$$K_B = \frac{m_i - m_0}{m_1 - m_0} 100\%$$

где  $m_0$  - масса сухого образца,  $m_1$  - масса полностью насыщенного образца в воздухе,  $m_i$  - масса частично насыщенного образца. Изменение  $K_B$  образца проводилось методом капиллярной вытяжки, для чего образец заворачивался в

фильтровальную бумагу и помещался в эксикатор. Время вытяжки колебалось от 15 мин до 4-х часов и выбиралось так, чтобы изменение массы образца между двумя последовательными измерениями сопровождалось изменением  $K_B$  не более, чем на 10 % при значениях  $K_B$ , близких к 100 % и 2.5 % при значениях  $K_B \leq 10\%$ . Для более равномерного распределения влаги в образце при вытяжке он вместе с бумагой покрывался полиэтиленовой пленкой. Измерения массы образца проводились непосредственно перед измерением  $\alpha$  и  $\beta$ . При больших  $K_B$  ( $20\% \leq K_B \leq 100\%$ ) контроль массы образца осуществляется и после проведения измерений в СВЧ установке, так что в формулу для определения  $K_B$  вместо  $m_i$  подставлялось его усредненное значение за время измерения  $\alpha$  и  $\beta$ .

Как правило, одновременное измерение  $\alpha$  и  $\beta$  происходило за 2-3 минуты. Весь процесс снятия зависимостей  $\alpha = f(K_B)$  и  $\beta = \varphi(K_B)$  требовал от 3 до 5 суток.

Величины  $\alpha$  и  $\beta$  при фиксированных значениях  $K_B$  измерялись одновременно двумя способами, отличающимися выбором последовательности балансировки измерительной схемы с помощью измерительных аттенюатора и фазовращателя. В первом способе баланс рабочего и измерительного каналов при наличии образца керна достигался сначала с помощью измерительных аттенюатора, а затем – фазовращателя. Во втором способе последовательность достижения баланса была обратной.

Типичные кривые, полученные первым и вторым способами, представлены на рис. 4-6.

Из приведенных графиков видно, что при первом способе измерений наибольшей информативностью, очевидно, обладает зависимость  $\beta = \varphi(K_B)$ , содержащая либо несколько точек экстремума в виде чередующихся (в большинстве случаев - двух) максимумов и минимумов, либо точки перегиба.

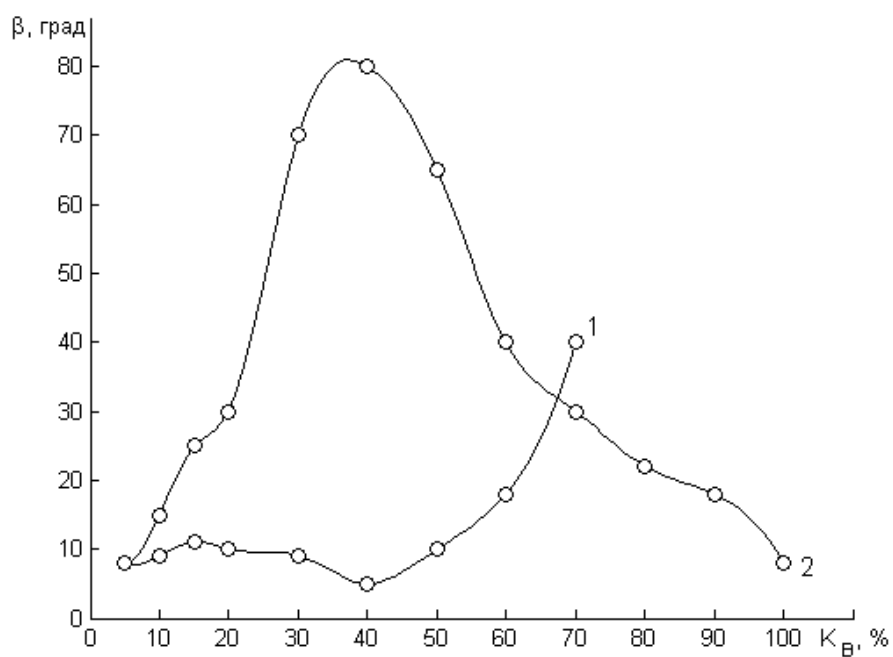
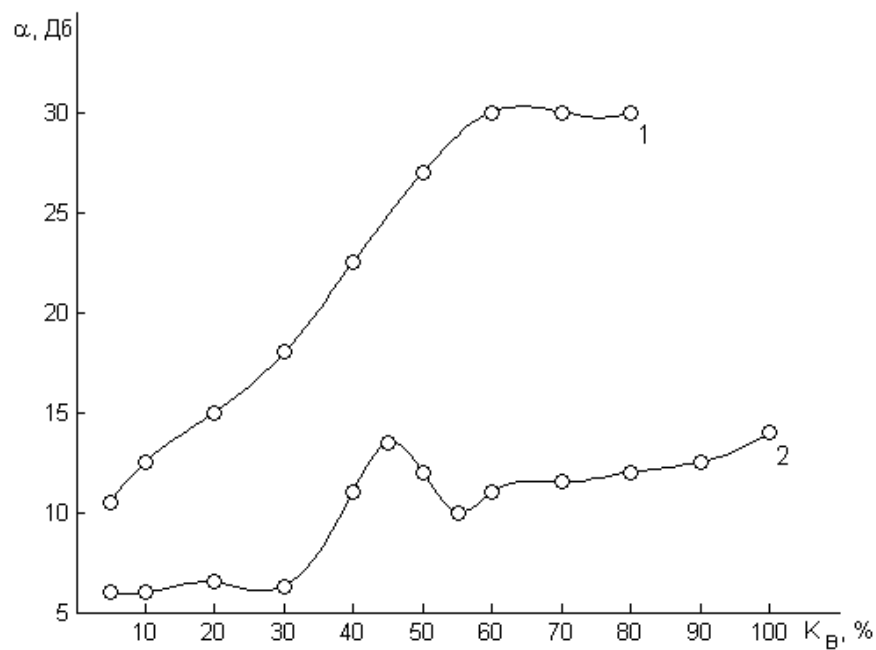


Рисунок 4. Зависимости ослабления  $\alpha$  и фазы  $\beta$  от коэффициента водонасыщения  $K_B$  при минерализации насыщающего раствора 35 г/л, измеренные первым (1) и вторым (2) способами (Образец № 9946,  $K_D=15.8\%$ )

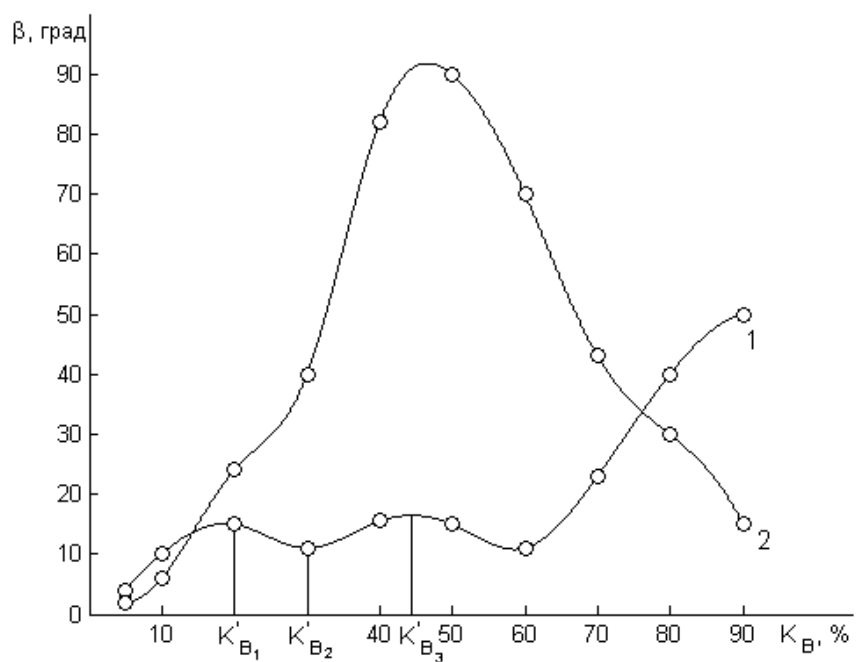
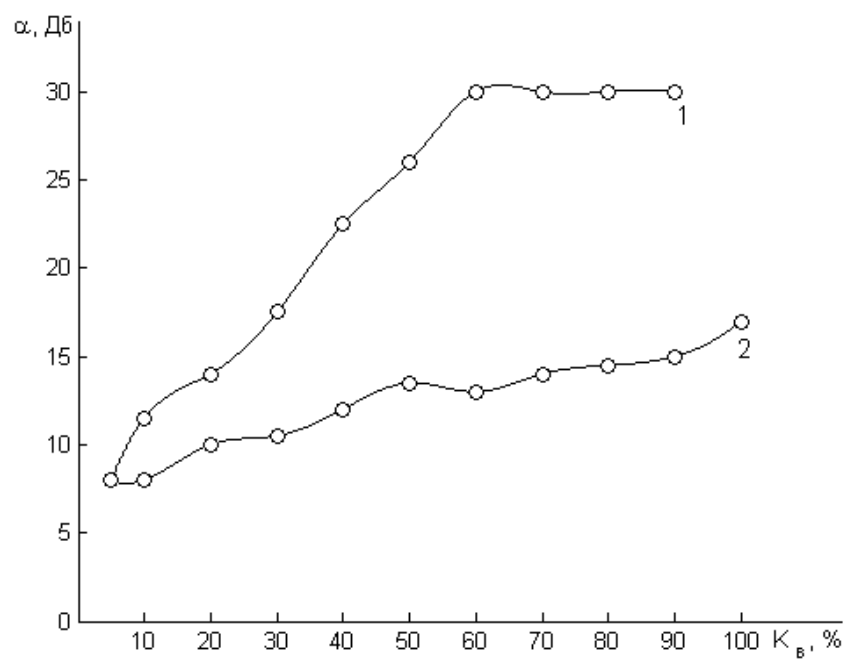


Рисунок 5. Зависимости ослабления  $\alpha$  и фазы  $\beta$  от коэффициента водонасыщения  $K_B$  при минерализации насыщающего раствора 35 г/л, измеренные первым (1) и вторым (2) способами (Образец № 9944,  $K_{II}=16.6\%$ )

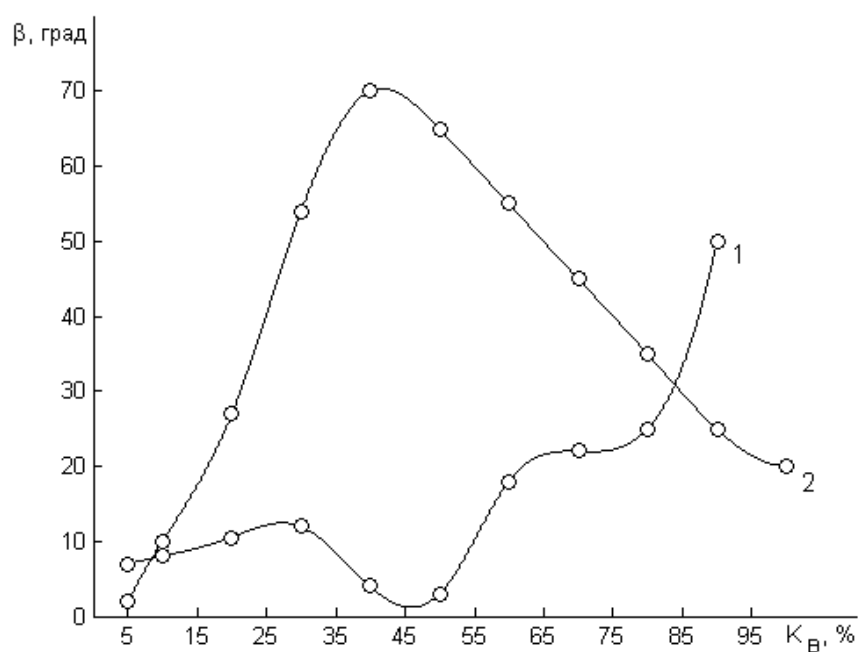
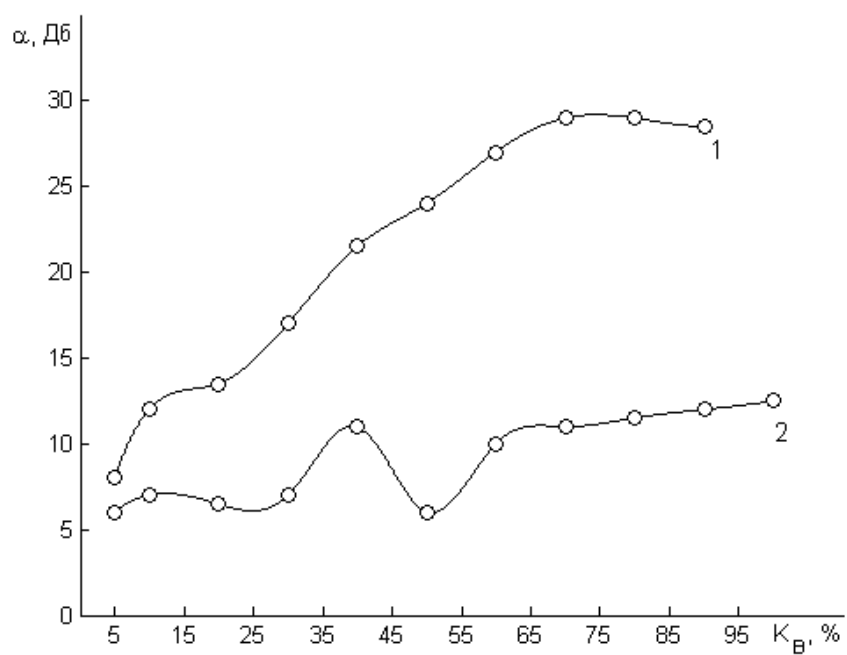


Рисунок 6. Зависимости ослабления  $\alpha$  и фазы  $\beta$  от коэффициента водонасыщения  $K_B$  при минерализации насыщающего раствора 35 г/л, измеренные первым (1) и вторым (2) способами (Образец № 9943,  $K_H = 17.8 \%$ ).



Анализ положения точек экстремума и перегиба на оси значений  $K_B$  показывает, что с увеличением концентрации насыщающего раствора происходит их смещение в сторону меньших значений  $K_B$ . Этот факт косвенно указывает на то, что обнаруженные особенности зависимости  $\beta = \varphi(K_B)$  могут быть использованы для определения связанной воды в образцах керна, т.к. известно [2], что толщина пленки связанной воды, ассоциирующейся с ДЭС, возрастает с уменьшением минерализации насыщающего раствора. Поэтому объемы связанной воды в одном и том же поровом пространстве породы различны при насыщении ее минерализованной водой с разной концентрацией соли. Кроме того, из сравнения значений  $K_B$ , соответствующих точкам экстремума на графиках  $\beta = \varphi(K_B)$ , видно, что они не превышают значений  $K_{OB}$ , отражающих содержание остаточной воды в образцах керна согласно паспортным данным. Положения экстремальных точек для исследованных образцов коллекции при различных концентрациях насыщающего раствора  $NaCl$  с погрешностью 10 % совпадают с измеренными значениями связанной воды другими методами.

При втором способе измерений обе зависимости  $\alpha = f(K_B)$  и  $\beta = \varphi(K_B)$  обладают одинаковой информативностью, т.к. особые точки (точки экстремумов) на обоих графиках наблюдаются при одном и том же значении  $K_B^1$ . Сравнение этих значений  $K_B^1$  с  $K_{OB}$ , определенными по двум другим известным методикам (Закса и центрифугирования) показывает, что измеренные нами вторым способом величины  $K_B^1$  не превышают и даже меньше соответствующих значений  $K_{OB}$  для образцов типа МЗ.

На основании экспериментальных данных, полученных при измерении затухания и фазы электромагнитной волны, прошедшей через образец, могут быть разработаны инженерные методики определения общего количества связанной воды или отдельных ее видов в цилиндрических образцах керна диаметром и высотой 0.03 м (в принципе, методика может быть адаптирована на образцы любой формы и размеров).

В том случае, когда требуется определить общее содержание связанной воды, методика измерений заключается в следующем: вторым из описанных выше способов измеряют фазовую характеристику образца  $\beta = \varphi(K_B)$ , изменяя

значения  $K_B$  от 100 до 2 %. В координатах  $K_B$ ,  $\beta$  строят ее график, из которого определяют  $K_B^1$ , соответствующее положению максимума кривой  $\beta = \varphi(K_B)$ . Это значение  $K_B^1$  определяет общее количество связанной воды в исследуемом образце.

В том случае, когда требуется определить не только общее количество связанной воды, но и отдельные ее виды, то следует применить другую методику, сущность которой состоит в том, что измерения зависимости  $\beta = \varphi(K_B)$  осуществляются первым способом. На графике зависимости  $\beta = \varphi(K_B)$  определяются значения  $K_B$ , соответствующие положениям первого и второго максимумов:  $K_{B1}$  и  $K_{B3}$ , а также положение первого минимума  $K_{B2}$ . При этом значение  $K_{B3}$  характеризует суммарное содержание трех видов связанной воды: прочно, слабо- и рыхлосвязанной,  $K_{B2}$  характеризует содержание прочно- и слабосвязанной воды,  $K_{B1}$  - содержание прочносвязанной воды. Вычисляя разность  $(K_{B3} - K_{B2})$  и  $(K_{B2} - K_{B1})$  определяют содержание рыхлосвязанной воды и слабосвязанной воды. Следует отметить, что измерения фазовой диэлектрической характеристики могут осуществляться обоими способами одновременно (при этом удваивается число экспериментальных точек), а полученные результаты будут дополнять и контролировать друг друга.

Предложенные методики были апробированы на коллекции образцов, для которой коэффициенты остаточной воды были определены в Центральной лаборатории г. Тюмени двумя способами: центрифугирования и по Заксу. Для исследованной коллекции образцов значения  $K_{B3}$ , характеризующие общее количество связанной воды, колеблются от 22 до 45 %.

Таким образом, результаты измерения связанной воды в ядрах на СВЧ согласуются с данными, опубликованными в литературе, а также с результатами других независимых измерений.

## Выводы

1. В результате проведенных исследований экспериментально установлено, что затухание  $\alpha$  и фаза  $\beta$  сигнала СВЧ, прошедшего через образец, так же, как и комплексная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_k$ , рассчитанная на их основе, зависят от диэлектрических свойств вещества и могут быть использованы для определения содержания связанной воды в керновом материале.

2. Показано, что зависимость фазы  $\beta$  от величины коэффициента водонасыщения  $K_B$  содержит больше информации о диэлектрических свойствах вещества, чем затухание  $\alpha$ , т.к. графики  $\beta = \varphi(K_B)$  имеют особые точки (перегиба, экстремума).

3. При проведении калибровочных измерений с использованием коллекции образцов с известными петрофизическими параметрами обнаружена связь между положением особых точек графика  $\beta = \varphi(K_B)$  и содержанием связанной воды в исследуемом образце керна.

4. Показано, что двухканальная балансная схема, содержащая измерительные аттенюатор и фазовращатель, позволяют измерять зависимость  $\beta = \varphi(K_B)$  двумя способами.

5. Обнаружено, что зависимость  $\beta = \varphi(K_B)$  может быть использована как для определения общего содержания связанной воды, так и отдельных ее видов, соответствующих представлению о двойном электрическом слое.

6. Установлено, что в исследуемой коллекции образцов общее содержание связанной воды в отдельных образцах колеблется от 22 до 40 %, содержание слабо-связанной воды изменяется от 4 до 20 %, содержание рыхлосвязанной воды составляет от 4 до 12 %, содержание прочносвязанной воды варьируется от 7 до 22 %.

7. Данные по определению связанной воды в цилиндрических образцах керна диаметром и высотой 0.03 м, полученные методом СВЧ, согласуются с данными, опубликованными в литературе, а также с результатами других независимых измерений.

### Литература

1. Кобранова В.Н. Петрофизика. М. : Недра, 1986, 386 с.
2. R. Nait, A. Nur. Dependence of dielectric permittivity of core samples at water saturation // Proc. of SPNLA, twenty-fifth annual logging symposium, June, 10-13. 1984.
3. L.C. Shen, W.C. Savre, J.M. Price, K. Athavale // Dielectric properties of reservoir rocks at ultra-high frequencies // Geophysics. 1985. V. 50. No.4. P. 692-704.
4. Зацепин Г.Н. Физические свойства и структура воды. М. : изд. МГУ, 1987. 171 с.
5. Матвеев А.В. Электродинамика и теория относительности, М. : Высшая школа, 1964. 424 с.
6. Злочевская Р.И. Связанная вода в глинистых группах // сб. «Связанная вода в дисперсных системах» под ред. Киселева В.Д., Вып. 3. М. : Изд. МГУ, 1969. 286 с. С. 185-189.
7. Танкеева Л.К. Исследование связанной воды в глинистых песчаниках // сб. «Связанная вода в дисперсных системах» под ред. Киселева В.Д., Вып. 3. М. : Изд. МГУ, 1969. 286 с.
8. Бранд А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М. : Сов. радио, 1963. 403 с.
9. Фрелих Г. Теория диэлектриков. Диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери. Иностранная литература, 1980. 396 с.
10. Liang C Shen A laboratory technique for measuring dielectric properties of core samples at ultrahigh frequencies // Society of petroleum engineers journal. 1985. V25. №4. P. 502-514.
11. R.N. Raу, R.P. Wharton Measurement of core electrical parameters at ultrahigh and microwave frequencies // Journal of petroleum technology. 1982. November. P. 2689.
12. Матвеев А.В. Электродинамика и теория относительности. М. : Высшая школа, 1964. 424 с.
13. Бензарь В.К. Техника СВЧ влагометрии. Минск : Высшая школа, 1974. 223 с.