

УДК 550.8.08

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД КОВЫКТИНСКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ



RESEARCH OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF ROCKS OF KOVYKTINSKOYE GAS-CONDENSATE FIELD

Меринов Иван Андреевич
главный специалист
Управления по организации
и контролю бурения скважин
на месторождениях и ПХГ,
ООО «Газпром инвест»
Ivanmerinov@bk.ru

Шиян Станислав Иванович
кандидат технических наук,
доцент кафедры
Оборудования нефтяных
и газовых промыслов,
Кубанский государственный
технологический университет
akngs@mail.ru

Анискин Владимир Викторович
студент направления подготовки 21.03.01
«Нефтегазовое дело»
института Нефти, газа и энергетики,
Кубанский государственный
технологический университет
vladimir.aniskin1996@mail.ru

Аннотация. В статье приведено теоретическое исследование электрофизических свойств образцов кернов Ковыктинского месторождения. Описаны виды поляризации и её характеристики, рассмотрены диэлектрическая проницаемость пород-коллекторов и абсорбционная ёмкость диэлектриков, приведены эквивалентные схемы для вычисления параметров слоистого диэлектрика, а также дано определение постоянной релаксации. Приведена методика экспериментального исследования (изучение диэлектрических характеристик образцов кернов Ковыктинского месторождения в зависимости от частоты и изучение диэлектрических характеристик образцов кернов Ковыктинского месторождения в зависимости от температуры).

Ключевые слова: исследование электрофизических свойств образцов кернов; виды поляризации и её характеристики; диэлектрическая проницаемость пород-коллекторов; эквивалентные схемы для вычисления параметров слоистого диэлектрика; абсорбционная ёмкость диэлектриков; определение постоянной релаксации; изучение диэлектрических характеристик образцов кернов в зависимости от частоты и температуры.

Merinov Ivan Andreevich
Chief specialist of the office
for organization and control
of well drilling on the fields
and underground gas storages,
LLC «Gazprom invest»
Ivanmerinov@bk.ru

Shiyan Stanislav Ivanovich
Candidate of technical sciences,
Associate Professor
of Oil and gas field equipment,
Kuban state technological university
akngs@mail.ru

Aniskin Vladimir Viktorovich
Student training direction 21.03.01
«Oil and gas engineering»
Institute of Oil, Gas and Energy,
Kuban state technological University
vladimir.aniskin1996@mail.ru

Annotation. The article presents a theoretical study of the electrophysical properties of core samples from the Kovyktinskoye field. The types of polarization and its characteristics are described, the dielectric constant of reservoir rocks and the absorption capacity of dielectrics are considered, equivalent circuits for calculating the parameters of a layered dielectric are given, and the constant relaxation is determined. An experimental study technique is presented (studying the dielectric characteristics of core samples of the Kovyktinskoye field depending on the frequency and studying the dielectric characteristics of core samples of the Kovyktinskoye field depending on temperature).

Keywords: study of the electrophysical properties of core samples; types of polarization and its characteristics; dielectric constant of reservoir rocks; equivalent circuits for calculating the parameters of a layered dielectric; absorption capacity of dielectrics; determination of constant relaxation; study of dielectric characteristics of core samples depending on frequency and temperature.

Введение

В последнее время в научном мире всё большее значение имеют многочисленные теоретические и экспериментальные исследования зависимости физических свойств горных пород и пористых материалов от структуры их порового пространства.

Структурное моделирование дисперсных систем широко используется в самых различных областях знания, начиная от углублённого изучения свойств горных пород и заканчивая теорией и технологией процессов химической адсорбции.

Горные породы представляют собой, по-видимому, наиболее распространённый класс пористых тел, изучение которых имеет решающее значение для многих областей человеческой деятельности. Добыча полезных ископаемых, возведение инженерных сооружений, земледелие, ирригация – вот далеко не полный перечень технологических процессов, где поровая структура коренных горных пород и их поверхностных слоёв во многом определяет те приёмы и методы, с помощью которых добиваются успехов в развитии технического прогресса.

Основной практической задачей изучения массива горных пород является определение существующих в нём различных физических полей: электрического, напряжений и деформаций, давлений и скоростей фильтрации, насыщенности, скоростей диффузии и переноса тепла. Подобные задачи решаются с помощью известных методов математической физики, возможность использования которых в современную эпоху широкого развития электронно-вычислительной техники обуславливается лишь знанием соответствующих граничных условий и физических свойств исследуемого массива. Изучение многих из этих свойств предусматривает проведение сложных лабораторных или натуральных исследований, поэтому представляет значительный интерес разработка новых методов определения физических свойств, основанных на существовании между ними вполне определённых количественных связей. Практически все физические свойства пористой горной породы должны определяться весьма ограниченным числом факторов, к которым относятся: особенности взаимодействия фаз в системе «горная порода – насыщающие её жидкости», структура порового пространства горной породы и, наконец, свойства её минерального скелета. Если под элементами структуры порового пространства понимать пористость, удельную поверхность и геометрию пор, то основным фактором, определяющим практически все физические свойства породы, является структура порового пространства.

Сложность структуры порового пространства реальных горных пород обуславливает значительные трудности в создании универсальных моделей, которые позволили бы связать друг с другом все физические свойства породы. Однако исследования в этом направлении, продолжающиеся до последнего времени, заставляют смотреть в будущее с известной долей оптимизма.

Среди многочисленных свойств дисперсных минералов важное место занимает электроповерхностные свойства, исследование которых широко развернулось во всём мире за последние 15–20 лет. Исследование состояния вещества на поверхности твёрдого тела отражает ряд явлений, к которым относятся электрофорез, электроосмос, потенциал протекания, мембранное равновесие, суспензионный эффект, электрометрия дисперсных систем и т.д. Практическое применение этих процессов возможно на основе чётких представлений о свойствах вещества вблизи поверхности твёрдого тела.

Многочисленные эксперименты убедительно доказали, что электроповерхностные свойства минералов во многом обусловлены их кристаллическим строением, ионообменной способностью, гидрофильностью и дисперсностью.

Виды поляризации и её характеристики

В электромагнитных полях породы поляризуются, проводят электрический ток и часть энергии поля теряется – переходит в тепловую (джоулевы потери в постоянном и диэлектрические в переменном полях). Кроме того, породы поляризуются и проводят ток при продавливании через них жидкости и приведении в контакт с другими влажными породами или электролитами.

Механизм поляризации, электропроводности и потерь у вещественно-, фазово-, структурно-неоднородных пород чрезвычайно сложен, различен у ионно- и электронно-проводящих пород, зависит от частоты поля, температуры и давления.

Поляризация в электрическом поле сводится к разделению в породах носителей зарядов разного знака и появлению в любом объёме пород электрического дипольного

момента. Поле вызывает в породах ряд процессов, способствующих их определённой поляризации, которая для ионно-проводящих пород (песков, песчаников, известняков и др.) в постоянном поле объясняется процессами:

- упругого смещения (электронов, атомов, ионов);
- ориентации (дипольных, сильносвязанных молекул);
- релаксации (ориентационной дипольной и ионной тепловой);
- миграции (объёмной поляризации);
- концентрационного перераспределения;
- электроосмоса.

Электронно-ионно-проводящие породы (угли, колчеданные, железные и другие руды) поляризуются аналогично ионно-проводящим. Правда, кроме указанных выше, в данном случае на поляризацию влияют ещё электролитические процессы. Поляризация упругого смещения, релаксационная и миграционная возникают и спадают относительно быстро. Остальные виды процессов поляризации развиваются и спадают гораздо медленнее (медленные виды поляризации). В связи с этим с ростом частоты поляризующего тока наблюдается все меньше различных видов поляризации.

Поляризация смещения (упругая). Она возникает в породах, содержащих заряженные и взаимосвязанные частицы, способные смещаться относительно друг друга под действием поля. Поляризация смещения подразделяется на электронную, атомную, ионную и упругую дипольную.

Чисто электронная поляризация возможна у неполярных атомов и молекул пород (атомов аргона, гелия, ксенона, молекул азота, кислорода, водорода и других газов), минералов с валентными кристаллами из однотипных атомов (сера, алмаз, графит, селен). Электронная поляризация наряду с ионной возникает и у ионных кристаллов. При этом виде поляризации в электрическом поле E смещаются относительно ядер орбиты электронов неполярных атомов и ионов среды и в объёме ΔV возникает дипольный момент – вектор поляризации:

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum \vec{p}}{\Delta V},$$

где $\vec{p} = q \cdot \vec{l}$ – дипольный момент атома – вектор с направлением от отрицательного к положительному заряду; q – заряд электрона; l – среднее расстояние между полюсами диполя.

Электронная поляризация завершается за $10^{-14} \div 10^{-15}$ секунд при применении частот поляризующего поля от нулевых до оптических.

Атомная поляризация наблюдается у пород с валентными кристаллами из разносортных атомов. Последние связаны в молекулы силами обменного взаимодействия валентных электронов (ковалентная связь), и электроны внешних оболочек перераспределяются между атомами несимметрично, смещаясь в направлении атомов, имеющих более сильные связи; поэтому атомы приобретают заряды различной полярности. Поляризация под действием поля возникает в результате относительного смещения в молекулах заряженных атомов различного сорта.

Атомная поляризация $\vec{P}_a \ll \vec{P}_u$ устанавливается за время $10^{-11} \div 10^{-13}$ секунд, несколько большее времени становления электронной поляризации. Поляризация ионного упругого смещения предполагается у кварца, корунда, кальцита. Она возможна и в других ионных кристаллах (галит, сильвин и т.д.), кристаллическая решётка которых содержит плотноупакованные разнотипные ионы. Поляризация D в электрическом поле сводится к смещению ионов разного знака от положения их равновесия в кристаллической решётке. Она появляется за время $10^{-13} \div 10^{-14}$ секунд.

Ионная поляризация слабо зависит от частоты (до частоты инфракрасной области спектра). С ростом температуры поляризуемость увеличивается из-за ослабления упругой связи между ионами. Поляризация растёт у минералов, ионы которых имеют

большое значение отношения $\frac{a_e}{r_e^3}$ (a_e – поляризуемость молекулы ионного кристалла; r_e – радиус иона).

Поляризация упругого смещения D_y полярных молекул характерна для дипольных диэлектриков с сильносвязанными полярными молекулами, способными поворачиваться под действием поля лишь на небольшие углы.

Релаксационная (тепловая) поляризация. Она возникает у пород, содержащих слабосвязанные частицы, которые при тепловом движении могут изменять положение равновесия. Различают ориентационную дипольную, ионную тепловую и электронно-релаксационную поляризацию.

Ориентационная дипольная поляризация D_o характерна для пород, в составе которых содержатся вещества (вода, газы) с дипольными полярными относительно слабо- и упругосвязанными молекулами. Полярные молекулы с достаточной энергией теплового движения разрывают упругие связи с другими такими же молекулами и перебрасываются из одного равновесного состояния в другое. Поляризация выражается в преимущественной ориентации осей дипольных молекул по направлению поля. Тепловое молекулярное движение препятствует этому процессу, дезориентируя молекулы. Вследствие этого оси дипольных моментов до действия поля имеют любое пространственное направление, и результирующий дипольный момент породы равен нулю.

Время τ установления релаксационной поляризации (время релаксации) дипольных молекул полярных жидкостей (нефть, вода):

$$\tau = A \cdot \exp\left(\frac{U}{k \cdot T}\right),$$

где U – высота потенциального барьера, разделяющего два положения равновесия; A – постоянная величина, слабо зависящая от абсолютной температуры T ; k – постоянная Больцмана.

Породы с ориентационной поляризацией обладают электронной и нередко атомной или ионной поляризацией, связанной с их твёрдой фазой.

С ростом температуры и частоты поля ориентационная поляризация уменьшается. Она успевает развиться за $10^{-10} \div 10^{-7}$ секунд.

Поляризация D наблюдается не только у жидкой и полярной газовой фазы пород, но и у минералов с решёткой кольцевого и каркасного типа и неплотно упакованными частицами (кристаллогидраты, минералы глин, цеолиты). Все они содержат воду различного типа. Представителями этих групп минералов являются кордиерит, берилл, сподумен, мусковит, биотит, гипс, тальк и др.

Ионно-релаксационная тепловая поляризация D_i возможна у ионных кристаллов со слабосвязанными ионами, возникновение которых вызывается дефектами и особой структурой кристаллической решетки. Минералы и породы, в составе которых содержатся эти кристаллы, имеют также электронную и ионную поляризацию. Слабосвязанные ионы при тепловом движении срываются с мест их закрепления и перемещаются в кристаллах на расстояния, сравнимые с межатомными, преодолевая потенциальный барьер. Внешнее поле создаёт избыточный переброс ионов в своём направлении, что приводит к поляризации породы. Этот процесс компенсируется обратной диффузией ионов.

Время релаксации и траектории полярных молекул и слабосвязанных пород при тепловой поляризации определяются структурой и температурой пород.

Электронно-релаксационная поляризация D_e возникает из-за избыточных «дефектных» электронов или «дырок», которые активизируются тепловой энергией.

Миграционная (макроструктурная, объёмная) поляризация. Этот вид поляризации предполагается у пород, проводящие компоненты которых разделены непроводящими или воздухом. В рассматриваемом случае за короткое время положительные ионы проводящих включений перемещаются по полю, а отрицательные – в противоположном направлении и задерживаются в пределах включений у межфазной поверхности, так как второй компонент породы практически не проводит электрический ток. При этом виде поляризации возможны также миграция электронов к аноду и скопление положительных ионов на противоположном конце зерна с электронной проводимостью, включённого в непроводящую фазу.

В результате описанных процессов проводящие частицы породы поляризуются (миграционная поляризация) и приобретают дипольный момент d подобно большой молекуле. Рост поляризационного заряда заканчивается, если его поле полностью скомпенсировано приложенным полем. В установившемся режиме поле и ток в проводящих частицах отсутствуют. Миграционная поляризация завершается за время $10^{-6} \div 10^{-3}$ секунд, близкое ко времени установления ориентационной (дипольной) поляризации.

Время установления этих видов поляризации сравнимо с частотой используемых электромагнитных полей, поэтому они называются по сравнению с электронными и ионными видами медленными. Ещё более медленными являются рассматриваемые ниже виды электрохимической поляризации.

Суммарная поляризация складывается из различных видов поляризации, возможных у данного минерала или породы при определенных частоте электрического поля, температуре и давлении. Наибольших значений она достигает у электронно-ионно-проводящих и структурно-неоднородных пород в постоянном, достаточно напряжённом и длительно действующем электрическом поле, при низких температурах и давлениях. Средняя результирующая поляризация (алгебраическая сумма отдельных видов поляризации) электронно-ионно-проводящих пород.

В частности, при очень большой частоте поля, превышающей 10^{11} Гц, поляризация породы связана только с быстрыми видами поляризации (электронной, атомной и ионной), а поэтому она минимальна. При частоте поля $10^2 \div 10^{11}$ Гц возможны такие виды поляризации, как релаксационная и миграционная (объёмная), в связи с этим поляризация рассматриваемой породы возрастает. И, наконец, в постоянном длительно действующем поле могут возникать и остальные медленные виды поляризации, вследствие чего суммарная поляризация достигает максимальных значений.

Суммарная поляризация пропорциональна средней напряжённости E электрического поля, т.е.:

$$P = a_0 \cdot n \cdot E_{cp},$$

где n – число диполей в единице объёма породы; a_0 – средний условный коэффициент (поляризуемость) породы, значения которого уменьшаются с увеличением однородности породы и ростом частоты поля, температуры и давления.

Все виды поляризации, успевшие развиться за время τ обработки пород током, способствуют возникновению в них внутреннего поля, которое направлено обратно к полю приложенному. Вследствие этого напряжённость E приложенного к породе электрического поля ослабляется по сравнению с напряжённостью E среднего поля в ваку-

уме. Ослабление характеризует безразмерная величина $\varepsilon = \frac{E_{0cp}}{E_{cp}}$, названная диэлектри-

ческой проницаемостью. Она показывает, во сколько раз напряжённость электрического поля в диэлектрике (породе) ослабляется по сравнению с его напряжённостью в вакууме.

При заданном значении ε диэлектрическая проницаемость определяет поляризацию только относительно слабо проводящих сред. В хорошо проводящих веществах заряды будут перемещаться (мигрировать) до выравнивания их потенциалов, т.е. до того, как разность потенциалов U между зарядами окажется равной нулю. Это ослабляет взаимодействие зарядов и приводит к тому, что в природных проводниках и хорошо проводящих полупроводниках

$$E = \frac{U}{d} \approx 0,$$

где d – пройденный зарядом путь, а ε стремится к бесконечности.

Диэлектрическая проницаемость пород-коллекторов

Диэлектрическими потерями принято называть ту часть электрической энергии, которая переходит в тепло в диэлектрике. Потери наблюдаются как при переменном,

так и при постоянном напряжении. При постоянном токе диэлектрик характеризуется величиной удельного сопротивления, а при переменном токе величина диэлектрических потерь определяется по углу потерь δ :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (1)$$

где $\delta = \frac{\pi}{2} - \varphi$, а φ – угол сдвига фаз между током и напряжением на электродах конденсатора с диэлектриком.

Процессы, происходящие в диэлектриках под воздействием внешнего электрического поля, описываются комплексной диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'' = \varepsilon'_\infty + \frac{\varepsilon'_{\omega 0} - \varepsilon'_\infty}{1 + i\omega \cdot \tau} \quad (2)$$

где ε'_∞ – диэлектрическая проницаемость, измеренная на высокой частоте; $\varepsilon'_{\omega 0}$ – значение диэлектрической проницаемости при $\omega \rightarrow 0$; τ – время релаксации.

Из выражения (1) можно выразить величины ε' и ε'' :

$$\varepsilon' = \varepsilon'_\infty + \frac{\varepsilon'_{\omega 0} - \varepsilon'_\infty}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} \quad (3)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\varepsilon'_{\omega 0} - \varepsilon'_\infty}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} \cdot \omega \cdot \tau \quad (4)$$

Эти величины называются соответственно активная и реактивная составляющие диэлектрической проницаемости. Активная составляющая комплексной диэлектрической проницаемости ε' соответствует относительной диэлектрической проницаемости, а реактивная составляющая ε'' характеризует поглощение энергии внешнего электрического поля в веществе и называется коэффициентом диэлектрических потерь. Активная и реактивные составляющие комплексной диэлектрической составляющей зависят от частоты (рис. 1).

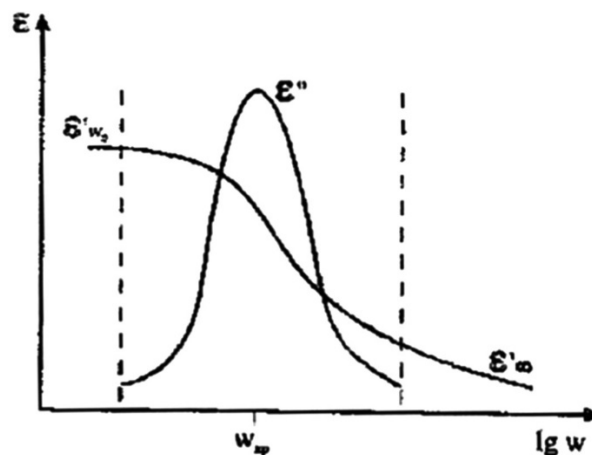


Рисунок 1 – Зависимость диэлектрической проницаемости ε от логарифма частоты $\lg w$

Потери при переменном токе больше потерь при постоянном токе, так как потери при постоянном токе определяются лишь энергией, необходимой для передвижения заряда в диэлектрике.

При переменном же токе ещё затрачивается энергия, необходимая для перераспределения поля внутри диэлектрика и перемещения ионов, необходимые для этого перераспределения.

Главным источником потерь служит рассеяние электромагнитной энергии при установлении поляризации. Поляризация – обратное смещение диэлектрических зарядов, возникающее в определённом направлении и следующее за каждым изменением приложенного напряжения.

Если скорость установления поляризации очень велика по сравнению со скоростью изменения электрического поля, то поляризация будет по фазе совпадать с полем, а поляризационный ток будет смещён по фазе относительно напряжения на 90° . Если же время поляризации очень велико по сравнению с длительностью полупериода, то поляризация не проявляется. Мерой скорости установления поляризации является время релаксации, в течение которого поляризация уменьшается в e раз. Тогда максимум диэлектрических потерь, сопровождающих поляризацию, проявляется в случае, когда время релаксации равно

$$\tau = \frac{1}{\omega}, \quad (5)$$

где ω – угловая частота переменного поля.

Эквивалентные схемы для вычисления $\operatorname{tg} \delta$ и ε слоистого диэлектрика

Для математического описания явлений в цепи переменного тока, содержащей конденсатор с диэлектрическими потерями, можно пользоваться схемой замещения, которая по своему действию аналогична заменяемому конденсатору.

Если слои диэлектрика соединены параллельно, т.е. плоскость раздела параллельна электрическому полю, то целесообразно пользоваться параллельной эквивалентной схемой для каждого из слоёв.

Построим векторную диаграмму токов и напряжений в случае параллельной схемы (рис. 2).

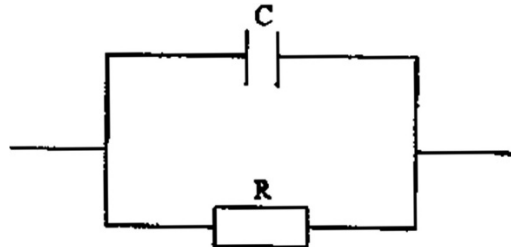


Рисунок 2 – Параллельное соединение

Падение напряжения на активном сопротивлении R и на конденсаторе R_c одинаково. Общий ток складывается из токов, проходящих через R и C :

$$U_{об} = U_c = U_r; I_{об} = I_c + I_r.$$

Напряжение на активном сопротивлении и ток, проходящий через него, находятся в одной фазе (рис. 3). В случае конденсатора ток I_c опережает напряжение U_c , на 90° .

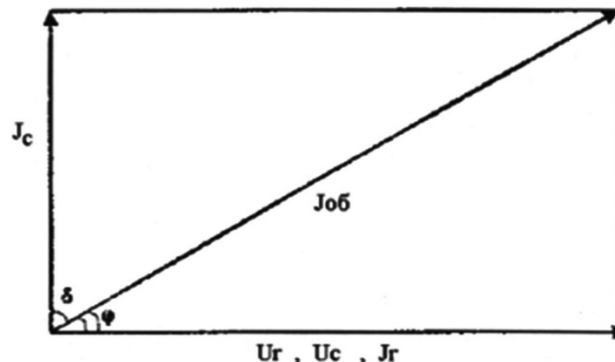


Рисунок 3 – Векторная диаграмма токов для параллельной схемы

Угол φ – сдвиг фаз между общим током $I_{об}$ и напряжением $U_{об} = U_c = U_r$. Однако в практике применяется угол, дополняющий угол φ до 90° . Этот угол называется углом диэлектрических потерь. Из диаграммы получаем:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{J_r}{J_c} = \frac{U_r \cdot R_c}{R \cdot U_c} = \frac{R_c}{R} = \frac{1}{\omega \cdot C \cdot R} = \frac{G}{\omega \cdot C}, \quad (6)$$

где G – электрическая проводимость.

При последовательном соединении слоёв (рис. 4) целесообразно пользоваться последовательной эквивалентной схемой для каждого из слоёв, так как полный ток в этом случае для обоих слоёв одинаков.

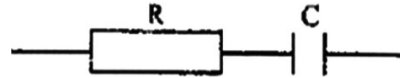


Рисунок 4 – Последовательное соединение

Ток, проходящий через активное сопротивление R и через конденсатор C , остаётся постоянным (рис. 5). Общее напряжение в цепи есть сумма напряжений на R и на C :

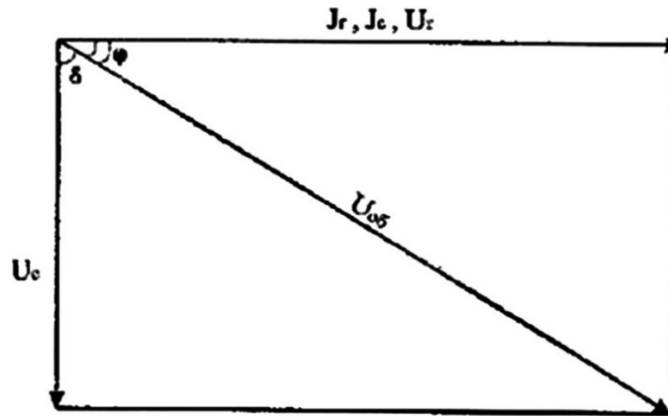


Рисунок 5 – Векторная диаграмма токов для последовательной схемы

$$I_{об} = I_r = I_c; U_{об} = U_r + U_c.$$

Из диаграммы получаем:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_r}{U_c} = \frac{R}{R_c} = R \cdot C \cdot \omega. \quad (7)$$

Абсорбционная ёмкость диэлектриков

Ток состоит из двух составляющих – сквозного тока $I_{ск}$ и абсорбционного тока $I_{аб}$. Абсорбционный ток изменяется по закону:

$$I_{аб} = I_{0аб} \cdot e^{\frac{t}{\tau}}, \quad (8)$$

где τ – постоянная времени спада тока абсорбции.

$$I_{ск} = I_0 \cdot G_{ск} \text{ и } I_{аб} = I_0 \cdot S, \quad (9)$$

где $G_{ск}$ – сквозная проводимость; S – абсорбционная проводимость при $\omega \rightarrow 0$.

Основными причинами появления абсорбционного тока является:

- медленная ориентация дипольных молекул в полярных диэлектриках;
- образование объёмных зарядов за счёт перемещения в поле слабосвязанных зарядов;
- миграционная и межслоевая миграция в неоднородных диэлектриках и диэлектриках, содержащих проводящие включения.

В неоднородном диэлектрике перераспределения зарядов не будет, когда произведение диэлектрической проницаемости на удельное сопротивление $\varepsilon_i \cdot \rho_i$ остаётся постоянной для всех элементов объёма диэлектрика. Поэтому любые включения в диэлектрике (газо-водные поры, неоднородности и др.) в электрическом поле будут поляризовываться, превращаясь в макродиполи.

Ток абсорбции может существовать при всяких изменениях напряжения на диэлектрике, в частности, при синусоидальном напряжении. Потери мощности при переменном напряжении частотой ω будут больше, чем при постоянном напряжении.

При синусоидальном напряжении через диэлектрик идут три синусоидальных тока:

- 1) ёмкость тока $I_c = V \cdot C_\infty \cdot \omega$, C_∞ – геометрическая ёмкость диэлектрика при $\omega \rightarrow 0$;
- 2) ток абсорбции, который имеет активную $I'_{аб}$ и реактивную $I''_{аб}$ компоненты:

$$I'_{аб} = V \cdot S \cdot \frac{\omega^2 \cdot \tau^2}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} \text{ и } I''_{аб} = V \cdot S \cdot \frac{\omega \cdot \tau}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}; \quad (10)$$

- 3) ток сквозной проводимости:

$$I_{ск} = \frac{V}{R_{ск}} = V \cdot G_{ск}.$$

Составляющие полного тока равны:

$$I_{ак} = I'_{аб} + I_{ск} = V \cdot \left(S \frac{\omega^2 \cdot \tau^2}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} + G_{ск} \right); \quad (11)$$

$$I_{ре} = I''_{аб} + I_c = V \cdot \omega \cdot \left(C_\infty + \frac{S \cdot \tau}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} \right); \quad (12)$$

$$\text{tg } \delta = \frac{I_{ак}}{I_{ре}} = \frac{\omega^2 \cdot \tau^2 \cdot (S + G_{ск}) + G_{ск}}{\omega \cdot (S \cdot \tau + C_\infty \cdot (1 + \omega^2 \cdot \tau^2))}, \quad (13)$$

где S – абсорбционная ёмкость; $G_{ск}$ – сквозная проводимость диэлектрика; C_∞ – геометрическая ёмкость диэлектрика.

$$I_{ре} = \frac{V}{R_{ре}} = V \cdot C \cdot \omega.$$

Отсюда полная ёмкость диэлектрика в переменном поле равна

$$C = C_\infty + \frac{S \cdot \tau}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}. \quad (14)$$

Полная ёмкость состоит из геометрической ёмкости C_∞ и абсорбционной ёмкости

$$C_{аб} = \frac{S \cdot \tau}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}.$$

Амплитуда переменного тока при наличии абсорбционной ёмкости выразится при пренебрежении $G_{ск}$ и C_∞ :

$$I_{аб}^2 = I_{аб}'^2 + I_{аб}''^2 \approx (V \cdot S)^2 \frac{\omega^4 \cdot \tau^4}{(1 + \omega^2 \cdot \tau^2)^2} + (V \cdot S)^2 \frac{(\omega \cdot \tau)^2}{(1 + \omega^2 \cdot \tau^2)^2} = (V \cdot S)^2 \frac{\omega^2 \cdot \tau^2}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}$$

или

$$I_{аб} = \frac{V \cdot C_{аб} \cdot \omega}{\sqrt{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}} \approx V \cdot S, \quad \omega \rightarrow 0. \quad (15)$$

Таким образом, появление абсорбционных токов в диэлектрике приводит к возникновению дополнительной абсорбционной ёмкости, изменяющейся с частотой поля в соответствии с выражением (14), описывающем закон частотной дисперсии.

При $\omega = 0$ $C_{аб\max} = S \cdot \tau$ достигает максимальной величины.

Абсорбционная ёмкость экспериментально может быть определена либо из частотного хода ёмкости, либо в постоянном поле по величине заряда q , накопленного в диэлектрике.

Определение постоянной релаксации τ

Для одного времени релаксации τ изменение абсорбционной ёмкости $C_{аб}$ с частотой описывается законом дисперсии:

$$C = C_{\infty} + \frac{C_{аб}}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}, \quad (16)$$

где C_{∞} – ёмкость при достаточно высоких частотах; $C_{аб}$ – абсорбционная ёмкость при $\omega \rightarrow 0$, τ – постоянная времени спада абсорбционного тока.

Постоянная времени релаксации τ может быть определена несколькими способами:

1. Определение τ из закона дисперсии:

Запишем (16) в виде

$$C_{аб} = (C - C_{\infty}) \cdot (1 + \omega^2 \cdot \tau^2). \quad (17)$$

Так как ёмкость C и частота ω изменяются так, что величина $C_{аб}$ должна оставаться неизменной для разных частот, т.е.:

$$C_{аб} = (C_1 - C_{\infty}) \cdot (1 + \omega^2 \cdot \tau^2) = (C_2 - C_{\infty}) \cdot (1 + \omega^2 \cdot \tau^2),$$

тогда

$$\tau = \frac{C_1 - C_2}{(C_2 - C_{\infty}) \cdot \omega_2^2 - (C_1 - C_{\infty}) \cdot \omega_1^2} = \frac{C_1 - C_2}{\Delta C_2 \cdot \omega_2^2 - \Delta C_1 \cdot \omega_1^2} = \frac{C_1 - C_2}{C_2 \cdot \omega_2^2 - C_1 \cdot \omega_1^2}. \quad (18)$$

2. Определение τ из частотных формул Дебая для фактора потерь ε''

Формула Дебая для фактора потерь запишется в виде

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}) \cdot \omega \cdot \tau}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}, \quad (19)$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость на частоте $\omega \rightarrow 0$.

Найдя из частотных измерений ε' и $\operatorname{tg} \delta$, два значения $\varepsilon_1'' = \varepsilon_1' \cdot \operatorname{tg} \delta_1$ и $\varepsilon_2'' = \varepsilon_2' \cdot \operatorname{tg} \delta_2$ для двух достаточно близких и малых частот ν_1 и ν_2 можно написать:

$$\frac{\varepsilon_2''}{\varepsilon_1''} = \frac{\omega_2}{\omega_1} \cdot \left(\frac{1 + \omega_1^2 \cdot \tau^2}{1 + \omega_2^2 \cdot \tau^2} \right)$$

или

$$\left(\frac{\varepsilon_2''}{\varepsilon_1''} \right) \cdot \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right) = \left(\frac{1 + \omega_1^2 \cdot \tau^2}{1 + \omega_2^2 \cdot \tau^2} \right) = A. \quad (20)$$

Решая относительно τ , получим:

$$\tau^2 = \frac{1 - A}{A \cdot \omega_2^2 - \omega_1^2}$$

или

$$\tau = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \nu_1} \cdot \sqrt{\frac{1 - A}{A \cdot \frac{\nu_2^2}{\nu_1^2} - 1}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \nu_1} \sqrt{\frac{1 - \frac{\varepsilon_2'' \cdot \nu_1}{\varepsilon_1'' \cdot \nu_2}}{\frac{\varepsilon_2'' \cdot \nu_2}{\varepsilon_1'' \cdot \nu_1} - 1}}. \quad (21)$$

Изучение диэлектрических характеристик образцов кернов Ковыктинского месторождения в зависимости от частоты

Для измерения диэлектрических параметров исследуемых образцов керна была изготовлена измерительная ячейка, состоящая из тефлонового основания (1), латунных электродов (2), между которыми помещался исследуемый образец. Образец фиксировался в ячейке при помощи пружины (4), к которой прикреплен один из электродов. К основанию под электродом находится печь (5), используемая для нагревания образца. Вся система помещена в металлический корпус (6).

Электрическая ёмкость и проводимость образцов принимались равными значениям, полученным по показанию прибора. Результаты многократных измерений обрабатывались статистическими методами. Измерения выполнялись на образцах керна песчаника Ковыктинского месторождения.

Измерение ёмкости и проводимости производилось на приборе измеритель иммитанса Е7-20. С помощью него регистрировалось изменение проводимости и ёмкости образца в диапазоне частот 25–106 Гц.

Для измерения тангенса диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$, действительной ϵ' и мнимой ϵ'' части диэлектрической проницаемости в диапазоне частот 25–106 Гц для образцов керна применялись круглые электроды одинакового диаметра $d = 2$ см.

$$\epsilon' = \frac{C}{C_0}, \quad C_0 = 0,095 \cdot \frac{S}{d}, \quad (22)$$

где S – площадь электрода; d – толщина образца.

Фактор потерь определяется по формуле:

$$\epsilon'' = \epsilon' \cdot \text{tg } \delta. \quad (23)$$

Тангенс угла потерь определяется по формуле:

$$\text{tg } \delta = \frac{G}{2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot c}, \quad (24)$$

где G – объёмная электропроводность; c – ёмкость.

Исследуемые образцы помещались в измерительную ячейку, которая подключалась к измерителю иммитанса Е7-20, позволяющим исследовать зависимость диэлектрических параметров в диапазоне частот 25–106 Гц.

Сначала в эксперименте исследовалась частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь (рис. 6), действительной (рис. 7) и мнимой части (рис. 8) диэлектрической проницаемости от частоты при комнатных условиях. Частотные измерения брались по показаниям ёмкости и проводимости. После этого вычислялся тангенс диэлектрических потерь по формуле (24), действительная (22) и мнимая (23) часть диэлектрической проницаемости.

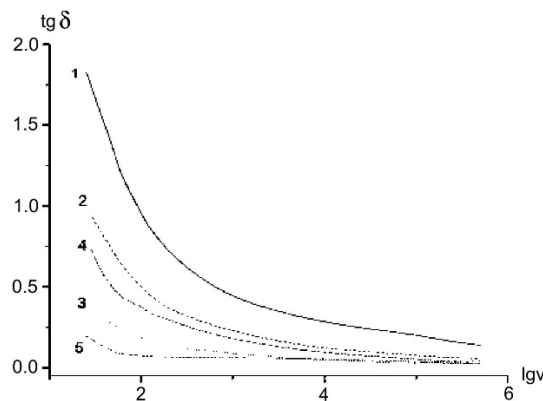


Рисунок 6 – Частотные спектры тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ образцов кернов Ковыктинского месторождения с различными размерами пор при комнатной влажности:

1 – № 2 ($d = 0,05\text{--}0,15$ мм); 2 – № 3 ($d = 0,1\text{--}0,3$ мм); 3 – № 4 ($d = 0,05\text{--}0,2$ мм);
4 – № 5 ($d = 0,01\text{--}0,15$ мм); 5 – № 7 ($d = 0,03\text{--}0,05$ мм)

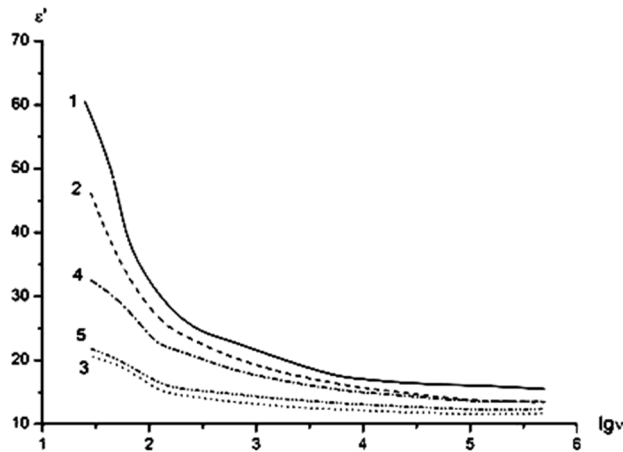


Рисунок 7 – Частотные спектры действительной части диэлектрической проницаемости ϵ' образцов кернов Ковыктинского месторождения с различными размерами пор при комнатной влажности:
 1 – № 2 ($d = 0,05-0,15$ мм); 2 – № 3 ($d = 0,1-0,3$ мм); 3 – № 4 ($d = 0,05-0,2$ мм);
 4 – № 5 ($d = 0,01-0,15$ мм); 5 – № 7 ($d = 0,03-0,05$ мм)

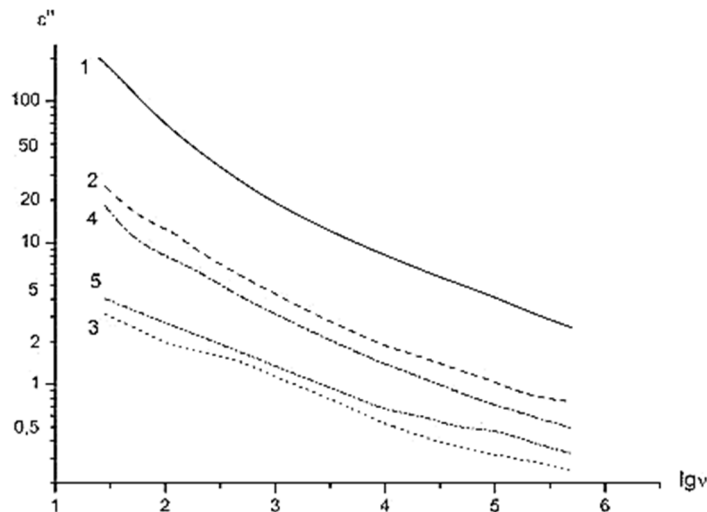


Рисунок 8 – Частотные спектры мнимой части диэлектрической проницаемости ϵ'' образцов кернов Ковыктинского месторождения с различными размерами пор при комнатной влажности:
 1 – № 2 ($d = 0,05-0,15$ мм); 2 – № 3 ($d = 0,1-0,3$ мм); 3 – № 4 ($d = 0,05-0,2$ мм);
 4 – № 5 ($d = 0,01-0,15$ мм); 5 – № 7 ($d = 0,03-0,05$ мм)

Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы:

1. Величина действительной части диэлектрической проницаемости ϵ' исследуемых образцов уменьшается при увеличении частоты внешнего электрического поля.
2. Экспериментально выявлен рост потерь энергии в образцах кернов Ковыктинского месторождения, особенно при увеличении заряженных дефектов в породах.
3. Обнаружен максимум в частотной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь для образцов и сдвиг этого максимума для образцов с наиболее мелкими порами в область низких частот.

Изучение диэлектрических характеристик образцов кернов Ковыктинского месторождения в зависимости от температуры

Измерение диэлектрических и релаксационных параметров образцов, а также регистрация термостимулированных токов в них осуществлялась с использованием экспериментальной установки, представленной на рисунке 9.

На схеме использованы следующие обозначения входов и выходов:

- «а» – выход на цифровые измерительные приборы;
- «б» – горячий спай термопары;
- «в» – вход нагревательного элемента;
- «г» – холодный спай термопары.

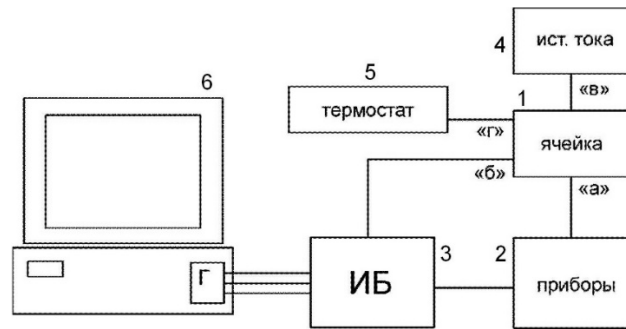


Рисунок 9 – Схема экспериментальной установки:
 1 – измерительная ячейка; 2 – регистрирующие приборы; 3 – интерфейсный блок;
 4 – источник постоянного тока; 5 – термостат; 6 – компьютер

Рассмотрим принцип работы экспериментальной установки. Измерительная ячейка 1, содержащая исследуемый образец, подключается через выход «а» к цифровым приборам 2, которые в свою очередь соединены с интерфейсным блоком 3, содержащим АЦП и выполняющим функцию дискретизации показаний прибора по времени и передающим полученные данные в память компьютера 6. На экране последнего отображается график зависимости термостимулированных токов и температуры образца от времени, что позволяет проследить кинетику физических процессов, вызванных его нагреванием. Регистрация температуры образца осуществляется с использованием медь-константановой термопары, горячий спай «б» которой соединён с разъёмом интерфейсного блока, а холодный «г» помещён в термостат 5, содержащий смесь воды и льда при температуре 0 °С. Увеличение температуры образца осуществляется нагревательным элементом, подключённым к источнику постоянного тока 4.

Измерения диэлектрических и релаксационных характеристик образцов и регистрация термостимулированных токов в них осуществлялись с помощью следующих приборов:

1) измеритель иммитанса E7-20 (используется для измерения ёмкости и проводимости в широком диапазоне частот от 25 до 10⁶ Гц);

2) вольтметр-электромметр В7-49 (позволяет измерять токи с точностью до 10–15 А).

Дополнительно использовались следующие устройства:

1) источник постоянного тока;

2) аналитические весы МЛТ-1, способные измерять массу образцов с точностью до 0,1 мг;

3) сушильный шкаф, используемый для дегидратации образцов;

4) эксикатор, содержащий насыщенный 95 % раствор соды.

Образцы помещались в измерительную ячейку. Регистрация ёмкости и проводимости осуществляется при постоянном и равномерном нагреве. Результаты измерений представлены на рисунках 10–12.

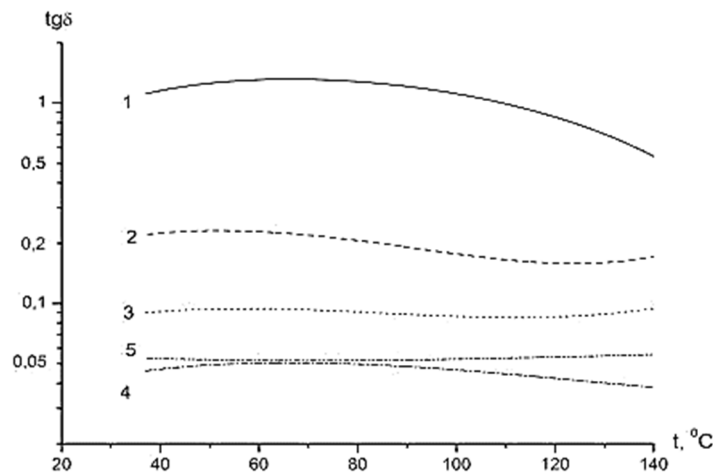


Рисунок 10 – Температурные спектры тангенса угла диэлектрических потерь образца керна Ковыктинского месторождения с коэффициентом пористости $k = 20\text{--}25\%$ и размерами пор $d = 0,05\text{--}0,1$ мм до $0,15\text{--}0,20$ мм:
 1 – 25 Гц; 2 – 103 Гц; 3 – 104 Гц; 4 – 105 Гц; 5 – 106 Гц

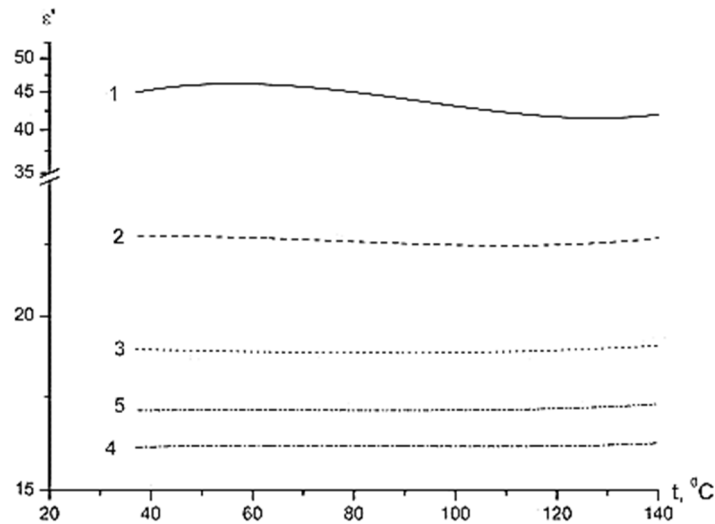


Рисунок 11 – Температурные спектры действительной части диэлектрической проницаемости ϵ' образца керна Ковыктинского месторождения с коэффициентом пористости $k = 20\text{--}25\%$ и размерами пор $d = 0,05\text{--}0,1$ мм до $0,15\text{--}0,20$ мм:
1 – 25 Гц; 2 – 103 Гц; 3 – 104 Гц; 4 – 105 Гц; 5 – 106 Гц

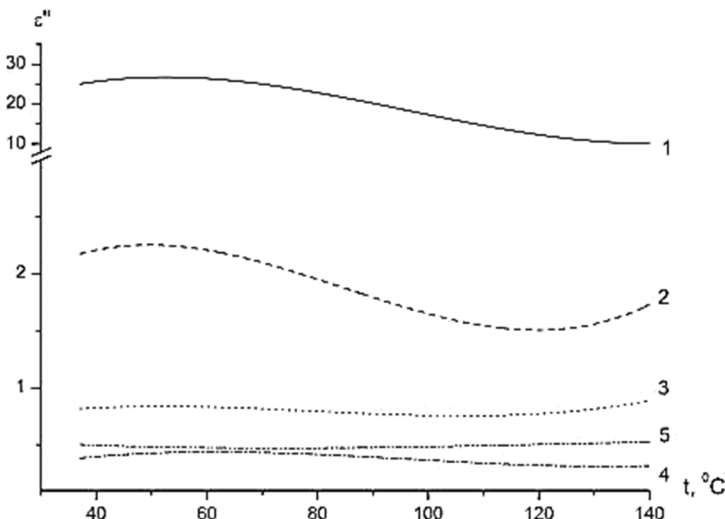


Рисунок 12 – Температурные спектры мнимой части диэлектрической проницаемости ϵ'' образца керна Ковыктинского месторождения с коэффициентом пористости $k = 20\text{--}25\%$ и размерами пор $d = 0,05\text{--}0,1$ мм до $0,15\text{--}0,20$ мм, реже до $0,3$ мм:
1 – 25 Гц; 2 – 103 Гц; 3 – 104 Гц; 4 – 105 Гц; 5 – 106 Гц

Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы:

1. В температурной зависимости действительной части диэлектрической проницаемости ϵ' мнимой части и диэлектрической проницаемости ϵ'' образцов кернов Ковыктинского месторождения проявляются пологие максимумы, свидетельствующие о перестройке структуры в исследуемой температурной области $60\text{ }^\circ\text{C}$, свидетельствующие о переходе структурированной связанной воды в объёмную.

2. Вырождение этих максимумов прослеживается на более высоких частотах до 105 Гц, что связывается с наличием водных плёнок и вырождением дипольно-ориентационной поляризации молекул воды.

Выводы

Исследование диэлектрических свойств образцов кернов Ковыктинского месторождения позволяет сделать следующие выводы:

1. Величина действительной части диэлектрической проницаемости ϵ' исследуемых образцов уменьшается при увеличении частоты внешнего электрического поля, что

связано с вырождением дипольно-ориентационной поляризации молекул воды, находящихся в порах исследуемых образцов.

2. Установлена зависимость диэлектрической поляризации ϵ' от влажности. С ростом величины адсорбции увеличивается концентрация релаксаторов в исследуемой системе и, как следствие, повышается ϵ' .

3. Обнаружен максимум в частотной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь для образцов и сдвиг этого максимума для образцов с наиболее мелкими порами в область низких частот.

4. Обнаружены особые свойства электрически активных систем. Установлено, что на границах раздела электрически активной поверхности твёрдой низкоразмерной диэлектрической частицы и полярной жидкой компоненты зарегистрировано появление градиентов потенциала устойчивого внутреннего поля в таких системах. Подтверждено наличие термостимулированного тока без подачи напряжения на образец.

5. Собственное поле является катализатором процессов диссоциации в полярной матрице, что приводит к повышению в ней концентрации свободных ионов. В результате электрического взаимодействия ионов жидкости с заряженной поверхностью твёрдой фазы вблизи последней происходит эффективное накопление (электрическая адсорбция) противоионов, что является свидетельством проявления электростатического эффекта. Амплитуда термостимулированного тока можно считать мерой межфазного взаимодействия. При увеличении влажности образца амплитуда тока значительно усиливается.

Литература

1. Булатов А.И. [и тд.]. Экология при строительстве нефтяных и газовых скважин : учебное пособие для студентов вузов. – Краснодар: ООО «Просвещение – Юг», 2011. – 603 с.
2. Булатов А.И., Савенок О.В. Капитальный подземный ремонт нефтяных и газовых скважин: в 4 томах. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2012–2015. – Т. 1–4.
3. Дахнов В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород. – М. : Недра, 1985. – 310 с.
4. Климов В.В., Савенок О.В., Лешкович Н.М. Основы геофизических исследований при строительстве и эксплуатации скважин на нефтегазовых месторождениях. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2016. – 274 с.
5. Ладенко А.А., Савенок О.В. Теоретические основы разработки нефтяных и газовых месторождений. – М. : Инфра-Инженерия, 2020. – 244 с.
6. Мецик М.С., Гладкий Г.Ю. Физика диэлектриков : учебное пособие. – Иркутск : Издательство Иркутского государственного университета, 2001. – 115 с.
7. Попов В.В. [и тд.]. Геофизические исследования и работы в скважинах : учебное пособие. – Новочеркасск : Лик, 2017. – 326 с.
8. Попов В.В. [и тд.]. Геоинформатика нефтегазовых скважин. – Новочеркасск : Издательство «Лик», 2018. – 292 с.
9. Ромм Е.С. Структурные модели порового пространства горных пород. – Л. : Недра: Ленинградское отделение, 1985. – 240 с.
10. Савенок О.В., Ладенко А.А. Разработка нефтяных и газовых месторождений. – Краснодар : Изд. ФГБОУ ВО «КубГУ», 2019. – 275 с.
11. Сканава Г.И. Физика диэлектриков (область слабых полей). – Москва; Ленинград : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1949. – 500 с.
12. Страхов Н. М., Бушинский Г.И. Методы изучения осадочных пород: в 2 томах. – М. : Госгеолтехиздат, 1957.
13. Электрофизические свойства горных пород. – URL : http://knowledge.allbest.ru/geology/2c0a65635b3ad78b4d43b89521306c36_0.html
14. Андреева Е.Е., Баранова А.Г., Валева С.Е. О возможных причинах несовпадения данных бурения и сейсмостроений // Булатовские чтения. – 2017. – Т. 1. – С. 30–33.
15. Афонин И.В., Корбовяк Е.В. Геохимическая характеристика и условия образования парфеновского горизонта (Ковыктинское месторождение, Восточная Сибирь) // Материалы IV Всероссийской молодежной научной конференции «Байкальская молодежная научная конференция по геологии и геофизике» (21–26 августа 2017 года, г. Улан-Удэ, с. Горячинск) / Геологический институт СО РАН. – Улан-Удэ : Издательство Бурятского государственного университета, 2017. – С. 41–43.

16. Афонин И.В., Корбовяк Е.В. Лантаноиды как индикаторы обстановок образования парфёновского горизонта (Ковыктинское месторождение, Восточная Сибирь) // *Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные проблемы географии и геологии: к 100-летию открытия естественного отделения в Томском государственном университете»* (16–19 октября 2017 года, г. Томск) / Национальный исследовательский Томский государственный университет. – Томск : Издательство ООО «Интегральный переплёт», 2017. – С. 225–227.
17. Багаутдинова Р.А. Современные тектонические обстановки как фактор образования и разрушения нефтегазовых залежей // *Булатовские чтения*. – 2017. – Т. 1. – С. 34–35.
18. Барышев Л.А. Физико-геологические модели в нефтегазовой сейсморазведке (Ковыктинское месторождение) // *Отечественная геология*. – 2006. – № 2. – С. 35–41.
19. Березовский Д.А. [и тд.]. Разработка физико-химических моделей и методов прогнозирования состояния пород-коллекторов // *Нефтяное хозяйство*. – 2014. – № 9. – С. 84–86.
20. Волкова П.В. Оценка неопределенностей петрофизических параметров методом Монте-Карло // *Булатовские чтения*. – 2017. – Т. 1. – С. 42–46.
21. Газизова Т.Ф., Коновалова Н.Г., Лузин В.Ф. Ковыктинское месторождение – база для создания топливно-энергетического и химического центра в Иркутской области // *Отечественная геология*. – 2006. – № 6. – С. 103.
22. Исаев В.П., Товаров А.А. Ковыктинское газоконденсатное месторождение – база экономического развития Ангаро-Ленского региона // *Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений*. – 2006. – № 3 (29). – С. 42–50.
23. Каразбаев Р.Д., Вахитова Г.Р. Подготовка массива данных и обоснование зависимостей, необходимых для интерпретации комплекса данных ГИС // *Булатовские чтения*. – 2017. – Т. 1. – С. 73–77.
24. Коновалова Ю.И., Шарапов В.К., Шкирман Н.П. Данные исследования керн и использование их для восстановления акустической характеристики разреза // *Булатовские чтения*. – 2017. – Т. 1. – С. 94–103.
25. Коржубаев А.Г., Филимонова И.В. Ковыктинское газоконденсатное месторождение: проблемы и перспективы освоения // *Регион: Экономика и Социология*. – 2007. – № 3. – С. 113–121.
26. Левашов С.П. [и тд.]. О целесообразности применения прямопоисковых мобильных технологий для ускорения и оптимизации геологоразведочных работ на нефть и газ // *Булатовские чтения*. – 2018. – Т. 1. – С. 125–145.
27. Меринов И.А., Савенок О.В. Оценка эколого-экономической эффективности кустового безамбарного бурения на примере Ковыктинского газоконденсатного месторождения // *Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник)*. – 2020. – № 1. – С. 201–215.
28. Молчанов С.А., Савенок О.В. Опыт применения нестационарных электромагнитных зондирований для изучения верхней части разреза и прогноза условий бурения поисково-разведочных скважин на примере Ковыктинского газоконденсатного месторождения // *Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник)*. – 2018. – № 4. – С. 243–265.
29. Пунанова С.А. Микроэлементные критерии при оценке перспектив нефтегазоносности доюрских отложений Западной Сибири // *Булатовские чтения*. – 2018. – Т. 1. – С. 125–145.
30. Смирнов А.С., Горлов И.В., Яицкий Н.Н. Интерпретация геолого-геофизических данных – путь к созданию достоверной модели Ковыктинского газоконденсатного месторождения // *Геология нефти и газа*. – 2016. – № 2. – С. 56–66.
31. Сопнев Т.В., Бекетов С.Б. Анализ эффективности методов радиометрии при выявлении и оценке характера насыщения коллекторов (на примере месторождений Западно-Сибирской равнины) // *Булатовские чтения*. – 2017. – Т. 1. – С. 154–163.
32. Шарипова Е.В., Вахитова Г.Р. Обоснование количественных критериев выделения коллекторов по результатам ГИС и анализа керн // *Булатовские чтения*. – 2017. – Т. 1. – С. 182–186.
33. Шелихов А.П., Смирнов А.С., Яицкий Н.Н. Ковыктинское газоконденсатное месторождение: анализ проявления геологического строения в поле силы тяжести // *Материалы 43-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей»* (26–30 января 2016 года, г. Воронеж). – Воронеж : Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2016. – С. 183–186.

References

1. Bulatov A.I. [et al.]. *Ecology at construction of oil and gas wells: textbook for students of higher educational institutions*. – Krasnodar : ООО Enlightenment-South, 2011. – 603 p.
2. Bulatov A.I., Savenok O.V. *Underground overhaul of oil and gas wells: in 4 volumes*. – Krasnodar : Publishing House – South, 2012–2015. – Vol. 1–4.
3. Dakhnov V.N. *Geophysical methods for determination of reservoir properties and oil-gas-saturation of rocks*. – M. : Nedra, 1985. – 310 p.

4. Klimov V.V., Savenok O.V., Leshkovich N.M. Basics of geophysical research in construction and operation of wells at oil and gas fields. – Krasnodar : Publishing house – South, 2016. – 274 p.
5. Ladenko A.A., Savenok O.V. Theoretical bases of development of oil and gas births. – M. : Infra-Engineering, 2020. – 244 p.
6. Metzlik M.S., Gladkiy G.Yu. Dielectric physics: a manual. – Irkutsk : Publishing house of Irkutsk State University, 2001. – 115 p.
7. Popov V.V. [et al.]. Geophysical research and work in wells : a textbook. – Novocherkassk : Lick, 2017. – 326 p.
8. Popov V.V. [et al.]. Geoinformatics of oil and gas wells. – Novocherkassk : «Lik» Publishing House, 2018. – 292 p.
9. Romm E.S. Structural models of the pore space of rocks. – L. : Nedra: Leningrad Branch, 1985. – 240 p.
10. Savenok O.V., Ladenko A.A. Development of the oil and gas deposits. – Krasnodar : FSBOU VO «KubGTU» Publishing House, 2019. – 275 p.
11. Scanavy G.I. Physics of dielectrics (field weak fields). – M.; Leningrad : State publishing house of technical-theoretical literature, 1949. – 500 p.
12. Strakhov N.M., Bushinskiy G.I. Methods of studying sedimentary rocks: in 2 volumes. – M. : State Geoltekhizdat, 1957.
13. Electrophysical properties of rocks. – URL : http://knowledge.allbest.ru/geology/2c0a65635b3ad78b4d43b89521306c36_0.html.
14. Andreeva E.E., Baranova A.G., Valeeva S.E. About the possible reasons of a mismatch of the drilling data and the seismic constructions // Bulatovskie readings. – 2017. – Vol. 1. – P. 30–33.
15. Afonin I.V., Korbovyak E.V. Geochemical characteristics and formation conditions of Partha Nova horizon (Kovykta field, Eastern Siberia) // Proceedings of IV All-Russian youth scientific conference «Baikal youth scientific conference on geology and geophysics» (21–26 August 2017, Ulan-Ude, Goryachinsk village) / Geological Institute of SB RAS. – Ulan-Ude : Publishing house of Buryat State University, 2017. – P. 41–43.
16. Afonin I.V., Korbovyak E.V. Lantanoids as indicators of the Partho-Nov horizon formation settings (Kovykta field, Eastern Siberia) // Proceedings of IV All-Russian scientific-practical conference with international participation «Modern problems of geography and geology: to the 100th anniversary of the natural department opening in Tomsk State University» (October 16–19, 2017, Tomsk) / National Research Tomsk State University. – Tomsk : Publishing house «Integral Binding» LLC, 2017. – P. 225–227.
17. Bagautdinova R.A. Modern tectonic conditions as a factor of formation and disruption of the oil and gas deposits // Bulatovskie readings. – 2017. – Vol. 1. – P. 34–35.
18. Baryshev L.A. Physical and geological models in the oil and gas seismic survey (Kovyktinskoe field) // Fatherland geology. – 2006. – № 2. – P. 35–41.
19. Berezovsky D.A. [et al.]. Development of the physico-chemical models and methods of the collector rocks state prediction // Petroleum economy. – 2014. – № 9. – P. 84–86.
20. Volkova P.V. Estimation of the petrophysical parameters uncertainties by the Monte Carlo method // Bulatovskie readings. – 2017. – Vol. 1. – P. 42–46.
21. Gazizova T.F., Konovalova N.G., Luzin V.F. Kovykta field – base for a co-creation of the fuel and energy and chemical center in Irkutsk region // Fatherland geology. – 2006. – № 6. – P. 103.
22. Isayev V.P., Tovarov A.A. Kovykta Gas Condensate Field – a Base for Economic Development of Angara-Lensk Region // Izvestia, Siberian Branch of RAEN. Geology, prospecting and exploration of ore deposits. – 2006. – № 3 (29). – P. 42–50.
23. Karazbaev R.D., Vakhitova G.R. Data array preparation and justification of dependencies necessary for interpretation of GIS data complex // Bulatovskie readings. – 2017. – Vol. 1. – P. 73–77.
24. Konovalova Yu.I., Sharapov V.K., Shkirman N.P. Core investigation data and their use for the section acoustic characteristic restoration // Bulatovskie readings. – 2017. – Vol. 1. – P. 94–103.
25. Korzhubaev A.G., Filimonova I.V. Kovykta gas-condensate field: pro-issues and prospects of development // Region: Economics and Sociology. – 2007. – № 3. – P. 113–121.
26. Levashov S.P. [et al.]. About expediency of application of the mobile direct search technologies for acceleration and optimization of the oil and gas exploration works // Bulatovskie readings. – 2018. – Vol. 1. – P. 125–145.
27. Merinov I.A., Savenok O.V. Estimation of the environmental-economical efficiency of the barrel-less cluster drilling on the example of the Kovykta gas-condensate field // Nauka. Technique. Technologies (Polytechnic bulletin). – 2020. – № 1. – P. 201–215.
28. Molchanov S.A., Savenok O.V. Experience of the non-stationary electromagnetic probes application for the upper section study and the forecast of the exploratory wells drilling conditions on the example of the Kovykta gas-condensate field // Nauka. Technique. Technologies (Polytechnic bulletin). – 2018. – № 4. – P. 243–265.

29. Punanova S.A. Microelement criteria at an estimation of the oil-and-gas bearing prospects of the Western Siberia doya deposits // Bulatovskie readings. – 2018. – Vol. 1. – P. 125–145.
30. Smirnov A.S., Gorlov I.V., Yaitskiy N.N. Interpretation of the geological and geophysical data – a way to a reliable model creation of the Kovykta gas-condensate field // Oil and gas geology. – 2016. – № 2. – P. 56–66.
31. Sopnev T.V., Beketov S.B. Efficiency analysis of the radiometric methods at revealing and character evaluation of the reservoir saturation (by an example of the West Siberian Plain fields) // Bulatovskie readings. – 2017. – Vol. 1. – P. 154–163.
32. Sharipova E.V., Vakhitova G.R. Justification of the quantitative criteria for the collector allocation according to the results of GIS and the core analysis // Bulatovskie readings. – 2017. – Vol. 1. – P. 182–186.
33. Shelikhov A.P., Smirnov A.S., Yaitskiy N.N. Kovykta gas condensate field: analysis of geological structure manifestations in the field of gravity // Proceedings of the 43rd session of D.G. Uspensky International Scientific Workshop «Issues of theory and practice of geo-logical interpretation of geophysical fields» (January 26–30, 2016, Voronezh). – Voronezh : Publishing and printing center «Scientific Book», 2016. – P. 183–186.