

ГЕОФИЗИКА

УДК 537.87+550.837+621.371

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И РАДИОИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТОВЫХ
И КОНДЕНСАЦИОННЫХ ВОД ИЗ ГАЗОНОСНЫХ СКВАЖИН

М.И. Эпов^{1,4}, С.Н. Меньшиков², А.Н. Харитонов², А.Н. Романов³, В.С. Пермяков²,
С.Б. Бортникова¹, Н.В. Юркевич¹

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

²ООО «Газпром добыча Надым», 629736, Ямало-Ненецкий автономный округ, Надым, ул. Пионерская, 7, Россия

³Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Алтайский край, Барнаул, ул. Молодежная, 1, Россия

⁴Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

Для оперативной диагностики жидкости из газовых скважин проведено комплексное исследование коллекции проб Медвежьего, Юбилейного, Ямсовейского нефтегазоконденсатных месторождений (НГКМ). На основе определения физико-химических параметров и химического состава сделано предварительное предположение о долях конденсационных, пластовых и техногенных вод в составе выносимой смеси. На частоте 0.6 ГГц исследованы их диэлектрические характеристики. Установлены зависимости диэлектрических и радиоизлучательных параметров от общей минерализации и концентраций основных катионов. Предложены алгоритмы идентификации разных типов воды из скважин по значениям их диэлектрических параметров.

Пластовые, техногенные, конденсационные воды; комплексная диэлектрическая проницаемость; химический состав; коэффициент излучения; микроволновый диапазон.

DIELECTRIC AND RADIO EMISSION PARAMETERS OF FORMATION
AND CONDENSATE WATERS FROM GAS WELLS

M.I. Eпов, S.N. Men'shikov, A.N. Kharitonov, A.N. Romanov,
V.S. Permyakov, S.B. Bortnikova, and N.V. Yurkevich

A comprehensive study of water samples from the Medvezh'e, Yubileinoe, and Yamsveiskoe oil-gas condensate fields was performed for the rapid identification of liquids from gas wells. The proportions of condensate, formation, and process waters in the produced mixture are assumed on the basis of their physicochemical parameters and chemical composition. Their dielectric parameters were studied at a frequency of 0.6 GHz. Dependences of the dielectric and radio emission parameters on the total salinity and concentrations of major cations have been established. Algorithms for identifying different types of well water based on their dielectric parameters are proposed.

Formation, process, and condensate waters; complex dielectric constant; chemical composition; emissivity; microwave range

ВВЕДЕНИЕ

Повышение степени извлечения газа и газового конденсата из недр является одной из важнейших задач рациональной разработки соответствующих залежей. Относительная газоотдача продуктивных пластов при существующих методах разработки колеблется от 50 до 90 %. Особенно остро проблема интенсификации газоотдачи стоит при эксплуатации газовых и газоконденсатных скважин на поздней стадии разработки, когда интенсивное поступление и накопление пластовой жидкости на забое может приводить к глушению продуктивного пласта и прекращению добычи. По этой причине возрастает число простаивающих скважин в сеноманских отложениях месторождений Крайнего Севера. Поддержание за-

данного дебита газа и газового конденсата во многом зависит от степени обводненности скважины пластовой (в первую очередь, подошвенной) водой. В продукции газовых скважин всегда содержится жидкость, которая может различаться по своему составу в зависимости от стадии и условий эксплуатации.

Выделяют три основных типа жидкостей, поступающих с газом [Методическое руководство..., 2005]:

1) конденсационные воды, образующиеся при изменении термобарических условий при движении газа от пласта к устью скважины, являются ультрапресными (минерализация до 1 г/дм³);

2) пластовые (подошвенные) воды, относящиеся к категории подземных вод с широкими вариациями минерализации и состава;

3) технические (техногенные) жидкости, закачиваемые в скважины для интенсификации добычи, а также при проведении ремонтных работ. К ним относятся: хлористый кальций (раствор), метанол, диэтиленгликоль, ингибиторы коррозии и солеобразования, буровые растворы, продукты солянокислотной обработки, поверхностно-активные вещества и пр.

При отсутствии осложнений в работе скважины поступающая жидкость, как правило, представляет собой конденсационную воду. После проведения капитального ремонта (КРС) в продукции скважины резко увеличивается содержание техногенной жидкости, которая состоит из остатков растворов, применяемых при КРС. Со временем ее содержание должно снижаться при нормальном режиме работы скважины после ремонта. Появление в газовом потоке подошвенной воды указывает на возможное обводнение скважины. Этот процесс может достаточно быстро развиваться, сопровождаясь интенсивным разрушением призабойной зоны пласта, а также резким увеличением содержания жидкости и песка, что создает опасность для работы фонтанного и технологического оборудования. Диагностика состава жидкости, выносимой из скважин, является одной из наиболее важных составляющих в общей системе контроля за разработкой газовых месторождений.

В настоящее время для диагностики жидкости в лабораторных условиях проводится химический анализ проб, отобранных на устье скважины. С учетом минерализации и ионного состава растворенных солей в жидкости по методике, разработанной Институтом проблем нефти и газа РАН (ИПНГ РАН), определение генезиса отобранных проб происходит в два этапа. Во-первых, определяется диагностическая группа по общей минерализации. Во-вторых, выявляется тип пробы по значению «натрий-хлоридного» генетического коэффициента (r_{Na}/r_{Cl}) либо определяется доля каждого типа вод. Основным недостатком такого подхода — отсутствие имеющей особую важность оперативности.

В статье представлены результаты разработки радиофизических методов оперативной диагностики жидкости, основанных на измерении диэлектрических и радиоизлучательных параметров.

Физической основой дифференциации разных типов жидкости, выносимой из скважин, являются установленные зависимости диэлектрических характеристик минерализованных вод от температуры, массовой концентрации и типа растворенных солей [Stogryn, 1971; Klein, Swift, 1977; Романов, 2004]. В данном случае температура была постоянной.

Для описания комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) водно-солевых растворов на разных частотах в основном используется дебаевская модель дисперсии и ионной проводимости. Влияние массовой концентрации солей (S) учитывается путем построения аппроксимационных зависимостей для входящих в модель параметров: статической диэлектрической проницаемости $\epsilon_s(t, S)$ и времени релаксации $\tau(t, S)$ [Митник, 1978; Садовский и др., 2013; Шарков, 2014].

Влияние S на КДП раствора, наиболее заметное в дециметровом диапазоне электромагнитных волн, включая выбранную частоту 0.6 ГГц, проявляется неодинаковым образом для действительной ϵ' и мнимой ϵ'' частей КДП. При малых значениях S на зависимости $\epsilon'(S)$ наблюдается резкое уменьшение ϵ' . Это связано с диэлектрическим насыщением молекул воды в ближних гидратных оболочках катионов и анионов и исключением их из формирования эффективного дипольного момента. В отличие от ϵ' , величина ϵ'' при увеличении S возрастает нелинейно, что объясняется возрастанием ионной проводимости раствора [Лилеев и др., 1992; Лященко и др., 1993].

Известны различные области использования диэлектрической проницаемости:

1. Одновременное измерение объема, КДП и плотности конденсированной жидкости дает возможность оценить свойства многофазных потоков в газовом конденсате [May et al., 2004].

2. КДП образцов керна из осадочных отложений, отобранных с морского дна на нефтегазоносных участках, содержат информацию о наличии газогидратов, нефти и аутигенных карбонатов [Francisca et al., 2005].

3. Измеренные в диапазоне частот 10 МГц-1 ГГц при температурах 25—65 °С значения КДП песчано-глинистых образцов, насыщенных эмульсиями «солевой раствор-дизтопливо», при содержании первого не выше 10 % слабо зависят от минерального состава образца и концентрации эмульсии [Боров и др., 2015].

4. На этом основании определены значения КДП водонефтяных эмульсий с заданным объемным влагосодержанием. Для описания полученных зависимостей КДП эмульсии от объемного влагосодержания использованы несимметричные формулы для смеси полярной и неполярной жидкостей [Кротинов и др., 2015].

5. Экспериментально изучены КДП смесей «бентонит-нефть-солевой раствор» с различной водо- и нефтенасыщенностью в диапазоне частот от 10 кГц до 4 ГГц при температурах 25-60 °С. Установлено, что в этом диапазоне частот кроме области дебаевской релаксации воды существуют еще две области релаксации, обусловленные межповерхностным взаимодействием компонентов смеси. Для описания КДП и эквивалентной электропроводности смесей предложена спектроскопическая модель, учитывающая многочастотную релаксацию. Найдена зависимость параметров модели от водонасыщенности и температуры образцов [Эпов и др., 2011].

В работе приведены результаты исследований на частоте 0.6 ГГц диэлектрических и радиоизлучательных характеристик пластовых, техногенных и конденсатных вод, вынесенных из газовых скважин. Их микроволновая диагностика основывалась на зависимости диэлектрических характеристик воды от температуры, массовой концентрации и ионного состава растворенных солей.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовано 20 образцов жидкостей, представлявших смесь конденсационной, пластовой и техногенной вод, вынесенных из газовых скважин на месторождениях Юбилейное, Ямсовейское и Медвежье.

Гидрохимические характеристики. Во всех пробах были измерены значения pH и электропроводности, а также концентрации хлоридов (Cl^-) и катионов (Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+).

Значения pH определяли портативным pH-метром HI 9125 (HANNA Instruments). Перед измерением pH проводили калибровку прибора по стандартным растворам с известными значениями pH (3.56; 4.01; 6.86; 9.18). Точность измерений составляет ± 0.01 pH.

Электропроводность в пробах определяли с помощью портативного кондуктометра Cond315i (Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH). Прибор измеряет электропроводность в диапазоне от 0 мкСм/см до 500 мСм/см с относительной погрешностью ± 0.5 %.

Содержание хлорид-ионов определяли потенциометрическим методом на портативном иономере ЭКСПЕРТ-001-3.0.4 (Эконикс-Эксперт) с использованием ионселективного электрода ЭЛИТ-261С1. Диапазон измеряемых концентраций от 0.4 до 3550 мг/дм³. Относительная погрешность в диапазоне концентраций 10—500 мг/дм³ составляет 10 %.

Катионы определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС) в Новосибирской геолого-поисковой экспедиции на приборе ОПТИМА-2000-DV (Perkin Elmer, Англия).

Измерение диэлектрической проницаемости. Для описания диэлектрических и радиоизлучательных характеристик жидкостей использовали КДП $\varepsilon = \varepsilon' + i \cdot \varepsilon''$ и комплексный показатель преломления $N = \sqrt{\varepsilon} = n + ik$, где n , k — показатели преломления и поглощения, связанные с ε' и ε'' соотношениями [Шарков, 2014]

$$\varepsilon' = n^2 - k^2 \text{ и } \varepsilon'' = 2nk,$$

а также коэффициент излучения χ , связанный с n и k соотношением [Комаров и др., 1997]:

$$\chi = \frac{4n}{(n+1)^2 + k^2}.$$

КДП жидкостей измеряли с помощью лабораторной установки мостового типа на базе измерителя разности фаз ФК 2-18 (рис. 1). В ее состав входят: Г — генератор сигналов высокочастотный Г4-76 (0.40—1.20 ГГц), ДМ — согласованный делитель мощности, ЛПД — линия переменной длины, А₁, А₂, А₃ — согласующие коаксиальные аттенуаторы, И — измерительный блок фазометра, К — контейнер для образца.

Процесс измерений заключается в следующем. С помощью ДМ выполняется балансировка мостовой схемы, в плечо которой устанавливается пустой измерительный контейнер. Сигнал от генератора подается на ДМ и делится поровну между опорным (А) и измерительным (Б) каналами. На фазометре устанавливаются начальные значения разности фаз и ослабления, соответствующие незаполненному контейнеру. Затем контейнер наполняется исследуемой жидкостью, а по индикатору измерителя ФК 2-18 отсчитываются значения разности фаз и ослабления. Сначала проводятся измерения диэлектрических характеристик дистиллированной воды, используемой в качестве эталона, после чего — исследуемой жидкости. Технические характеристики установки: диапазон однозначных измерений фазы $\pm 180^\circ$ (абсолютная погрешность 2°); диапазон измерения ослабления от 0 до 60 дБ; абсолютная погрешность 0.5 дБ.

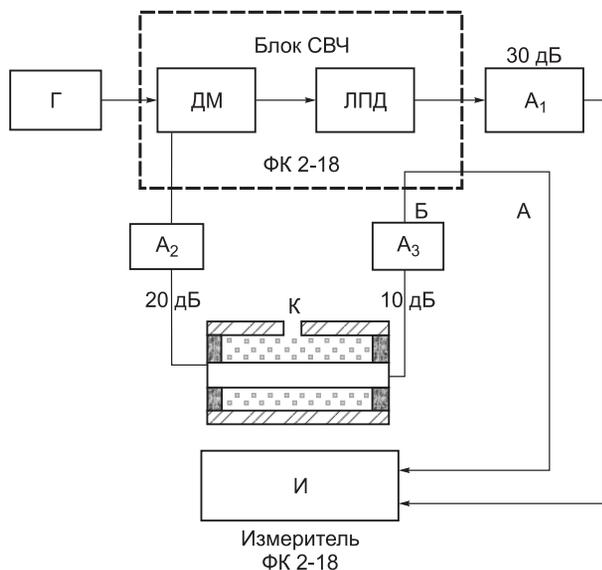


Рис. 1. Схема установки мостового типа на основе измерителя фаз.

Описание см. в тексте.

Описание источников возможных погрешностей приведено в работе [Комаров, 1998]. Измерения выполняли при температуре 25 ± 1 °С.

Измерения проводили на частоте 0.6 ГГц, на которой достаточно сильно проявляется влияние растворенных в воде солей, а также наблюдается значительное различие диэлектрических характеристик минерализованной воды с разным ионным составом. Применение микроволновых радиометров, работающих на данной частоте, позволяет использовать полученные данные при разработке дистанционных микроволновых методов диагностики жидкостей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Химический состав. Исследуемые пробы жидкости имеют очень контрастные характеристики (табл. 1). По значениям pH растворы варьируют от слабокислых (pH = 5.33 в пр. 16, скв. 409, Медвежье НГКМ) до слабощелочных (pH = 7.30, пр. 15, скв. 910, Медвежье НГКМ). Другие характеристики жидкостей (минерализация, концентрации элементов, их соотношения) тоже существенно различаются.

Таблица 1. **Физико-химические характеристики, концентрации некоторых элементов и долевое соотношение разных типов вод в пробах жидкостей из скважин Юбилейного, Ямсовейского и Медвежьего месторождений**

Номер пробы	Место-рождение	Номер скважины	pH	Eh, мВ	УЭП, мСм/см	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S_{COND}	S_{PLAST}	S_{TECH}
						мг/л					%		
1	Юбилейное НГКМ	121	6.52	154	7.8	4000	1200	23	45	230	86	0	14
2		162	7.22	305	22	9300	3700	18	60	270	64	0	36
3		164	5.80	290	2.1	730	200	5.1	7.5	45	100	0	0
4		201	5.97	316	1.8	570	190	8.0	6.6	70	98	0	2.5
5		204	6.70	307	0.63	220	38	5.7	4.8	47	99	0	1.0
6		381	7.20	332	26	21000	180	67	35	4000	19	81	0
7	Ямсовейское НГКМ	112	7.05	78	0.44	160	1.7	0.17	1.2	11	99	0	1.4
8		114	5.41	310	37	17000	5300	61	47	590	0	17	83
9		122	6.94	168	4.1	1800	460	8.0	7.7	42	89	0	11
10		124	6.30	280	47	17000	7900	45	110	530	0	0	100
11		262	6.59	274	26	19000	350	95	33	3800	0	100	0
12		293	6.26	304	12	7500	1500	27	9.7	340	80	0	20
13	Медвежье НГКМ	10406	8.15	294	30	11600	190	97	45	5600	0	100	0
14		10204	7.71	336	26	10500	92	69	51	4800	19	81	0
15		910	7.30	290	26	17000	240	84	28	4000	2.9	97	0
16		409	5.33	308	24	10000	3400	47	24	680	61	0	39
17		424	6.32	248	29	13000	4500	60	30	470	53	0	47
18		202	6.55	364	0.17	21	9.3	1.9	0.22	1.7	100	0	0
19		104	5.90	284	46	27000	7100	120	76	1100	0	8.6	91
20		114	6.80	195	0.75	350	34	4.5	1.5	66	99	0	1.3

Примечание: S_{COND} , S_{PLAST} , S_{TECH} — конденсационной, пластовой, техногенной вод, по данным ООО «Газпром добыча Надым».

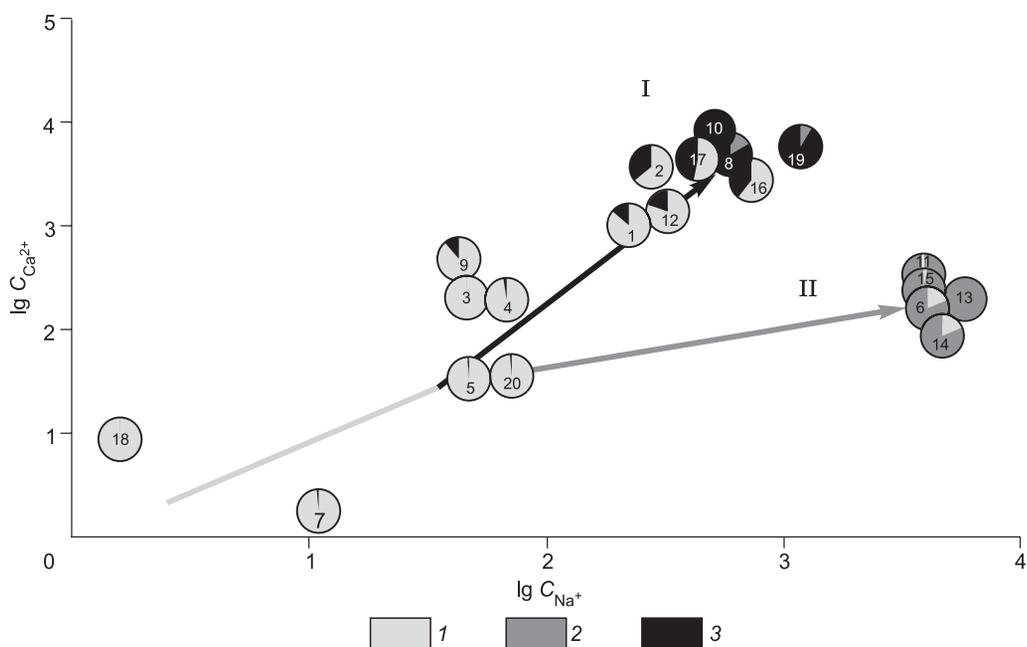


Рис. 2. Концентрации Ca^{2+} и Na^+ в жидкостях, выносимых из скважин месторождений Медвежье, Юбилейное и Ямсовейское.

1–3 — вода: *1* — конденсационная; *2* — пластовая; *3* — техногенная. *I, II* — описание см. в тексте. Цифры в кружках — номера проб.

Удельная электропроводность (УЭП), характеризующая уровень минерализации жидкостей, изменяется более чем в 1000 раз. Определяющий анион — хлорид содержится в концентрациях от 21 (пр. 18) до 27 000 мг/дм³ (пр. 19). Также значительны колебания в содержании основных ионов. В представленной выборке нет двух жидкостей идентичного состава. Согласно табл. 1, в жидкостях представлены все типы воды (конденсационной, техногенной, пластовой) в разных соотношениях. Это свидетельствует о представительности выборки и возможности на ее основе оценки применимости методов диагностики (гидрохимических, диэлектрической проницаемости и радиоизлучательных параметров).

На двойной диаграмме Ca^{2+} (Na^+) показаны составы жидкостей (рис. 2). Пробы, в которых основная доля представлена пластовой жидкостью (*I*), составили компактную группу в правой части диаграммы. Преимущественно техногенные жидкости (см. рис. 2, 3) также составили отдельную группу в верхней части диаграммы. Точки группы *2* — конденсационные воды с разными долями техногенной и пластовой жидкости. При этом область *I* формирует точки конденсационных вод с добавкой главным образом техногенных растворов, а в область *II* уходят точки составов с разными долями пластовых вод. Таким образом, гидрохимические характеристики жидкостей отражают особенности их происхождения, а элементы Ca и Na являются хорошими индикаторами для диагностики.

Установленные закономерности можно выразить количественно через уравнения связи доли конденсационных вод с УЭП жидкостей, а доли пластовых и техногенных вод — с концентрациями натрия и кальция соответственно (рис. 3). Расчет по установленным зависимостям дает неплохую сходимость с оценкой относительных долей типов вод, сделанной по методике ИПНГ РАН [Абукова и др., 2015]. Поэтому считаем правомочным использовать в дальнейшем УЭП, концентрации Ca^{2+} и Na^+ для сопоставления с диэлектрической проницаемостью жидкости и ее радиоизлучательными параметрами.

Химический состав вод, в частности общая минерализация, выраженная через УЭП, определяет их КДП, значения которых также изменяются в широких пределах (табл. 2). Ключевой вопрос состоит в нахождении связей между типом вод (их генезисом) и значениями измеряемых параметров.

Установлено, что показатели преломления и поглощения, действительная и мнимая части КДП, коэффициент излучения связаны между собой, а также с минерализацией зависимостями высокой достоверности (рис. 4). Значения показателей преломления (*n*) и поглощения (*k*) увеличиваются с возрастанием минерализации по полиномиальным зависимостям. При этом показатель поглощения изменяется контрастнее, чем показатель преломления: изменение электропроводности с 0.17 до 47 мСм/см (диапазон минерализации составляет 3 порядка) сопровождается ростом *k* на 7 ед., в то время как *n* повышается всего на 1.8 ед.

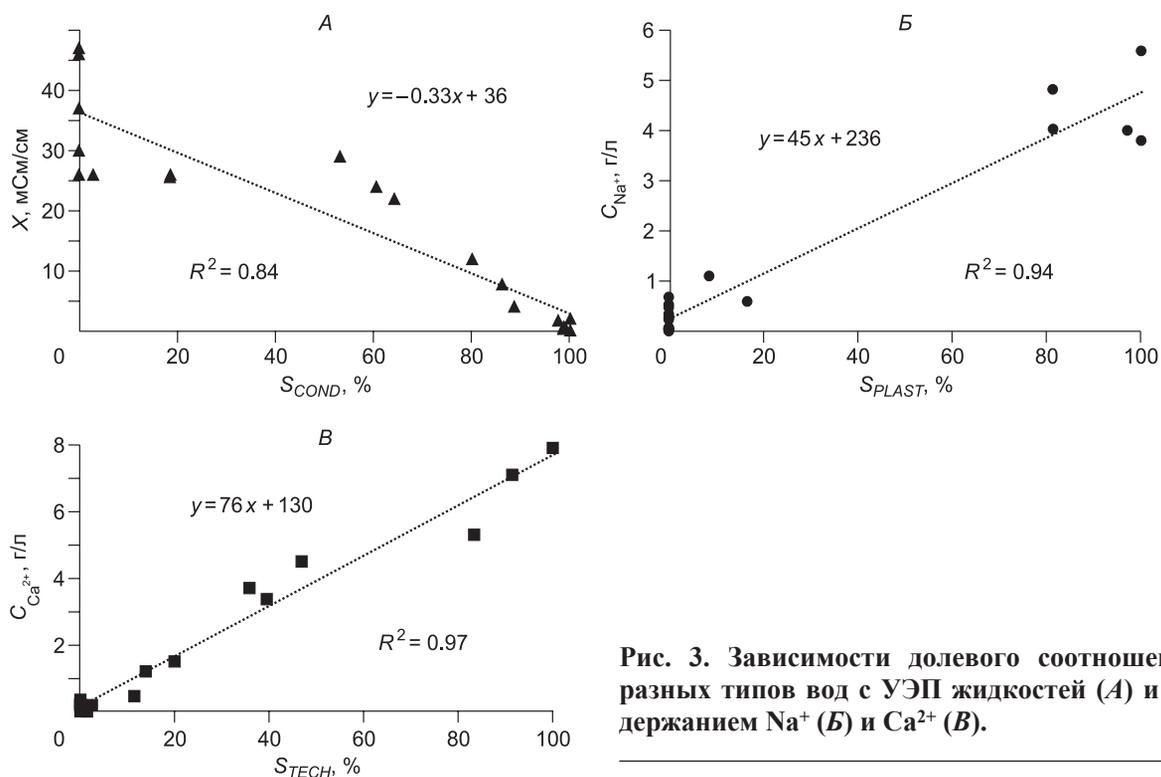


Рис. 3. Зависимости долевого соотношения разных типов вод с УЭП жидкостей (А) и содержанием Na^+ (Б) и Ca^{2+} (В).

Действительная и мнимая части КДП линейно изменяются при увеличении минерализации жидкостей: ε' — по отрицательной; ε'' — по положительной зависимости, причем $\varepsilon''(X)$ — с более высокой достоверностью.

Линейная функция $\varepsilon''(\varepsilon')$, построенная на основе анализа зависимостей $\varepsilon'(S)$, $\varepsilon''(S)$, имеет следующий вид (рис. 5):

$$\varepsilon'' = 320 - 4.17 \cdot \varepsilon', \quad \sigma = 6.11.$$

Эта зависимость устанавливает соответствие между мнимой и реальной частями КДП минерализованных вод и, таким образом, позволяет провести калибровку их измеренных значений.

Все измеренные параметры жидкостей хорошо коррелируют между собой (табл. 3), что позволяет применять их как индикаторы уровня минерализации, а следовательно, и наличия примесей в конденсационной воде. Отметим, что наиболее высокая корреляция характеристик жидкости установлена для конденсационной воды: с возрастанием ее доли снижаются УЭП, коэффициенты преломления и поглощения, а также мнимая часть КДП, а коэффициент поглощения и действительная часть КДП увеличиваются. Соответственно, с ростом доли техногенной жидкости корреляционные зависимости меняют знак

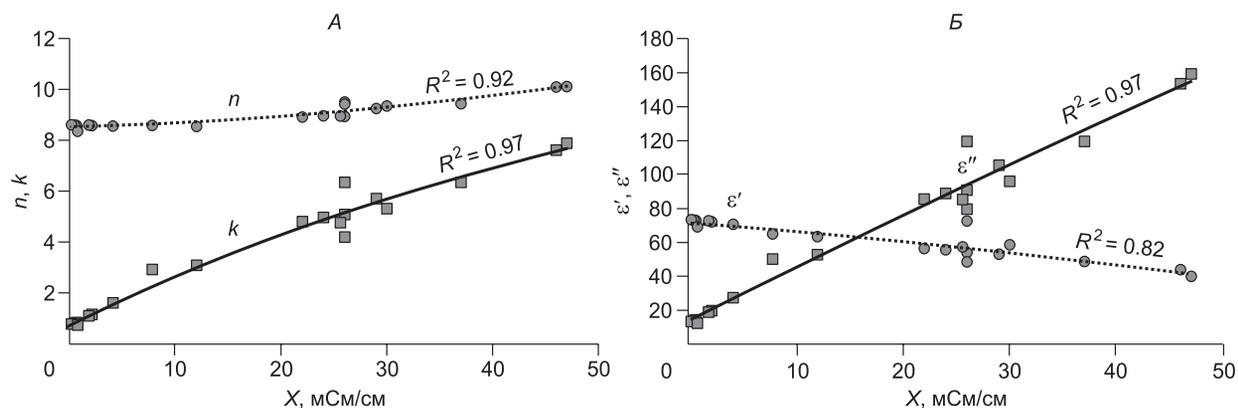


Рис. 4. Зависимости показателей преломления (n) и поглощения (k) (А), действительной (ε') и мнимой (ε'') частей КДП (Б) жидкостей от электропроводности.

Таблица 2. Диэлектрическая проницаемость и радиоизлучательные параметры жидкостей

Номер пробы	ε'	ε''	n	k	χ
H ₂ O	73	14	8.6	0.79	0.37
1	65	50	8.6	2.9	0.34
2	56	86	8.9	4.8	0.29
3	72	20	8.6	1.2	0.37
4	73	19	8.6	1.1	0.37
5	73	14	8.6	0.84	0.37
6	73	80	9.5	4.2	0.30
7	73	14	8.6	0.81	0.37
8	49	120	9.4	6.3	0.25
9	71	27	8.6	1.6	0.36
10	40	159	10	7.9	0.22
11	54	91	8.9	5.1	0.29
12	63	53	8.5	3.1	0.34
13	59	99	9.3	5.2	0.28
14	39	71	9.0	4.8	0.29
15	48	120	9.4	6.4	0.25
16	56	89	9.0	5.0	0.29
17	53	105	9.3	5.7	0.27
18	73	13	8.6	0.78	0.37
19	44	154	10	7.6	0.22
20	69	12	8.4	0.74	0.38

на обратный. При этом изменение доли пластовой воды не связано ни с одним параметром значимой корреляции.

Для анализа зависимостей радиоизлучательных параметров от типов вод был выбран коэффициент излучения (χ), измеряемый дистанционно. Установлено, что по значениям χ можно определять долевое соотношение разных типов вод (конденсационной, техногенной, пластовой), однако это возможно только в определенных диапазонах относительного содержания того или иного типа (рис. 6, 7).

Зависимость χ (S_{COND}) аппроксимируется прямой с достаточно высокой степенью достоверности при условии, что добавки в конденсационную воду представлены исключительно техногенными растворами (см. рис. 6, А, серые кружки, пунктирная линия). С уменьшением минерализации вод происходит возрастание значений χ_{COND} до значений коэффициента излучения в дистиллированной или пресной воде χ_{DIST} . Жидкости, для которых в конденсационной воде присутствует в значительных количествах пластовая вода, характеризуются более высокими значениями χ и хаотично размещаются на диаграмме χ (S_{COND}) в верхнем левом сегменте (черные квадраты см. рис. 6, А). Даже небольшая доля пластовой воды ведет к «размыванию» строгой зависимости и снижению достоверности аппроксимации (см. рис. 6, А, сплошная линия). В этом случае значения χ определяются изменениями концентраций хлорида кальция как компонента, обуславливающего долю техногенных растворов (см. рис. 6, Б). С ростом концентраций CaCl₂ коэффициент излучения закономерно снижается (см. рис. 6, Б, серые кружки, пунктирная линия), но поступление пластовой воды в конденсационную (черные квадраты, см. рис. 6, Б) сопровождается снижением χ , и линейная зависимость в этом случае имеет низкую степень достоверности (сплошная линия).

Это означает, что значения коэффициента излучения χ отражают не только общую минерализацию растворов, но и их химический состав. Наличие основного компонента пластовых вод (NaCl) ведет к увеличению значений χ по зависимости, отличной от χ (CaCl₂).

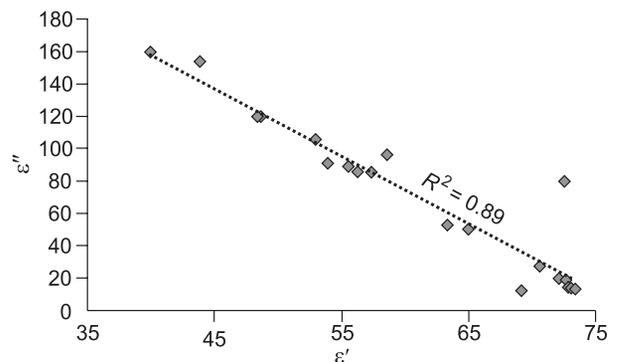


Рис. 5. Зависимость $\varepsilon''(\varepsilon')$ для исследуемых жидкостей.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции диэлектрических параметров жидкостей с УЭП и долей разных типов вод

Параметр	УЭП	n	k	ϵ'	ϵ''	χ
n	0.93					
k	0.98	0.89				
ϵ'	-0.91	-0.80	-0.95			
ϵ''	0.99	0.92	1.00	-0.95		
χ	-0.99	-0.93	-0.99	0.93	-1.00	
S_{COND}	-0.92	-0.85	-0.90	0.80	-0.90	0.91
S_{PLAST}	0.37	0.31	0.38	-0.23	0.35	-0.39
S_{TECH}	0.73	0.71	0.70	-0.75	0.73	-0.70

Значения коэффициента излучения снижаются с возрастанием ее доли (см. рис. 7, Б, серые кружки, пунктирный овал); значения χ также уменьшаются, когда в жидкости присутствует техногенная вода, а доля пластовой понижается (см. рис. 7, Б, черные квадраты, сплошной овал). Если пластовой воды нет, значения χ полностью определяются соотношениями конденсационной и техногенной воды.

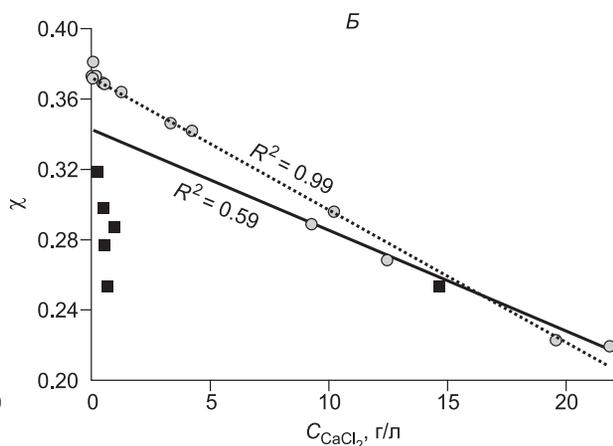
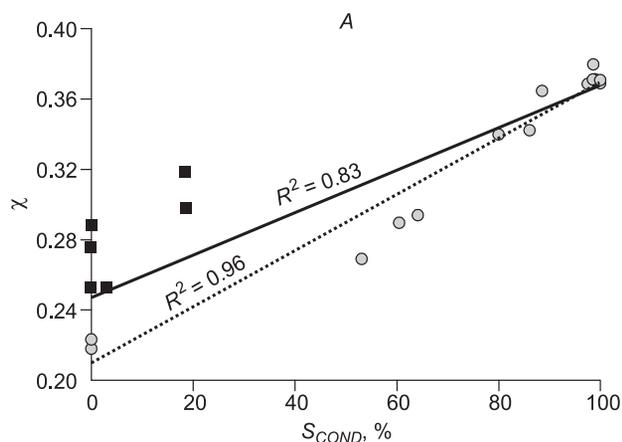


Рис. 6. Зависимости коэффициента излучения от относительной доли участия конденсационных вод (А) и хлорида кальция (Б) в жидкости.

Описание см. в тексте.

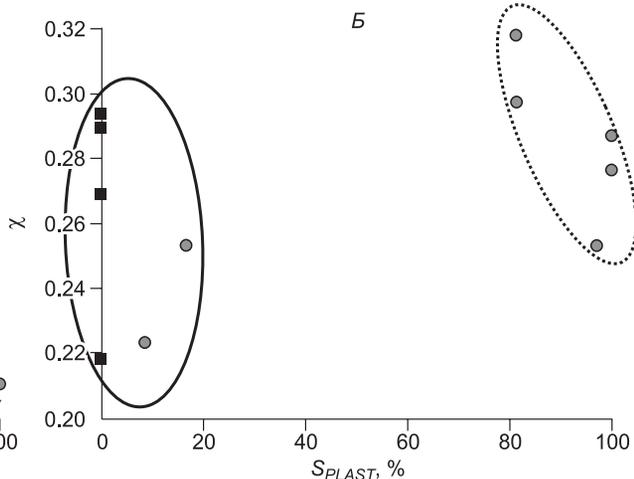
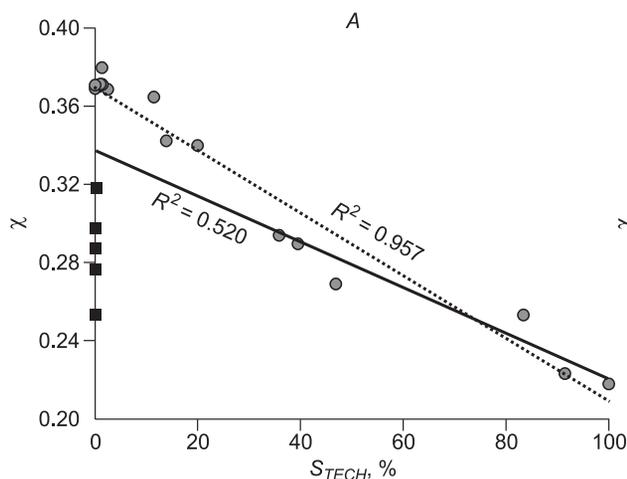


Рис. 7. Зависимости коэффициента излучения от долевого участия техногенных (А) и пластовых (Б) вод.

Описание см. в тексте.

Установленные зависимости измеренных коэффициентов излучения могут быть использованы для качественной оценки процентного содержания конденсационной и техногенной воды в жидкости.

ВЫВОДЫ

1. Для исследованных проб гидрохимические характеристики жидкости, выносимой из газовых скважин, отражают их происхождение. Увеличение минерализации и, соответственно, электропроводности происходит из-за добавки техногенной и/или пластовой воды в конденсационную. Са и Na могут служить индикаторами типа вод: увеличение концентрации первого означает рост доли техногенной, а Na — пластовой воды.

2. По установленным линейным зависимостям электропроводности содержания Na и Са от относительных долей конденсационной, пластовой и техногенной воды возможно определение генетической принадлежности вод и их относительных долей в жидкости.

Диэлектрические и радиоизлучательные параметры жидкостей заметно различаются в зависимости от процентного содержания и химического состава конденсационных, пластовых и техногенных вод. Установлены зависимости диэлектрических и радиоизлучательных параметров пластовых, техногенных и конденсационных вод от минерализации. Предложены способы дифференциации разных типов воды из скважин по их диэлектрическим параметрам.

3. Авторы благодарят ведущего инженера ООО «Газпром добыча Надым» К.И. Павенского, сформировавшего выборку жидкостей; научных сотрудников: к.г.-м.н. ИНГТ СО РАН А.В. Еделева и Н.А. Абросимову, а также аспиранта Е.О. Рыбкину за участие в пробоподготовке. На всех этапах работы обсуждение и ценные замечания были сделаны координатором ВМНК «ЯМАЛ» д.т.н. И.Н. Ельцовым. Авторы глубоко благодарны рецензентам: д.г.-м.н., профессору Л.А. Абуковой и к.г.-м.н. Д.А. Новикову за детальный анализ статьи и конструктивные замечания. Техническая поддержка осуществлялась вед. инж. О.Н. Кушнаренко.

Часть экспериментальных работ выполнена в рамках РФФИ (грант 15-05-05018).

ЛИТЕРАТУРА

Абукова Л.А., Абрамова О.П., Варягова Е.П. Гидрогеохимический мониторинг разработки месторождений углеводородов // Георесурсы. Геоэнергетика. Геополитика, 2015, вып. 2(12), эл. № ФС77-36038.

Бобров П.П., Миронов В.Л., Репин А.В. Спектры диэлектрической проницаемости нефтеводонасыщенных песчано-глинистых пород различного минералогического состава и релаксационные свойства воды в этих породах // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (7), с. 1359—1368.

Комаров С.А. Радиофизические методы дистанционного зондирования почвенного покрова: Автореф. дис... д.ф.-м.н. Барнаул, АлтГУ, 1998, 37 с.

Комаров С.А., Миронов В.Л., Романов А.Н. Аэрокосмическое зондирование гидрологического состояния почв радиофизическими методами. Барнаул, Изд-во АлтГУ, 1997, 101 с.

Кротиков В.Д., Пелюшенко С.А., Ракуть И.В., Савельев В.Ю. Моделирование отражения микроволн от поверхности акваторий с разливом обводненной нефти // Изв. вузов. Радиофизика, 2015, т. 58, № 1, с. 21—30.

Лилеев А.С., Лященко А.К., Харькин В.С. Диэлектрические свойства водных растворов иттрия и меди // Журнал неорганической химии, 1992, т. 37, вып. 10, № 6, с. 2287—2291.

Лященко А.К., Новскова Т.А., Лилеев А.С., Засецкий А.Ю., Гайдук В.И. Вращательное движение молекул воды в гидратных оболочках ионов и широкополостные диэлектрические спектры растворов электролитов // Журнал физической химии, 1993, т. 67, № 8, с. 1615—1622.

Методическое руководство по определению компонентного состава природных и сточных вод на объектах газовой промышленности. М., ООО «Информационно-рекламный центр газовой промышленности». М., 2005, 40 с.

Митник Л.М. Излучательные характеристики водной поверхности. Серия Океанология (обзор). Обнинск, Информационный центр, 1978, 66 с.

Романов А.Н. Влияние массовой концентрации минеральных солей на диэлектрические характеристики их водных растворов в микроволновом диапазоне // Радиотехника и электроника, 2004, т. 49, № 9, с. 1157—1163.

Садовский И.Н., Кузьмин А.В., Шарков Е.А., Сазонов Д.С., Пашинов Е.В., Ашеко А.А., Батулин С.А. Анализ моделей диэлектрической проницаемости водной среды, используемых в задачах дистанционного зондирования акваторий. М., ИКИ РАН, 2013, 59 с.

Шарков Е.А. Радиотепловое дистанционное зондирование земли: физические основы. Т. 1. М., ИКИ РАН, 2014, 544 с.

Эпов М.И., Бобров П.П., Миронов В.Л., Репин А.В. Диэлектрическая релаксация в глинистых нефтесодержащих породах // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (9), с. 1302—1309.

Klein A., Swift C. An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies // IEEE Trans. Antennas Propagation, 1977, v. 25, № 1, p. 104—111.

May E.F., Edwards T.J., Mann A.G., Manning D.K. Density, dielectric constant and PVT measurements of a gas condensate fluid // J. Petrol. Sci. Engin., 2004, v. 41, № 4, p. 297—308.

Francisca F., Yun T.S., Ruppel C., Santamarina J.C. Geophysical and geotechnical properties of near-seafloor sediments in the northern Gulf of Mexico gas hydrate province // Earth Planet. Sci. Lett., 2005, v. 237, № 3—4, p. 924—939.

Stogrin A. Equations for calculating the dielectric constant for saline water // IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1971, v. 19, № 8, p. 733—736.

*Рекомендована к печати 1 сентября 2016 г.,
В.А. Каширцевым*

*Поступила в редакцию
29 апреля 2016 г.*