
УДК 622.32

И.Г. Низаева¹, Ю.Ф. Макогон²

¹ Башкирский государственный университет, Россия

² Техасский АМ университет, США

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА НЕТРАДИЦИОННЫЕ ВИДЫ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

В работе рассматривается возможность использования электромагнитных полей для разработки нетрадиционных видов углеводородного сырья, в частности, газовых гидратов. Дан обзор работ, посвященных диэлектрическим свойствам газовых гидратов. Приведены некоторые результаты научных исследований по данной проблеме, полученные группой ученых Башкирского государственного университета под руководством профессора Ф.Л. Саяхова. Затронуты вопросы теоретического и экспериментального изучения влияния постоянного электрического поля на кинетику образования гидратов.

Ключевые слова: *газовые гидраты, диэлектрические свойства, высокочастотное электромагнитное поле.*

Современные мировые энергетические потребности обеспечиваются в основном нефтью и газом (на 60 %). Время выхода на заключительный этап освоения углеводородов неодинаково для разных странах, но для их большинства оно настанет при текущих объемах добычи нефти в пределах 2030—2050 гг., при условии достаточного заметного воспроизводства их запасов. Однако уже около 20 лет добыча нефти в мире опережает прирост ее запасов [1]. Это неизбежно приводит к необходимости более активной разработки нетрадиционных видов углеводородного сырья (тяжелые и высоковязкие нефти, нефтяные пески и битумы, сланцевые нефти в глинистых отложениях, газогидраты и водорастворенные газы в подземной гидросфере, сланцевые газы и газы угленосных отложений и т.д.).

Особое место в ряду нетрадиционных видов углеводородного сырья принадлежит газовым гидратам. По современным оценкам потенциальные ресурсы газа, сосредоточенного в газогидратных залежах, составляют величину порядка $1,5 \times 10^{16} \text{ м}^3$ [2]. Кроме того, остается актуальной задача борьбы с техногенными газовыми гидратами, осложняющими добычу и транспортировку нефти и газа.

© И.Г. НИЗАЕВА, Ю.Ф. МАКОГОН, 2013

Особую остроту эта проблема приобрела с выходом на добычу традиционных углеводородов в зоне распространения многолетнемерзлых пород и в акваториях Мирового океана. Все большую актуальность приобретает задача экологического мониторинга процессов разложения и образования гидратов природных газов [3].

Учеными многих стран ведется поиск и разработка современных технологий, которые позволят рентабельно разрабатывать месторождения нетрадиционных видов углеводородного сырья.

Одними из перспективных для разработки месторождений тяжелых и высоковязких нефтей, битумов и газовых гидратов могут оказаться технологии, основанные на эффектах, возникающих при взаимодействии электромагнитных полей с продуктивными пластами.

Следует отметить, что впервые на возможность применения высокочастотного электромагнитного (ВЧ ЭМ) поля для нагрева продуктивного пласта указывается в патенте [4].

Теоретические, экспериментальные и промышленные исследования возможности применения мощных ВЧ и сверхвысокочастотных (СВЧ) ЭМ полей в процессах добычи, подготовки, транспорта и переработки нефти и газа в России проводились группой исследователей под руководством профессора Саяхова Ф.Л. начиная с конца 60-х годов.

На начальном этапе группой Саяхова Ф.Л. были выполнены экспериментальные исследования диэлектрических характеристик различных нефтегазовых объектов (нефтегазовые продуктивные породы, нефти, их компоненты и фракции, водонефтяные эмульсии), поскольку в большинстве случаев эти среды являются в ЭМ отношении диэлектриками [5]. С помощью разработанных оригинальных методик измерения и устройств проведены исследования в широком диапазоне частот 50 кГц—30 ГГц, в интервале температур 273—373 К и давлений 0—5 МПа. Были определены значения диэлектрических характеристик, области их частотной дисперсии и сделан вывод о том, что при допустимых уровнях мощности ЭМ поля, в данных средах можно ожидать заметных для осуществления технологических процессов термоэлектрогидродинамических эффектов. Исследования влияния ВЧ полей на процессы фильтрации позволили обнаружить явление интенсификации фильтрации углеводородных вязких жидкостей в ВЧ и СВЧ ЭМ полях, обусловленное объемным характером нагрева и заметным снижением вязкости флюида; изменение эффективной вязкости при течении высоковязкой нефти в капиллярах; явление перераспределения давления в насыщенной пористой среде и развитие термоупругих эффектов; уменьшение поверхностного натяжения для нефти и воды на границе с воздухом за счет ориентационной поляризации молекул в ВЧ ЭМ поле.

Логическим продолжением этих работ было создание на уровне авторских свидетельств устройств и способов разработки залежей нефти и битумов на основе ЭМ воздействия на пласт через скважину. Эти устройства в начале 70-х годов успешно прошли промышленные испытания на Ишимбайском нефтяном месторождении. В 1979 году была осуществлена скважинная добыча битумной нефти на пласт ВЧ ЭМ полем.

Параллельно с экспериментальными и промышленными исследованиями Ф.Л. Саяхов работал над теорией взаимодействия ВЧ и СВЧ ЭМ излучения с продуктивными пластами. Эти исследования велись в двух направлениях: про-

цесс теплопереноса в многофазных средах при взаимодействии с ЭМ излучением и развитие ВЧ ЭМ термогидродинамики. По первому направлению сформулирована и детально проанализирована система уравнений неизотермической фильтрации вязкого углеводородного флюида при воздействии на пористую среду ЭМ излучения. Классическая система уравнений фильтрации была дополнена уравнениями ЭМ поля в пористой среде и электродинамическими уравнениями состояния. На основе полученной системы уравнений сформулированы, аналитически и численно решены задачи по расчету температурного поля при ВЧ нагреве пластов, теплофизические задачи о диссоциации газовых гидратов и расплавлении битума и т.д. Второе направление является логическим развитием ЭМ термогидродинамики квазистатических полей Л.Д. Ландау на область высоких частот и послужило основой создания нового научного направления [6].

В 80-х годах Саяхов Ф.Л. предложил идею применения ВЧ и СВЧ ЭМ полей не только для борьбы с техногенными гидратами, но и для разработки газогидратных залежей. В работах [7, 8] сформулированы физические основы воздействия ЭМ полей на гидратонасыщенные среды. Задача о нагреве газовых гидратов ВЧ ЭМ полем привела в дальнейшем к формулировке обобщенной задачи Стефана [9]. Обобщение классической задачи математической физики Стефана заключалось в том, что в уравнение теплопроводности включаются объемные тепловые источники, возникающие за счет диссипации энергии ЭМ поля в тепло. Дальнейшие исследования показали, что процесс диссоциации гидрата в поле ЭМ излучения имеет не фронтовой, а объемный характер, то есть происходит в области конечных размеров [10–13].

Расчет технологических параметров воздействия электромагнитных полей на гидратонасыщенные среды невозможен без изучения электрофизических свойств газовых гидратов, и, главным образом, диэлектрических свойств.

Диэлектрические свойства газовых гидратов. Основная масса работ, посвященных исследованиям диэлектрических свойств гидратов, принадлежит группе ученых, работавших под руководством Девидсона. Ему же принадлежит наиболее полный обзор по диэлектрическим исследованиям гидратов различных веществ [14].

Для изучения диэлектрических свойств гидратов в указанных работах применялись методы мостовые, резонансные и диэлектрической релаксации. Были изучены диэлектрические свойства гидратов следующих веществ: тетрагидрофурана, триметилен оксида, ацетона, циклобутанона [15], этилен оксида [16], 1,3-диоксолана, пропиленоксида, дигидрофурана и других [17].

В работе [15] измерения проводились от нескольких герц до 1 МГц, в [16] — от 0,04 кГц до 100 МГц, в работе [18] — от 150 МГц до 10 ГГц.

Диэлектрические свойства гидратов исследовались на широком диапазоне температур. От 1,8 К до 270 К проводились работы в [15], от 118 К до 270 К — в [17], от 233 К до 278 К — в [16] и от 2,5 до 300 К — в работе [19].

Анализ указанных работ показывает, что гидраты в отношении электромагнитных свойств представляют собой слабо проводящий немагнитный диэлектрик с потерями, характеризующийся комплексной диэлектрической проницаемостью

$$\epsilon = \epsilon' - j \epsilon''; \quad j = \sqrt{-1},$$

где ϵ — комплексная диэлектрическая проницаемость; ϵ' , ϵ'' — соответственно действительная (реальная) и мнимая части комплексной диэлектрической

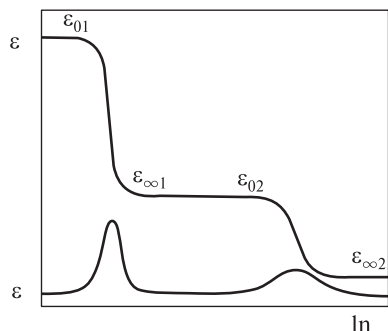


Рис. 1. Зависимость реальной ϵ' и мнимой ϵ'' частей диэлектрической проницаемости от частоты f

проницаемости. Для постоянных полей диэлектрическая проницаемость ϵ (ее еще называют статической диэлектрической проницаемостью) совпадает с действительной частью комплексной диэлектрической проницаемости: $\epsilon = \epsilon'$.

На рис. 1 приведено типичное для гидратов схематическое изображение частотной зависимости реальной и мнимой частей диэлектрической проницаемости [17]. Для гидратов любых веществ данные зависимости имеют две характерные области, называемые областями диэлектрической дисперсии. Левая область соответствует процессам поляризации молекул воды, правая — гостевым молекулам.

На низких частотах (частота лежит ниже области дисперсии) реальная часть комплексной диэлектрической проницаемости обозначается нижним индексом «0», соответственно для первой и второй областей дисперсии это ϵ_{01} и ϵ_{02} . На высоких частотах (частота лежит выше области дисперсии) используется нижний индекс «∞», соответственно для первой и второй областей дисперсии это $\epsilon_{\infty 1}$ и $\epsilon_{\infty 2}$.

На низких частотах при сравнении переориентационных скоростей образующих гидрат молекул оказывается, что основной вклад в реальную часть диэлектрической проницаемости дает переориентация диполей воды, а вклад от переориентации молекул включений — гораздо меньше. С ростом частоты реальная часть диэлектрической проницаемости уменьшается довольно резко, и имеет место сильная диэлектрическая абсорбция при частотах, сравнимых с релаксационными скоростями молекул воды (порядка кГц при 200 К). При более высоких частотах переориентация молекул воды не увеличивает вклада в реальную часть диэлектрической проницаемости, которая остается постоянной $\epsilon_{\infty 1} = \epsilon_{02}$ на широком частотном диапазоне вплоть до появления более далекой дисперсно-абсорбционной области (в районе 10 ГГц при 200 К), связанной с переориентацией дипольных молекул включений. За этой областью реальная часть диэлектрической проницаемости $\epsilon_{\infty 2}$ не содержит вкладов от релаксаций молекул.

Следует отметить, что хотя несколько диэлектрических измерений были проведены на сверхвысоких частотах, в которых была определена диэлектрическая абсорбция молекул включений в гидратах тетрагидрофурана и ацетона в гигагерцевом диапазоне при 90 К, неточность и неудобство, связанные с измерением слабой и широкой абсорбции, привели к необходимости измерений на сильно охлажденных образцах для перемещения абсорбционных частот в мегагерцевую область и ниже. При таких низких температурах (порядка 20 К) абсорбционные кривые очень широкие. Это является основной чертой релаксации молекул-гидратообразователей в клатратных соединениях.

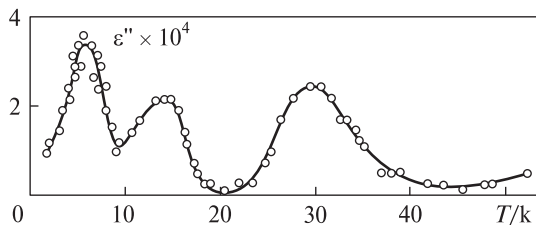


Рис. 2. Области диэлектрической абсорбции, наблюдаемые для природного газового гидрата на частоте 10 кГц

Диэлектрические измерения в ВЧ области были проведены и для некоторых неполярных молекул-гидратообразователей при низких температурах. И, несмотря на малые дипольные моменты молекул включений, абсорбционно-дисперсная область, соответствующая релаксации этих молекул, была измерена для пропана и изобутана [14].

В работах [14,18,19] отмечается, что гидраты всегда выделяются среди твердых структур высокой вращательной подвижностью молекул включений. Это можно объяснить почти сферической формой ячеек и всегда четырехгранно связанной структуры водной решетки, из-за которой результирующие электрические поля, обусловленные диполями молекул воды, относительно малы вблизи центров ячейки.

Кривые комплексной диэлектрической проницаемости в области переориентации молекул воды в гидратах II структуры [15], для которых были проведены точные измерения, все имеют сходство. Ни амплитуда, ни форма водной абсорбционно-дисперсной области не зависят от природы гидратообразующих молекул. Но следует отметить, что релаксационные скорости в значительной степени изменяются по величине. В таблице приведены экспериментальные данные по низкочастотным диэлектрическим свойствам (для первой области дисперсии) некоторых гидратов II структуры для трех значений температуры по шкале Цельсия (t , °C). Экспериментальные значения несколько отличаются от действительных значений из-за наличия некоторой жидкой фазы, богатой эфиром, а при низких температурах — воздушных зазоров и трещин в образцах (THF — тетрагидрофуран, DHF — дигидрофуран, PO — пропиленоксид, TMO — триметиленоксид).

Относительно высокие значения диэлектрической проницаемости (соответственно ≈ 58 и ≈ 53 при 0 °C) на низких частотах объясняются связью между

Экспериментальные данные по низкочастотным диэлектрическим свойствам некоторых гидратов II структуры

Формула гидрата	t , °C	ϵ_0	ϵ_∞
THF \times 16,7 H ₂ O	-1,4	61,1	—
	-40,5	68,3	—
	-70,0	74,3	4,70
THF \times 16,7 H ₂ O	-22,5	61,4	—
	-48,4	67,6	—
	-83,5	80,2	4,85
DHF \times 16,7 H ₂ O	-20,8	66,2	—
	-58,2	75,8	4,60
	-95,4	86,0	4,90
PO \times 16,7 H ₂ O	-6,3	67,0	—
	-53,8	78,5	—
	-84,9	91,0	5,74
PO \times 16,7 H ₂ O	-43,3	74,0	—
	-93,2	87,0	5,90
	-196,0	—	8,48
TMO \times 16,7 H ₂ O	-24,6	63,4	—
	-49,0	65,0	—
	-91,0	67,0	5,59
TMO \times 16,7 H ₂ O	-24,6	50,6	—
	-74,2	44,3	—
	-101,3	45,1	11,0

направлениями диполей воды в решетке, образованной водородными связями, как это наблюдается, например, для льда (≈ 92 при 0°C).

На низкочастотном диапазоне, включающем водную релаксацию, была исследована температурная зависимость (от 100 К до точек плавления) для диэлектрической проницаемости. В [14] приведены следующие формулы зависимости от температуры соответственно для гидратов II и I структуры:

$$\varepsilon_{01} = \varepsilon_{\infty 1} + \frac{14900}{T} ; \varepsilon_{01} = \varepsilon_{\infty 1} + \frac{13300}{T} ,$$

где T — абсолютная температура в градусах Кельвина; ε_{01} и $\varepsilon_{\infty 1}$ — реальная часть комплексной диэлектрической проницаемости для первой области дисперсии, обусловленной водной релаксацией, соответственно до и после области дисперсии.

Следует упомянуть одну из немногих работ, посвященных исследованию диэлектрических свойств образцов природного газа. В работе [20] проведены диэлектрические измерения неразложившегося природного газового гидрата второй структуры в придонном керновом материале, извлеченном вблизи Мексики. Данные измерения были выполнены при низких температурах, вплоть до 2 К. На рис. 2 видны слабые диэлектрические потери, наблюдаемые при низких температурах. По вертикальной оси отложена мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости, по горизонтальной оси — абсолютная температура в градусах Кельвина. Из трех разрешаемых пиков, наблюдаемые при 14 и 30 К могут быть отнесены к абсорбции слабо поляризованных молекул пропана и изобутана при данных температурах.

Таким образом, несмотря на то, что исследованы достаточно подробно диэлектрические свойства гидратов значительного числа веществ, все же, многие вопросы, касающиеся поведения гидратов во внешних ВЧ и СВЧ ЭМ полях еще не изучены. Во-первых, исследования диэлектрических характеристик в работах [15—19] проводились, главным образом, при низких температурах, что приводило к смещению абсорбционно-дисперсионных зон в область более низких частот. Во-вторых, в основном исследовались гидраты химических веществ, не встречающихся в природных условиях в чистом виде. В работе [20] изучались образцы гидрата природного газа, но также при низких температурах.

Поэтому представляет особый интерес исследование диэлектрических свойств газовых гидратов компонентов природного газа в термодинамических условиях, близких к естественным, с целью использования полученных данных при разработке газогидратных залежей воздействием ВЧ ЭМ поля.

Одной из первых российских работ, посвященных исследованию диэлектрических свойств гидратов газов, входящих в состав природного газа, следует отметить статью [21]. Данная работа выполнена группой Саяхова Ф.Л. совместно с Макогоном Ю.Ф. Авторами проведены исследования в диапазоне частот от 50 кГц до 1 ГГц с помощью полностью перестраиваемого коаксиального резонатора при температуре $1-2^\circ\text{C}$ и давлениях, соответствующих давлению образования гидрата пропана (0,5—0,6 МПа). Измерения при положительных температурах гарантировали отсутствие в образцах трещин и вкраплений льда. Значимость данной работы заключается не только в том, что впервые изучались диэлектрические свойства гидрата одного из основных компонентов природного газа при положительных температурах и давлениях, соответствующих условиям гидратообразования.

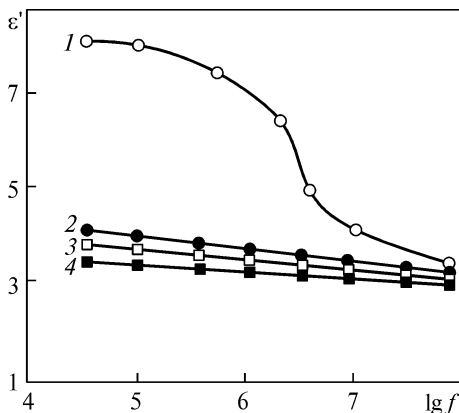


Рис. 3. Частотная зависимость действительной части комплексной диэлектрической проницаемости гидрата пропана (кривая 1) и льда (2, 3 — соответственно лед, полученный из 0,1 % и 0,01 % раствора NaCl в дистиллированной воде; 4 — лед, полученный из природной воды)

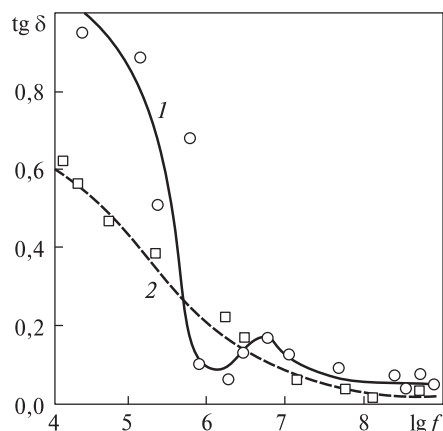


Рис. 4. Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь для гидрата пропана (кривая 1) и льда (кривая 2)

Диэлектрические свойства гидрата пропана сравнивались с аналогичными свойствами льда. Весьма актуальной является проблема разделения пород, насыщенных льдом, от пород, заполненных газовыми гидратами, при проведении геофизических исследований в скважинах, предположительно пересекающих газогидратные пласты. В природных условиях газовые гидраты в основной своей массе находятся при термодинамических условиях, близких к условиям гидратообразования.

Исследования показали (рис. 3), что для гидрата пропана, начиная с частоты 1 МГц и, примерно, до 5 МГц наблюдается значительная дисперсия (уменьшение) действительной части комплексной диэлектрической проницаемости ϵ' . Для льда также наблюдается частотная зависимость диэлектрической проницаемости, но эта зависимость слабо выражена.

В этой области соответственно обнаружено уменьшение тангенса угла диэлектрических потерь ($tg\delta$) (рис. 4). Но на частоте порядка 8 МГц наблюдался максимум, который, по мнению авторов, связан с потерями при ориентационной поляризации молекул воды в газовом гидрате.

Наличие максимума диэлектрических потерь газового гидрата на частотном диапазоне 1—20 МГц и значения $tg\delta$ порядка 0,15—0,19 является хорошей предпосылкой для использования ЭМ полей для нагрева гидратонасыщенной среды. Во-первых, максимум диэлектрических потерь соответствует максимальному переходу энергии ЭМ волн в тепло. Во-вторых, на данном частотном диапазоне затухание ЭМ волн происходит на расстоянии 10—30 метров, что позволяет прогревать призабойную зону пласта на соответствующие расстояния (следует отметить, что это расстояние, в первую очередь, определяется диэлектрическими свойствами насыщенной породы). И, в-третьих, частота 13,56 МГц является разрешенной в большинстве стран для использования в промышленности и, соответственно, во многих странах выпускаются мощные промышленные ВЧ установки, работающие на этой частоте.

Исследование диэлектрических свойств газового гидрата и взаимодействия гидратов с ЭМ полями было продолжено в работе [10]. В частности в [10] изуча-

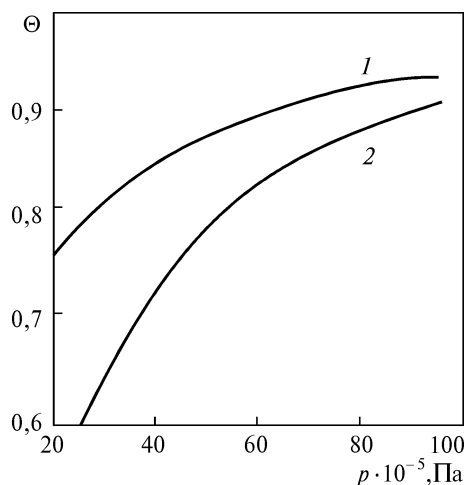
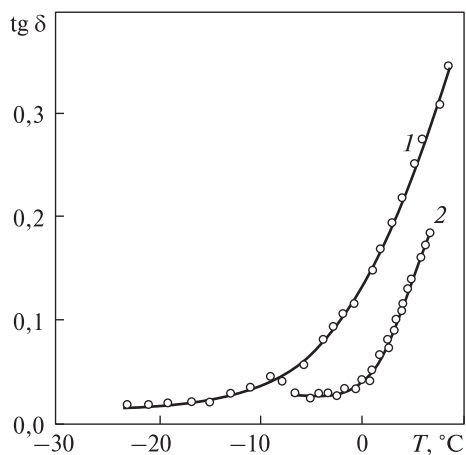


Рис. 5. Температурная зависимости тангенса угла диэлектрических потерь чистого гидрата углекислого газа (кривая 1) и гидрата углекислого газа, полученного в модели пористой среды (кривая 2). Частота 30 МГц

Рис. 6. Зависимость степени заполнения малых полостей гидрата метана: 1 — гидрата, полученный без поля; 2 — гидрат, полученный в постоянном электрическом поле

лась и температурная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь гидрата углекислого газа вблизи фазового перехода. П. Дебаем [22] рассматривался случай температурной аномалии диэлектрических свойств льда при различных температурах. В кристаллах льда для любой молекулы существует несколько возможных положений, и между ними существует некоторое термодинамическое равновесие. Если приложить ЭМ поле, то некоторые положения становятся выгоднее, и возникает поляризация. Установление нового равновесия требует определенного времени релаксации, которое зависит не только от взаимодействия молекул друг с другом, но и от температуры. Аналогичные рассуждения справедливы и для газовых гидратов, которые помимо кристаллической решетки воды, вносящей основной вклад в поляризацию, имеют в своем составе молекулы газа — гидратообразователя, связанные с решеткой Ван-дер-ваальсовыми силами. Вращение молекул газа в полостях кристаллической решетки воды также зависит от температуры и соответственно зависит от температуры вклад в поляризацию данных молекул.

На рис. 5 представлены результаты измерений температурной зависимости для чистого гидрата углекислого газа (кривая 1) [10] и для гидрата, полученного в модели пористой среды (кварцевый песок с пористостью 0,38) [12].

Из рисунка видно, что вблизи фазового равновесия происходит значительное возрастание величины тангенса угла диэлектрических потерь, несмотря на то, что температура фазового перехода при соответствующем давлении не достигнута. Поведение кривой для гидрата в пористой среде аналогично поведению диэлектрических свойств чистого гидрата, хотя тангенс угла диэлектрических потерь имеет меньшее значение. Это объясняется тем, что эта физическая величина на данном диапазоне частот и температур имеет величину порядка 0,02, что меньше, чем у гидрата. Кроме того, кварцевый песок не имеет области дисперсии.

Физические основы взаимодействия высокочастотных электромагнитных полей с гидратонасыщенными средами. Как было сказано выше, газовый гидрат в

отношении электромагнитных свойств представляет собой слабо проводящий немагнитный диэлектрик с потерями. Это обусловлено его строением. Газовый гидрат — твердое соединение, в котором молекулы газа при определенных температурах и давлениях заполняют структурные пустоты кристаллической решетки, образованной молекулами воды, являющимися диполями. Чистая вода — диэлектрик и поэтому в свободном состоянии на сверхвысоких частотах имеет область диэлектрической дисперсии. Так на частоте 23 ГГц мнимая часть комплексной диэлектрической постоянной ϵ'' имеет максимум. В гидрате вода находится в связанном состоянии, поэтому происходит смещение дисперсионной области, соответствующей переориентации дипольных молекул воды, в ВЧ диапазон частот (1—20 МГц) [20]. Молекулы газа, образующие гидрат, связаны с кристаллической решеткой воды Ван-дер-ваальсовскими силами. Эти силы слабее по сравнению с водородными связями, удерживающими молекулы воды в решетке. Поэтому область дисперсии, соответствующая переориентации молекул газа, более широкая и вносит гораздо меньший вклад в диэлектрические свойства гидрата. Этот вклад еще меньше, если молекулы газа, образующего гидрат, не являются полярными. Поэтому для достижения максимальной эффективности ВЧ воздействия на гидратосодержащий пласт необходимо работать на частотах, соответствующих максимуму диэлектрических потерь, соответствующему поляризации молекул воды.

Основные положения и соотношения теории поляризации полярной среды под действием периодического электрического поля были сформулированы П. Дебаем [22]. Данная теория вполне правильно описывает особенности ориентационной поляризации дипольных моментов в области дисперсии. Согласно этой теории при наложении поля диполи ориентируются в направлении поля. Для этого требуется определенное время, называемое временем релаксации τ_p . Если приложенное поле является периодическим с частотой ω и период этого поля $2\pi/\omega$ больше времени релаксации, то диполи успевают ориентироваться по полю. Если период поля меньше времени релаксации, то ориентация диполей не успевает установиться. Следовательно, в области $2\pi/\omega \approx \tau_p$ должна наблюдаться зависимость поляризации от частоты поля и от температуры среды. Именно в этой области частот (в области дисперсии) наблюдаются особенности поляризации и обусловленные ими термогидродинамические процессы при взаимодействии с ЭМ полем. Происходит уменьшение диэлектрической проницаемости, тангенс угла диэлектрических потерь проходит через максимум. В этом случае комплексная диэлектрическая постоянная, так же как и ее действительная и мнимая части, является функцией не только частоты внешнего электромагнитного поля, но и функцией температуры и давления [10, 12].

Как показывает физический анализ и теоретические исследования, электрическое и силовое взаимодействие ВЧ ЭМП с такими средами количественно и качественно характеризуется возникновением в ней распределенных по объему сил, моментов сил электромагнитного происхождения и источников тепла. Выражения для этих физических величин приведены в работах [3, 10, 12,]. Постоянная распространения ЭМ волн, полученная из уравнений Максвелла для диэлектрических сред с потерями, является также величиной комплексной, что связано с затуханием ЭМ волн по мере распространения из-за поглощения в рабочей среде, и также зависит от термодинамического состояния среды. А оно с течением времени изменяется из-за преобразования части энергии ЭМВ в тепло.

Взаимодействие ВЧ ЭМ поля с гидратной средой приводит к изменению термодинамических характеристик диэлектрика. В работе [10] получено выражение для химического потенциала как функции термодинамических параметров физических величин, обусловленных воздействием внешнего поля. Таким образом, воздействие внешнего поля приводит к изменению химических потенциалов контактирующих сред (например, газа в гидратном состоянии и в свободном состоянии). Это, в свою очередь, приводит к смещению равновесной кривой образования гидрата.

Влияние постоянного электрического поля на степень заполнения полостей газового гидрата. В механизме воздействия ВЧ ЭМ поля на диэлектрик можно выделить два основных момента. Первый обусловлен поляризационными процессами, возникающими при наложении разности потенциалов. Второй момент связан с релаксационными явлениями, имеющими место при смене полярности накладываемой разности потенциалов с частотой ω . Известно, что релаксационные процессы в диэлектриках с потерями приводят к возникновению тепловых источников, то есть к изменению термодинамического состояния среды из-за нагрева. Поэтому представляет интерес, прежде всего, исследовать влияние постоянного электрического поля на процессы образования гидратов, которое практически не изменяет температуру среды.

В работе [23] Саяхова Ф.Л. было высказано предположение о влиянии постоянного электрического поля на процесс образования газового гидрата и получено выражение для степени заполнения полостей гидрата в присутствии постоянного электрического поля.

На рис. 6. приведены зависимости степени заполнения малых полостей гидрата метана от давления. Кривая 1 построена по изотерме Ленгмюра для гидрата, полученного в отсутствие поля. Кривая 2 построена в предположении, что гидрат получен в постоянном электрическом поле напряженностью 20 кВ/м. Из рис. видно, что при одном значении давления гидрат, полученный в поле, имеет меньшую степень заполнения полостей. Газовые гидраты стабильны при степени заполнения полостей выше некоторого предельного значения, которому соответствует давление диссоциации гидрата. Следовательно, воздействие постоянного электрического поля приводит к увеличению давления диссоциации. Образование гидрата соответственно начинается при большем значении давления.

Экспериментальное исследование влияния постоянного электрического поля на процессы образования гидратов. Для подтверждения приведенных теоретических выводов возникла необходимость экспериментального исследования влияния внешнего ВЧ ЭМ поля на процессы образования гидратов. Результаты исследований приведены в [10, 24].

Для решения поставленной задачи использовалась ячейка визуального наблюдения, представляющая собой одновременно реакторную камеру и цилиндрический конденсатор. Напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве имела порядок величины, теоретически рассчитанный в работе [12].

При заданных термодинамических условиях в измерительной ячейке выращивался газовый гидрат в отсутствие поля в течение заданного времени. При этом отмечалось время появления первых кристаллов, конфигурация и месторасположение выросших кристаллов. Затем определялось давление диссоциации гидрата. Далее приводился аналогичный эксперимент, но при наличии постоянного электрического поля.

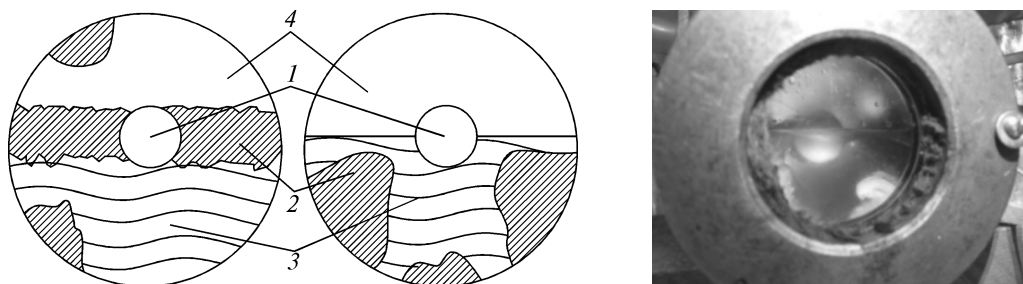


Рис. 7. Форма гидратных образований, полученных без поля (а) и при наличии поля (б): 1 — центральный электрод; 2 — гидрат; 3 — вода; 4 — газ

Рис. 8. Газовые гидраты, полученные в постоянном электрическом поле

В отсутствие поля визуально определяемое появление зародышей кристаллов гидратов начиналось спустя 30—45 минут после создания необходимых термодинамических условий. Дальнейший рост газового гидрата приводил к образованию достаточно равномерного по толщине слоя, полностью покрывающего контакт газ—вода. В некоторых случаях наблюдалось образование отдельных наростов гидрата на стенках корпуса ячейки, как в жидкой, так и в газовой фазе. В присутствии внешнего поля рост гидрата начинался спустя 2—3 часа. Образование кристаллов происходило только вблизи стенок ячейки на контакте газ—вода и в жидкой фазе. Форма растущих гидратных образований напоминала конусы, основания которых лежали на стенках корпуса, а острые пики были направлены к электроду. Возле центрального электрода, где напряженность поля максимальна, газовый гидрат не образовывался вообще. На рис. 7 схематично изображен внешний вид гидратов, полученных без поля (слева) и в присутствии постоянного электрического поля (справа).

Сравнение давлений диссоциации газовых гидратов, образовавшихся в поле и без поля, показало, что наличие поля при неизменной температуре приводит к повышению значения давления диссоциации. В экспериментах, проведенных в статических условиях, это превышение составило около $3 \cdot 10^5$ Па при разности потенциалов 2,5 кВ.

На рис 8. представлена фотография образовавшихся кристаллогидратов в постоянном электрическом поле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якуцени В.П., Петрова Ю.Э., Суханов А.А. Нетрадиционные ресурсы углеводородов — резерв для восполнения сырьевой базы нефти и газа в России. // Нефтегазовая геология. Теория и Практика. — 2009 — (4). — 20 с.
2. Makogon, Y.F., 1982. Perspectives for the development of Gas Hydrate deposits. In: Fourth Canadian Permafrost Conference, Calgary, March 2—6, 1981.
3. Makogon, Y.F., 1997. Hydrates of Hydrocarbons. Penn Well, Tusla, USA. — 516 p.
4. Пат.2757738 США, МКИЗ Е 21 В 43/00. Radiation heating system/ Н.В.Ричей. Опубликовано 07.08.56; НКИ 166—39. — 8 с.
5. Хабидуллин И.Л. Научное творчество Саяхова Ф.Л. Физико-химическая гидродинамика. Уфа, 2004.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. — М. : Физматгиз, 1952.

7. Макогон Ю.Ф., Саяхов Ф.Л., Хабибуллин И.Л. Способ добычи нетрадиционных видов углеводородного сырья // Доклады АН СССР. 1989. — Т. 306. — №4. — С. 941—943.
8. Саяхов Ф.Л., Фатыхов М.А., Насыров Н.М. Исследования разложения гидрата в высокочастотном электромагнитном поле // Межд. конф. Разработка газоконденсатных месторождений. Секция 6. Фундаментальные и поисковые исследования: Тез. докл. — Краснодар, 1990. — С. 37—41.
9. Хабибуллин И.Л., Насыров Н.М. Математическое моделирование диссоциации газовых гидратов в переменном электромагнитном поле // Математический X Всесоюзный семинар «Фильтрация многофазных систем». Новосибирск. 1991. — С. 91—95.
10. Низаева И.Г. Теплофизические особенности взаимодействия высокочастотного электромагнитного поля с газогидратной средой. Диссертация канд. Физ.-мат. Наук. Уфа, 1995. — 170 с.
11. Насыров Н.М., Низаева И.Г., Саяхов Ф.Л. Математическое моделирование явлений тепло-массопереноса в газогидратных залежах в высокочастотном электромагнитном поле // Прикладная механика и техническая физика. 1997. — Т. 38. — № 6. — С. 93—104.
12. Саяхов Ф.Л., Багаутдинов Н.Я. Электротепловые методы воздействия на гидратофарафиновые отложения. — М.: ООО «Недра-Бизнес-центр», 2003. — 119 с.
13. Nizaeva I., Khabibullin I., Makogon Y. Physical bases for the extraction of gas from a gas hydrate accumulation under the effect of a powerful high-frequency electromagnetic field. In: Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2008), Vancouver, British Columbia, CANADA, 2008.
14. Davidson, D.W. «Clathrate Hydrates», in Water // A Comprehensive Treatise, Plenum Press, New York, 2, Chap. 3, 115 (1973).
15. Gough S.R., Hawkins R.E., Morris B., Davidson D.W. Dielectric properties of some clathrate hydrates of structure II. // J. of Phys. Chem. — 1973. — V. 77, № 5. — P. 2969—2976.
16. Davidson D.W., Wilson G.I. The low-frequency dielectric properties of ethylene oxide and ethylene oxide hydrate. Canad. // J. of Chem. 1963. — V. 41. — № 6. — P. 1424—1434.
17. Hawkins R.E., Davidson D.W. Dielectric relaxation in clathrate hydrates of same cyclic ethers // J. of Phys. Chem. 1966. — V. 30. — № 6. — P. 1889—1894.
18. Harvey K.D., Court Mc. F.R., Shurvell H.G. Infrared absorption of the SO₂ clathrate hydrate motion on the SO₂ molecule // Canad. J. of Chem. 1964. — V. 42. — P. 960—963.
19. Child W.C. Molecular interactions of clathrates: A comparison with others condensed phases // Quart. Rev. Chem. Soc. 1964. — V.18. — P. 321—346.
20. Davidson, D.W., et al. 1986. Laboratory analysis of a naturally occurring gas hydrate from sediment of the Gulf of Mexico. Geochim., Cosmochim. Acta. 50 : 619—623.
21. Фатыхов М.А., Саяхов Ф.Л., Макогон Ю.Ф. Результаты исследования диэлектрических свойств газового гидрата пропана // Тр. ЭИВНИИЭгазпрома. Сер. Подготовка, переработка и использование газа. — 1990. — Выпуск 2. — С. 4—6.
22. Дебай П., Закк Г. Теория электрических свойств молекул. 1936. — 144 с.
23. Назмутдинов Ф.Ф., Саяхов Ф.Л. Расчет фазовых равновесий газовых гидратов в электромагнитном поле // XIII школа-семинар по проблемам трубопроводного транспорта. — Уфа, 1990. — С. 48—49.
24. Nizaeva I. Experimental investigation of the impact of electric field on gas hydrate formation. Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011), Edinburgh, Scotland, United Kingdom, July 17—21, 2011.

Статья поступила 14.05. 2013

И.Г. Назаева, Ю.Ф. Макогон

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ НА НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ВУГЛЕВОДНЕВОЇ СИРОВИНИ

У роботі розглядається можливість використання електромагнітних полів для розробки нетрадиційних видів вуглеводневої сировини, зокрема, газових гідратів. Дано огляд робіт, присвячених діелектричним властивостям газових гідратів. Наведено деякі результати наукових досліджень з даної проблеми, отримані групою вчених Башкирського державного університету

під керівництвом професора Ф.Л. Саяхова. Порушено питання теоретичного та експериментального вивчення впливу постійного електричного поля на кінетику утворення гідратів.

Ключові слова: газові гідрати, діелектричні властивості, височастотне електромагнітне поле.

I Nizaeva, Y Makogon

INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC FIELDS ON UNCONVENTIONAL FORMS OF CRUDE HYDROCARBONS

The paper considers the possibility of the use of electromagnetic fields for the development of unconventional hydrocarbon resources, particularly gas hydrates. An overview of the studies dedicated to the dielectric properties of the gas hydrates is provided along with some research results on this scientific problem carried out by the group of scientists of Bashkir state University under the direction of Professor Sayakhov F.L. Besides, the paper touches upon the problem of theoretical and experimental investigations of the influence of a constant electric field on the kinetics of hydrate formation.

Keywords: gas hydrates, dielectric properties, high-frequency electromagnetic field.