

© Г.Г.Исмаилов, Н.М.Сафаров, Р.Г.Нурмамедова, С.Т.Алиев, 2013

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ И СВОЙСТВ ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ

Г.Г.Исмаилов, Н.М.Сафаров, Р.Г.Нурмамедова, С.Т.Алиев

*НИПИ «Нефтегаз», ГНКАР
AZ1012, Баку, просп. Зардаби, 88А*

В статье на основе экспериментальных и теоретических исследований авторами выявлено, что диагностирование структурного состояния водонефтяных эмульсий целесообразно в рамках фрактального анализа, который может служить инструментом для изучения скрытого порядка в динамике неупорядоченных систем, каковыми являются водонефтяные эмульсии. Также предположено, что с применением фрактальной геометрии в дальнейшем возможно установление корреляционных зависимостей между фрактальной размерностью и физико-химическими свойствами водонефтяных систем.

Введение

В последние годы темп нефтедобычи в Азербайджане, тесно связанный с интенсивным освоением новых нефтяных месторождений и совершенствованием существующих методов добычи на месторождениях, находящихся на поздней и завершающей стадии разработки, сопровождается рядом нежелательных последствий и прежде всего значительным снижением добычи нефти при резком росте обводненности скважинной продукции.

В процессах добычи нефти и ее транспортировки по нефтепромысловым трубопроводам происходит интенсивное перемешивание взаимонерастворимых флюидов «вода-нефть», вследствие чего через определенные периоды разработки залежей эти компоненты, соединяясь между собой, создают полидисперсную систему – водонефтяные эмульсии. Образование водонефтяных систем (т.е. эмульсий) ставит определенные актуальные вопросы, подлежащие скорому решению в области добычи, сбора и транспортировки в промысловых условиях. Обводненность нефти вызывает серьезные осложнения (более интенсивное осадкообразование, повышение температуры застывания нефти, увеличение ее вязкости и т.д.) при добыче, сборе и подготовке нефти, а добываемые нефти по своим физико-химическим свойствам, как правило, относятся к реологически сложным жидкостям, в большинстве случаев обладают аномальными свойствами и являются неньютоновскими, что вызывает дополнительные затруднения при разработке нефтяных месторождений, а также при подготовке и транспортировке этих нефтей (Мирзаджанзаде и др., 2005).

В этой связи вопросы образования водонефтяных систем и их диагностирование всегда актуальны и остаются предметом исследования широкого круга ученых и специалистов нефтяной промышленности Азербайджана.

Известно, что пластовая система представляет собой сложную гидродинамическую систему, состояние которой зависит от большого количества факторов, имеющих случайную природу. Это, в свою очередь, отражается на нелинейностях и неоднородностях происходящих в пласте процессов (Мирзаджанзаде, Шахвердиев, 1997).

К сожалению, используемые на сегодняшний день методы обработки промысловой информации не всегда адекватно отражают реальные процессы, происходящие в пластовой системе и в структуре самой добываемой продукции. Для комплексной оценки современного состояния различных природных структур необходимо проводить исследования с использованием инструментов не только классических научных методик, разработанных и апробированных в системе наук о Земле, но и новейших физических, математических, компьютерных знаний и технологий, которые позволяют моделировать и прогнози-

ровать возможные тенденции в изменении структуры и свойств природных объектов. Одним из таких инструментов, позволяющих анализировать современное состояние природных объектов, обусловленность их развития геолого-географическими особенностями территории и антропогенной нагрузкой, является фрактальный анализ.

Исследования последних лет показывают, что явления в средах со сложной неупорядоченной структурой часто обнаруживают масштабную инвариантность-фрактальность пространственных и временных свойств. Нефтяная или газовая залежь со скважинами и всеми коммуникациями представляет собой сложную динамическую систему, для проектирования, анализа и управления которой необходимы новые подходы, основанные на принципах и методах теории диссипативных систем. Динамика многих технологических процессов нефтедобычи носит колебательный характер, и поэтому актуальным при изучении таких процессов является применение методов, позволяющих на основе анализа особенностей колебаний оценить состояние, степень неравновесности процессов и своевременно принять обоснованное решение по их управлению (Олемской, 2009). Само понятие фрактал (термин происходит от латинского слова *fractus*, что означает «делить, разбивать на части») было введено французским математиком польского происхождения Бенуа Мандельбротом в семидесятые годы. По мнению Мандельброта, «Фракталом называется структура, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому» (Mandelbrott, 1982). Другими словами, фрактал – геометрическая форма, которая может быть разделена на части, каждая из которых – уменьшенная версия целого. Фундаментальные принципы фрактальной теории рассмотрены в трудах Б.Мандельбротта, М.Шредера, Е.Федера, Р.М.Кроновера, Х.О.Пайтгена, П.Х.Рихтера, А.Д.Морозова, С.В.Божокина, Д.А.Паршина и др. (Федер, 1991; Mandelbrott, 1982). Строгое определение фрактальной размерности восходит к работам Г.Минковского и Ф.Хаусдорфа. В реальных процессах и объектах фрактальные структуры образуются за счет кластерообразования при агрегации отдельных частиц, осадкообразования, неустой-

чивости фронта вытеснения из пористой среды одной жидкости другой, перемешивания жидкостей и т.д.

Динамические процессы, для которых имеет место масштабная инвариантность, подчиняются законам фрактальной геометрии. Фрактальность можно наблюдать в поведении таких временных процессов нефтегазодобычи, как колебания дебита, давления и т.д., когда при уменьшении шага замеров выявляются все новые особенности изучаемых параметров. Характер их колебаний зависит как от внешних воздействий, так и от неравновесных процессов фильтрации многофазных систем и несет в себе информацию о состоянии и поведении пластовой системы. (Сулейманов, 2006). В частности, напряженные крупномасштабные фрактальные структуры возникают при закачке в пласт воды, газа и других агентов, поддерживающих пластовое давление. Наличие фрактальных структур может быть связано с загрязнением прискважинных зон пласта. Очистка этих зон сводится к разрушению этих фракталов и требует значительных затрат времени и средств.

Определение фрактальных характеристик технологических показателей работы скважин позволяет проводить раннее диагностирование изменения состояния системы «пласт-скважина» и осуществлять своевременное регулирование режима работы скважин с целью оптимизации процесса разработки.

Необходимо отметить, что фрактальная размерность содержит сжатую количественную информацию о непрерывно меняющемся множестве случайных геометрических конфигураций. Возможности фрактальной геометрии используются при изучении различных процессов нефтегазодобычи, интерпретации результатов геофизических и гидродинамических исследований (Ролдугин, 2003), для оценки фильтрационных свойств пористой среды (Сулейманов, 1993).

Фрактальная размерность также является показателем сложности кривой. Анализируя чередование участков с различной фрактальной размерностью и тем, как на систему воздействуют внешние и внутренние факторы, можно научиться предсказывать поведение системы и, что самое главное – диагностировать и предсказывать нестабильные со-

стояния диссипативных структур. Предполагается, что фрактальная размерность определенной величины может использоваться как индикатор кризиса или предупреждающий сигнал катастрофы «SOS».

Немаловажен и тот факт, что универсальные законы организации структуры вещества возникают и проявляются при переходе от микроскопического уровня описания на более высокие уровни макроскопического описания. Оглядываясь на нефтегазовый комплекс наук, можно заметить, что здесь успехи применения фракталов пока не совсем значительные.

Исходя из вышеуказанного, у авторов появилось предположение, что фрактальное моделирование стало технологической потребностью и может служить инструментом для изучения скрытого порядка в динамике неупорядоченных систем, каковыми являются водонефтяные эмульсии.

Постановка задачи и методика испытаний

В данной статье авторами была сделана попытка применения фрактального подхода к анализу структурных изменений, имеющих место в процессе обводнения и температурных воздействий на водонефтяные системы. С целью проведения испытаний на основе безводной продукции скважины № 43 месторождения «Мурадханлы» в лабораторных условиях путем искусственного обводнения, т.е. добавления различных порций воды, и механического перемешивания были изготовлены образцы водонефтяных эмульсий.

Результаты исследований и их обсуждение

Учитывая тот факт, что существенное влияние на свойства нефтей оказывает качественный и количественный состав природных, так называемых «черных» эмульгаторов – асфальтенов, смол и парафинов, ассоциаты которых склонны к структурообразованию и приводят к появлению аномалий вязкости нефти, вначале был исследован состав испытываемой нефти и определены процентные содержания следующих физико-химических показателей:

1. Парафин – 10-12 % . 2. Асфальтен – 9,2 % . 3. Смолы – 1,7 % . 4. Мех. примеси – 1,5 % . 5. Плотность – 969 кг/м³ . 6. Вода – следы. 7. Количество солей – 2335 мг/дм³ . 8. Кинематическая вязкость – 86,6 сСт .

По мнению многих авторов, особое место среди микроскопических методик занимает аналитическая просвечивающая электронная микроскопия, позволяющая выявить и зафиксировать структурные и фазовые неоднородности, их связанность между собой, межфазные и переходные зоны, градиентные структуры, индивидуальные макромолекулы в матрице и на поверхности субстратов. В отличие от других методов, электронная микроскопия исследует объекты, не усредняя их по ансамблю. В монографиях В.М. Лукьяновича, Р. Хенденрайха, Г. Шиммеля, С. Ахарони и других исследователей подробно описаны методики препарирования гетерогенных систем, рассмотрены различные способы обработки изображений и приведены конкретные результаты применения электронной микроскопии (Лукьянович, 1960).

Принимая во внимание, что исходным пунктом визуального анализа являются микротографии, позволяющие проанализировать взаимное расположение частиц, в данной работе для изучения структурных изменений и определения фрактальной размерности был применен известный в науке метод «анализа микротографий», т.е. метод оптического сканирования (Аббасов, 1973).

Из свежееизготовленных образцов водонефтяных эмульсий различной обводненности при разных температурах были взяты пробы в виде капель и нанесены на стеклянные слайды, структуру которых изучали с помощью электронного микроскопа типа Nu-2E. Полученные методом дифракции снимки увеличивали в 60 раз (Zoom x60) и через зафиксированный (с целью неизменного сохранения фокусного расстояния) окуляр электронным фотоаппаратом производили цифровые снимки. В снимках нефтяные капли (в дальнейшем будем их называть глобулами) отражались черным цветом, а водяные глобулы – светлым.

В качестве примера на рис 1 приведены выборочные микроскопические изображения исследуемых водонефтяных эмульсий при $t=20^{\circ}\text{C}$.

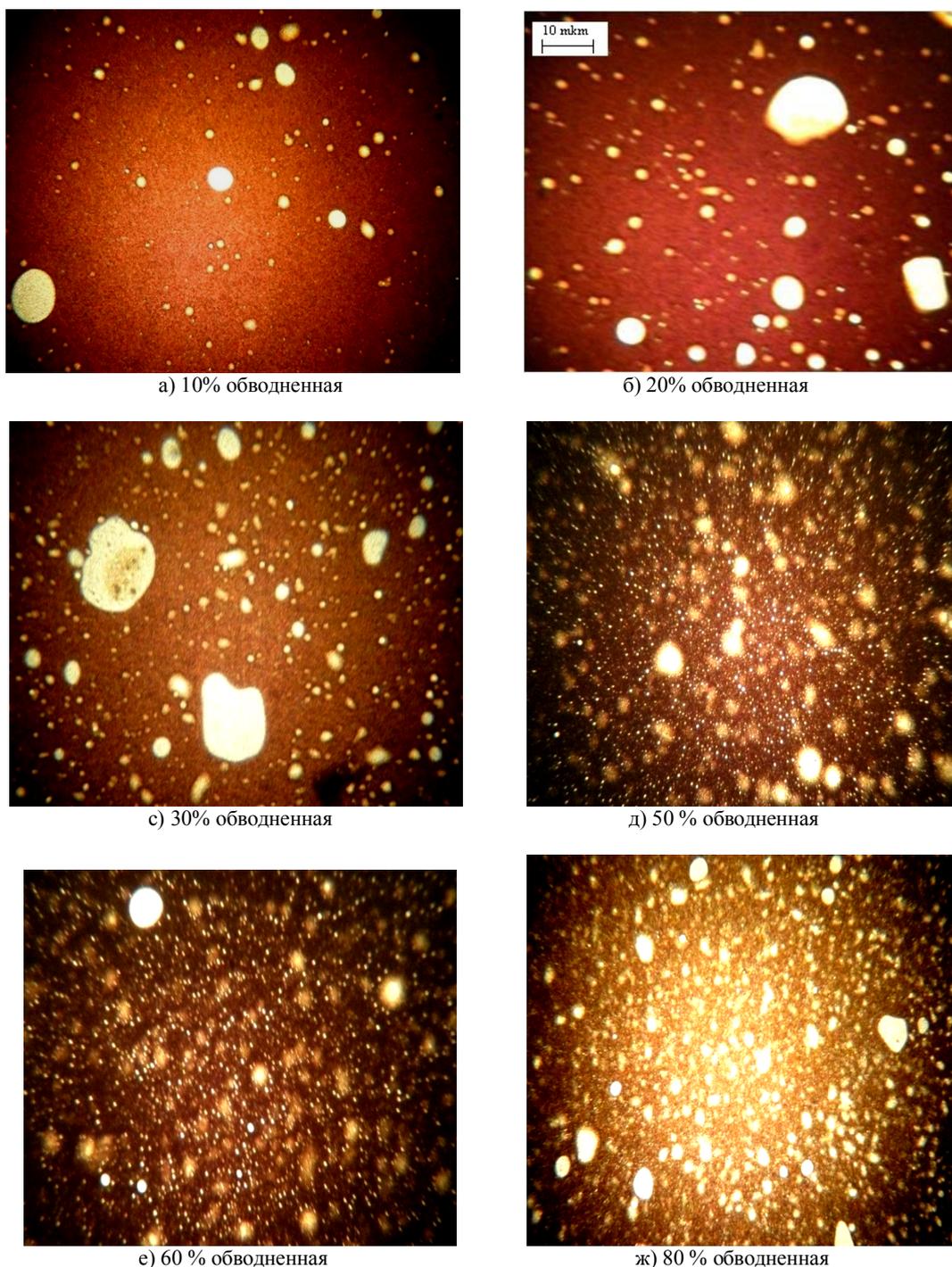


Рис. 1. Микроскопические изображения обводненных эмульсий

Как видно из вышеприведенных слайдов, с увеличением степени обводненности в структурах водонефтяных систем происходят заметные изменения, причины которых будут подробно описаны ниже.

Далее для определения среднего диа-

метра глобул был использован классический клеточный способ, когда полученный график (в нашем случае – цифровое изображение) накрывают серией сеток так же, как и для геометрических фракталов. Т.е. на преобразованное изображение накладывали единую

сетку, разбитую на множество квадратов с количеством N со стороной δ (в данных расчетах $\delta = 6,11$ мкм). Затем с помощью нижеуказанной формулы подсчитывали общее число квадратов и число квадратиков, затронутых водяными глобулами:

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N(\delta)}{\ln \left(\frac{1}{\delta}\right)}$$

В каждом исследуемом проценте обводненности водонефтяных эмульсий, используя метод оценки воспроизводимости и точности измерений, по критерию Стьюдента было оценено значение $d_{\text{ср}}$ среднего диаметра глобул эмульсий с доверительной вероятностью $\alpha \approx 0,995$, точность определения которых составила примерно 2,9 % (Аббасов, 1973).

На рис. 2 приведена зависимость средних диаметров глобул от степени обводненности водонефтяных систем. Как видно из кривой, средний диаметр глобул доходит до максимума примерно при степени обводненности 20%, затем начинает резко снижаться. Анализ данных показал, что при обводненности в интервале 20-40 % водонефтяная смесь претерпевает заметные структурные изменения. Диаметры глобул уменьшаются, и их распределение в структуре носит монодисперс-

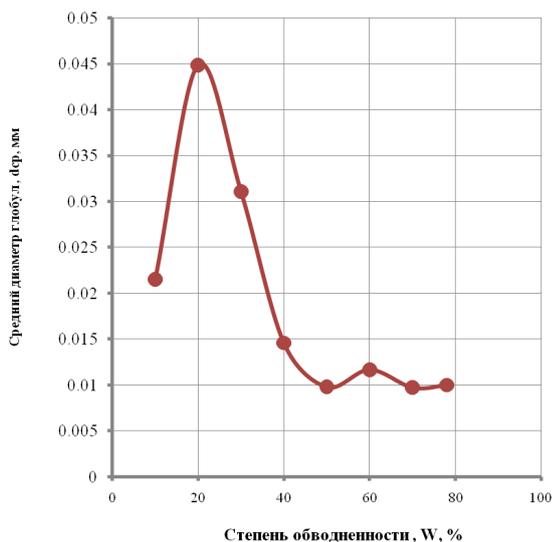


Рис. 2. Зависимость средних диаметров глобул от степени обводненности водонефтяных систем

ный характер. Начиная с 50% обводненности, монодисперсные капли формируют уплотненную структуру, создавая так называемую фазу «эмульсии-гели», и далее показатели стабилизируются.

Отметим, что величина фрактальной размерности также может служить индикатором количества факторов, влияющих на систему. Например, при значении фрактальной размерности $D \leq 1,4$ на систему влияет один фактор. Если фрактальная размерность $D \sim 1,5$, то силы, действующие на систему, разнонаправлены, но более или менее компенсируют друг друга. Поведение системы в этом случае является стохастическим и определяется минимум двумя факторами. Если же фрактальная размерность $D \geq 1,6$, то система становится неустойчивой и готова перейти в новое состояние (Ролдугин, 2003).

Существенным моментом такого подхода является наличие критического значения фрактальной размерности кривой, при приближении к которому система теряет устойчивость и переходит в нестабильное состояние, а параметры либо возрастают, либо убывают, в зависимости от тенденции, имеющей место в данное время.

Используя заданное уравнение, была рассчитана фрактальная размерность D водонефтяных эмульсий. С целью проверки независимости величины фрактальной размерности от масштаба увеличения шаг δ уменьшали в 2, 4, 8 раз и повторяли эту операцию несколько раз. Оказалось, что уменьшение шага δ приводит к увеличению числа ячеек, необходимых для покрытия площади глобул, и уточняет полученный результат. Расхождение между полученными значениями (2-3%) лежит в пределах ошибки эксперимента, поэтому можно считать, что выбор масштаба увеличения микроструктуры не влияет на величину фрактальной размерности.

На рис. 3 показана зависимость фрактальной размерности от степени обводненности водонефтяной эмульсии.

Как видно из рис. 3, фрактальная кривая более четко анализирует структурное состояние водонефтяных эмульсий. Начиная с 20% обводненности, при значении фрактальной размерности $D > 1,6$ система становится неустойчивой и переходит в нестабильное состояние.

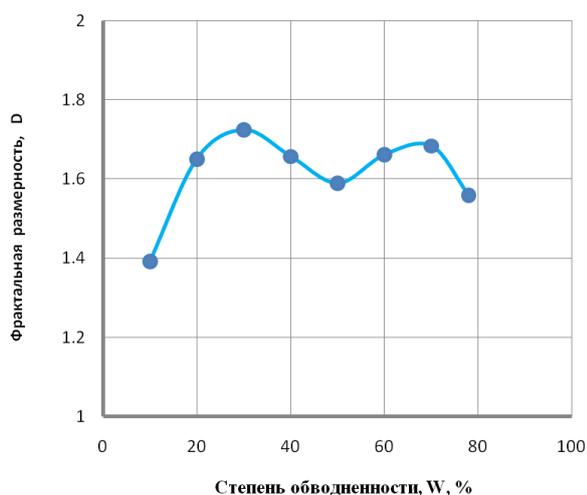


Рис. 3. Зависимость фрактальной размерности от степени обводненности водонефтяной эмульсии

Это еще раз подтверждает о том, что фрактальная размерность полидисперсной системы не может быть охарактеризована единственным числом. Поэтому в данном случае целесообразнее говорить не о моно-, а о мультифракталах. Мультифракталы – неоднородные фрактальные объекты, для полного описания которых в отличие от регулярных фракталов недостаточно введения всего лишь одной величины, его фрактальной размерности, а необходим целый спектр таких размерностей, число которых, вообще говоря, бесконечно. Причина заключается в том, что наряду с чисто геометрическими характеристиками, определяемыми величиной, такие фракталы обладают и некоторыми статистическими свойствами. Иными словами, мультифрактал – это квазифрактальный объект с переменной фрактальной размерностью. Естественно, реальные объекты и происходящие в них процессы гораздо проще описывать мультифракталами (Божокин, Паршин, 2001).

Далее на втором этапе исследований для изучения влияния температуры на структурные изменения водонефтяных систем были проведены дополнительные лабораторные исследования. Эксперименты велись при температурах $t = 5, 20, 40, 60^{\circ}\text{C}$. При различных вышеуказанных температурах были проанализированы микроскопические изображения водонефтяных эмульсий, имеющих одинаковый процент обводненности $W=50\%$.

На рис. 4 показаны микроскопические изображения для единых – 50% обводненных эмульсий при температурах $t = 5, 20, 40, 60^{\circ}\text{C}$.

Аналогичным способом по уравнению (1) была построена зависимость фрактальной размерности от температуры водонефтяной эмульсии, которая приведена на рис. 5.

Как видно из рисунка 5, кривая носит нелинейный характер и доходит до максимума значения при температуре $t=20^{\circ}\text{C}$. Можно предположить, что, начиная с $t=40^{\circ}\text{C}$ и исходя из значения фрактальной размерности $D=1,4$ и менее, на систему влияет один фактор – температурный.

Фрактальный анализ микрофотографий позволил выявить следующие интересные факты. Оказалось, что с увеличением температур эмульсий растет дисперсия глобул, что в итоге сказывается в уменьшении их фрактального показателя. Это также визуально подтверждают рис. 4 и 5.

С другой стороны, объяснение столь странного поведения изучаемых полидисперсных систем было бы целесообразнее связать с их термодинамическими характеристиками (энтальпия, свободная и внутренняя энергии систем, энтропия и т.д.) и физическими свойствами (плотность, теплоемкость и др.), так как предполагается, что в процессе агрегатизации свободная энергия системы в основном расходуется на достижение ее термодинамически стабильного состояния (Ролдугин, 2003).

Таким образом, фрактальная геометрия открывает новые возможности изучения структуры водонефтяных систем, т. к. позволяет по их макроструктуре судить о микроструктуре. В перспективе с применением фрактальной геометрии возможно установление корреляционных зависимостей между фрактальной размерностью и физико-химическими свойствами водонефтяных систем. По мнению авторов, определение таких зависимостей в математическом выражении позволит по структурному изображению эмульсий на макроуровне судить о реологических и физико-химических свойствах, что дает возможность разработки нового диагностирующего метода для определения структурных изменений в полидисперсных системах.

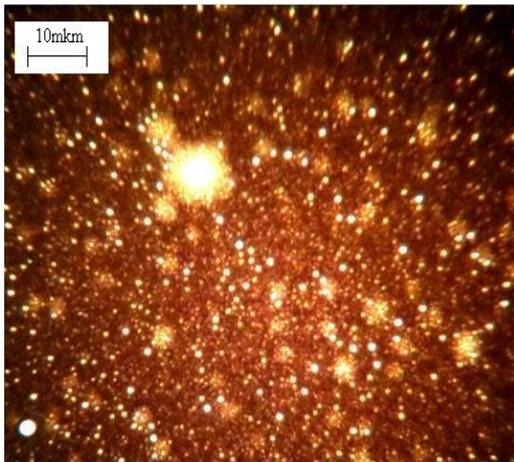
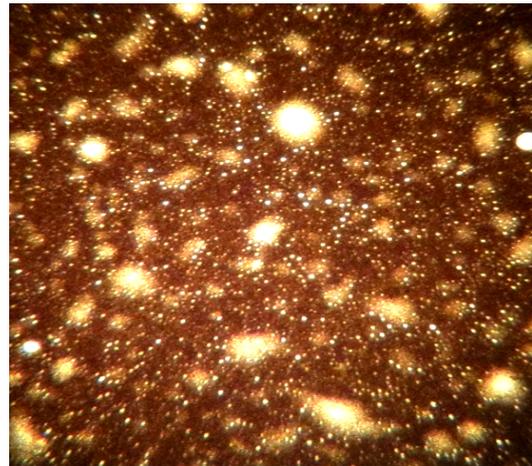
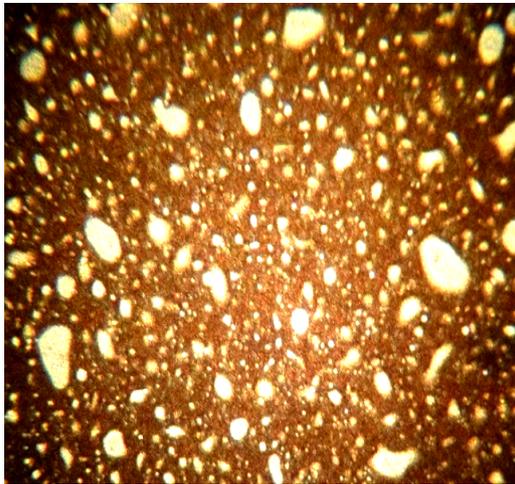
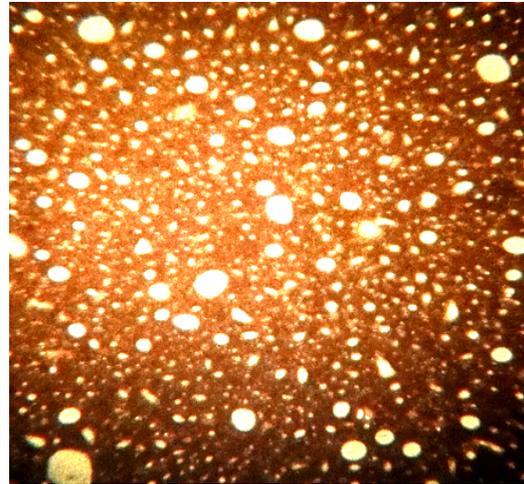
а) при $t = 5^{\circ}\text{C}$ б) при $t = 20^{\circ}\text{C}$ в) при $t = 40^{\circ}\text{C}$ д) при $t = 60^{\circ}\text{C}$

Рис. 4. Микрофотографические изображения водонефтяных эмульсий при различных температурах (при обводненности $W=50\%$)

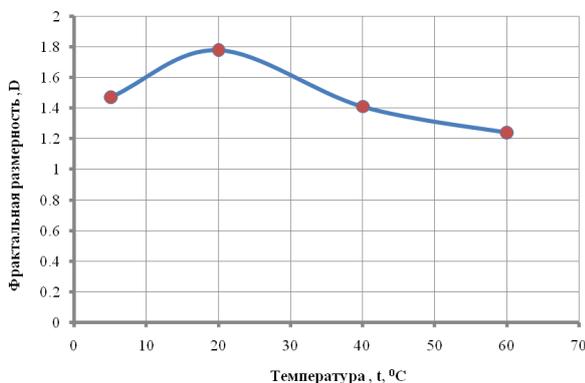


Рис. 5. Зависимость фрактальной размерности от температуры водонефтяной эмульсии

Заключение

Фрактальный анализ может быть успешно использован в качестве диагностического метода для выявления и оценки макро- и микроструктурных изменений, имеющих место в дисперсных системах, каковыми являются и водонефтяные системы.

Выявлено, что фрактальный показатель полидисперсных систем никогда не может быть characterized единым фактором и в рассматриваемом случае целесообразно говорить не о монофракталах, а о мультифракталах.

В результате исследований водонефтяных смесей в макро- и микроскопическом масштабе обнаружены пороговые concentra-

ции водной фазы (~20%), при которых происходят заметные структурные изменения дисперсной фазы, приводящие к формированию «эмульсии-геля», который является результатом структурообразующих процессов – коалесценции и агрегатизации.

Повышение температуры водонефтяных систем сказывается на немонотонном изменении фрактальной размерности, что может быть объяснено их термодинамическими характеристиками и физическими свойствами, а также неупорядоченностью структуры, обусловленной многокомпонентностью и диссипативностью исследуемых дисперсных систем.

ЛИТЕРАТУРА

- АББАСОВ, З.Я. 1973. Исследование механизма образования водонефтяных эмульсий и их физических свойств. Автореф. дисс... канд. техн. наук, Баку. 25.
- БОЖОКИН, С.В., ПАРШИН, Д.А. 2001. Фракталы и мультифракталы. НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». Ижевск. 128.
- КРОНОВЕР, Р.М. 2000. Фракталы и хаос в динамических системах. Постмаркет. Москва. 352.
- ЛУКЪЯНОВИЧ, В.М. 1960. Электронная микроскопия в физико-химических исследованиях. Академия Наук СССР. Москва. 272.
- МИРЗАДЖАНЗАДЕ, А.Х., ХАСАНОВ, М.М., БАХТИЗИН, Р.Н. 2005. Моделирование процессов нефтегазодобычи. Институт компьютерных исследований. Ижевск. Москва. 322-327.
- МИРЗАДЖАНЗАДЕ, А.Х., ШАХВЕРДИЕВ, А.Х. 1997. Динамические процессы в нефтегазодобыче. Наука. Москва. 27-64.
- ОЛЕМСКОЙ, А.И. 2009. Синергетика сложных систем. В кн.: *Феноменология и статистическая теория*. Красанд, Москва, 384.
- РОЛДУГИН, В. И. 2003. Фрактальные структуры в дисперсных системах. *Успехи химии*, 72, 10, 931-959.
- СУЛЕЙМАНОВ, Б.А. 1993. Экспериментальное исследование образования фрактальных структур при вытеснении нефти. *Азербайджанское нефтяное хозяйство*, 5, 29-33.
- СУЛЕЙМАНОВ, Б.А. 2006. Особенности фильтрации гетерогенных систем. Институт компьютерных исследований. Москва. 231-255.
- ФЕДЕР, Е. 1991. Фракталы. Мир. Москва. 264.
- MANDELBROTT, В.В. 1982. The Fractal geometry of nature. W.H. Freeman, New-York. 22-29.

Рецензент: член-корр. НАН Азербайджана З.Я. Аббасов