

МЕТОД АНАЛИЗА НИЗКОЧАСТОТНЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ ГОРНЫХ ПОРОД

А. А. Злобин, Б. В. Терентьев
(ООО "ПермНИПИнефть")

Данная статья продолжает начатые ранее работы [1] по исследованию упругих деформаций горных пород при изменении напряженного состояния скелета.

В настоящее время активно развиваются и используются на практике методы анализа толщ осадочных пород по спектральным характеристикам геоматериала, которые фиксируются при пассивном (геоакустические шумы в скважинах, акустическая эмиссия) или активном внешнем воздействии (поверхностные вибраторы, скважинные излучатели) на продуктивный пласт. Многочисленные работы показывают, что горная порода является сложной саморегулирующейся системой, способной генерировать звуковые волны в широком диапазоне частот от 0,5 до 10^3 Гц и выше. При этом установлено наличие так называемых доминантных (преобладающих) частот горных пород, приводящих к резонансным эффектам [2, 3]. Механизмы генерации упругих волн связаны с динамической перестройкой матрицы на микро- и макроуровне структурной иерархии. В свою очередь сейсмический и ультразвуковой диапазоны частот отражают конкретные механизмы трансформации фрагментов матрицы при взаимодействии с упругой волной. Большой научный и практический интерес представляет диапазон сейсмических частот менее 1 Гц, который несет информацию о медленных деформационных волновых процессах, связанных с перераспределением геомасс земной коры. Однако на практике этот диапазон ограничен возможностями сейсмических датчиков, реальная частота которых ограничена десятками долями герц.

Авторами статьи впервые разработан и запатентован новый способ анализа низкочастотных деформаций горных пород, основанный на импульсном методе ЯМР в сильных полях [4]. В последние годы за рубежом метод ЯМР (модификации MRIL и CMR) переживает интенсивное развитие применительно к задачам ГИС для выделе-

Разработана и апробирована бесконтактная лабораторная методика анализа динамической структуры твердых тел с использованием ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Она заключается в мониторинге переходных процессов в горных породах на основе регистрации резонансного отклика спиновой системы молекул зондирующей жидкости.

Described is a non-contact laboratory technique of the analysis of the dynamic structure of firm bodies with the use of a nuclear magnetic resonance (NMR) which is developed and tested. It consists of monitoring of transients in the rocks on the basis of registration of the resonant response of the spin system of the sounding liquid molecules.

ния пластов и оценки коллекторских свойств [5]. По предлагаемому способу в качестве индикатора напряженного состояния матрицы выступает протонсодержащая жидкость (вода), насыщающая поры и микроканалы образца, а информативным параметром, так же как в MRIL и CMR, является время T_2 спиновой (поперечной) релаксации протонов на частоте 20 МГц. Текущее время ядер-

но-магнитной релаксации затем пересчитывается в средний радиус пор $R(t)$, и строятся диаграммы разгрузки скелета от внешнего поля напряжений.

Экспериментальная часть включает создание на установке высокого давления всестороннего напряженного состояния скелета, соответствующего реальным условиям залегания керна. Затем моделируется быстрая разгрузка керна, в течение которой от первых минут до нескольких суток ведется ЯМР-мониторинг внутренних переходных процессов в твердом теле, отражающих динамику микроструктурной трансформации матрицы пород [4].

Основные преимущества способа заключаются в высокой чувствительности, бесконтактности, экспрессности анализа, который не зависит от геометрической формы керна и абсолютной величины порового объема. Анализ релаксационных диаграмм свободной разгрузки позволяет более достоверно прогнозировать физико-механические свойства пород в динамическом режиме, а также оценивать спектральный состав и доминантные частоты.

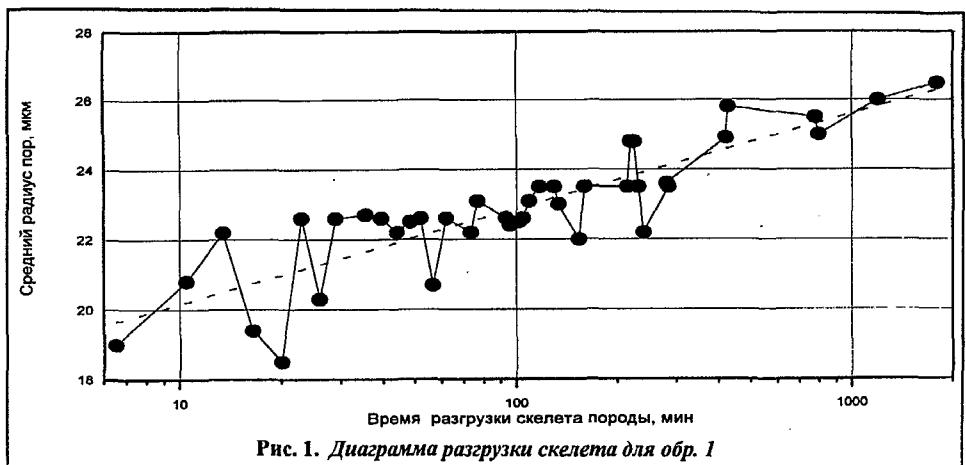


Рис. 1. Диаграмма разгрузки скелета для обр. 1

Способ опробован на коллекции реальных сцементированных пород продуктивных отложений Пермского Предуралья, петрофизические и упругие характеристики которых приведены в таблице.

Опыты, проведенные с коллекцией образцов, показывают, что в интервале времен разгрузки до 10^3 мин

наблюдаются сложные колебательные низкочастотные процессы, связанные с диссипацией части упругой энергии сжатия в акустические затухающие волны (рис. 1). Для каждого образца имеет место своя диаграмма разгрузки, которая напрямую связана с литолого-структурными свойствами пород.

Емкостно-фильтрационные, структурные и упругие характеристики горных пород

Параметры горных пород	Обр. 1	Обр. 2	Обр. 3	Обр. 4
Площадь	Кирилловская			Бикбайская
Скважина	101	101	101	115
Интервал отбора, м	2097...2103	2101...2108	2081...2088	1119...1125
Тип породы	Терригенная			Карбонатная
Геологический возраст	D	D	D	C _{2b}
Плотность пород (ρ), г/см ³	2,27	2,15	2,05	2,22
Пористость (K_n), доли единицы	0,156	0,182	0,223	0,176
Проницаемость по газу ($K_{пр,г}$), мкм ²	0,067	0,161	0,740	0,136
Остаточная водонасыщенность ($K_{ов}$), доли единицы	0,182	0,095	0,061	0,145
Средний диаметр зерен (D), мкм	96	156	240	-
Средний радиус пор (R), мкм	26,7	66,3	110	37,7
Удельное электрическое сопротивление (УЭС), Ом·м	1,64	0,51	0,43	3,78
Гидродинамический радиус пор, мкм	2,1	3,0	5,8	2,8
Коэффициент неоднородности порового объема по Хазену (S_x), ед.	4,80	3,94	1,56	—
Эффективное давление всестороннего сжатия ($P_{эф}$), МПа	30	40	30	20
Коэффициент объемной деформации пор (ϵ), %	10,4	9,3	6,4	6,1
Коэффициент сжимаемости пор (β_n), 10^{-3} МПа ⁻¹	3,47	2,33	2,13	3,15
Доминантные частоты деформационных колебаний (ν), 10^{-3} Гц	0,372 0,859 2,500	0,713 1,736	1,389	0,888
Времена релаксации фаз разгрузки (T_6 и T_d), мин	23/505	41/808	56/1210	7,2/105
Максимальная амплитуда колебаний радиуса пор (мкм / % от R_0)	2,0/7,5	5,0/7,5	6,2/5,6	0,5/1,3
Средняя скорость раскрытия пор (C_p), 10^{-3} мкм/с (интервал 20 мин)	1,108	2,083	1,431	1,083
Скорость микродвигов ($C_{см}$), 10^{-3} мкм/с (по первой доминантной частоте)	5,00	10,42	10,34	0,444
Отношение скоростей деформаций $C_{см}/C_p$	4,51	5,00	7,23	0,41
Скорость продольных волн в обычных и пластовых условиях (v_p), км/с	3,69/4,57	3,54/4,41	2,93/3,91	4,46/4,88

Обработка данных с использованием быстрого преобразования Фурье (FFT) позволяет получить амплитудно-частотные спектры, которые дают более детальную информацию о спектральном составе и доминантных частотах горных пород. Как показывают расчеты, при разгрузке горных пород за счет запаса упругой энергии генерируются низкочастотные колебания размера пор с максимальной частотой до $2,5 \cdot 10^{-3}$ Гц (см. таблицу), спектральный состав которых является функцией структурных свойств пород и времени разгрузки.

Анализ текущих спектров установившихся колебаний пор показал, что в "ближней" области разгрузки с временем релаксации T_6 во всех образцах явно наблюдается только одна мода колебаний с характеристической частотой ν_1 в диапазоне $(0,9...2,5) \cdot 10^{-3}$ Гц (см. таблицу). В терригенных породах-коллекторах она достаточно тесно коррелирует с петрофизическими параметрами — пористостью, сжимаемостью, плотностью, радиусом и др.:

$$\nu_1 = 5,580 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(2,683 \cdot p);$$

$$\nu_1 = 2,168 \cdot 10^{-3} \cdot \ln(\beta_n) + 1,479 \cdot 10^{-2};$$

$$\nu_1 = 1,249 \cdot 10^{-3} \cdot K_{пр.г}^{-0,234}; \nu_1 = 9,750 \cdot 10^{-3} \cdot R^{-0,413};$$

$$\nu_1 = 4,642 \cdot 10^{-2} \cdot D^{-0,644}; \nu_1 = 1,190 \cdot 10^{-4} \cdot K_n^{-1,617},$$

где ν_1 — Гц; ρ — г/см³; β_n — МПа⁻¹; D, R — мкм; $K_{пр.г}$ — мкм², K_n — доли единицы.

Таким образом, в интервале первых 10...30 мин разгрузки реализуется квазигармонический режим колебаний, при котором порода проявляет себя как высокочастотный осциллятор, генерирующий одну линию. Все остальные моды вырождены. Фактически первый одиночный отклик по форме является огибающей большого числа близких резонансов, вероятно, когерентных по фазе. По мере увеличения времени разгрузки число спектральных гармоник скачкообразно увеличивается от 1 до 6—8, причем для каждого образца по своему закону. Эволюция спектра в сторону увеличения числа мод приводит к сужению, расщеплению и сдвигу отдельных линий. После интервала 150 мин наблюдаются сложные мультиплексные спектры, отражающие суперпозицию различных мод с более слабыми интенсивностями. Таким образом, разгрузка реальных пород от горного давления сопровождается увеличением числа степеней свободы механической системы.

Для более наглядного представления результатов были получены трехмерные спектры на интервале первых 180 мин, где наблюдаются максимальные упругие деформации (рис. 2, 3). В расчетах предварительно формировалась числовая матрица с размерностью 12×170 точек, а 3D-спектры моделировались в среде S-PLUS 2000, позволяющего строить объект в любой плоскости пространства. На рис. 2 приведен экспериментальный график для обр. 1, который воспроизводит динамику быстрой разгрузки скелета в частотно-временной плоскости. Для удобства на всех рисунках ось времени (Time) направлена слева направо, а значения частоты (Frequency), наоборот, возрастают справа налево. Вертикальный масштаб амплитуды спектральной плотности (Intensity) разный для выделения индивидуальных особенностей объемных резонансов в каждом образце.

Анализ показывает, что в обр. 1 формируется достаточно сложная спектральная картина, которая, однако, носит не стохастический, а регулярный характер. Отметим некоторые закономерности. В первые минуты разгрузки от горного давления в образце возбуждается одна высокочастотная мода колебаний с достаточно большой амплитудой спектральной плотности. Особенность этого первого резонанса заключается в его быстром (экспоненциальном) затухании. Так, например, интенсивность в максимуме через 60 мин снижается в 6 раз. Тем не менее вклад этой высокочастотной моды колебаний в виде непрерывного "следа" просматривается на графике вплоть до 180 мин. Через некоторое время, когда первая мода колебаний уже практически исчезает, дополнительно генерируются две близкорасположенные, но хорошо разрешенные спектральные линии, смещенные в низкочастотную область спектра. По интенсивности они в 2 раза меньше первой моды. Новые спектральные компоненты по характеру изменения схожи между собой и напоминают зеркальных двойников, например, на кратных частотах. Интенсивность этих линий также убывает в процессе разгрузки, но более медленно, чем первой моды. При этом наблюдается дифференциация по скорости затухания мод: чем выше частота, тем короче время ее "жизни". Это приводит к диагональной направленности распределения спектральной плотности, которая после 180 мин концентрируется в области низких частот вблизи нулевого значения.

Таким образом, эксперименты показывают, что для терригенного обр. 1 характерны три доминантные частоты ($0,372 \cdot 10^{-3}$; $0,859 \cdot 10^{-3}$; $2,5 \cdot 10^{-3}$ Гц) внутренних осцилляторов, которые связаны с особенностями структуры скелета и порового пространства. Отношения верхних частот к нижней составляют 1 : 2,3 : 6,7.

На графике для обр. 2 (см. рис. 2). Основное отличие от обр. 1 заключается в более упрощенной волновой картине и слабой (в 2,9 раза) интенсивности резонансов. Видно, что в начальный момент времени также генерируется одна относительно узкая интенсивная линия в низкочастотной области и дополнительно

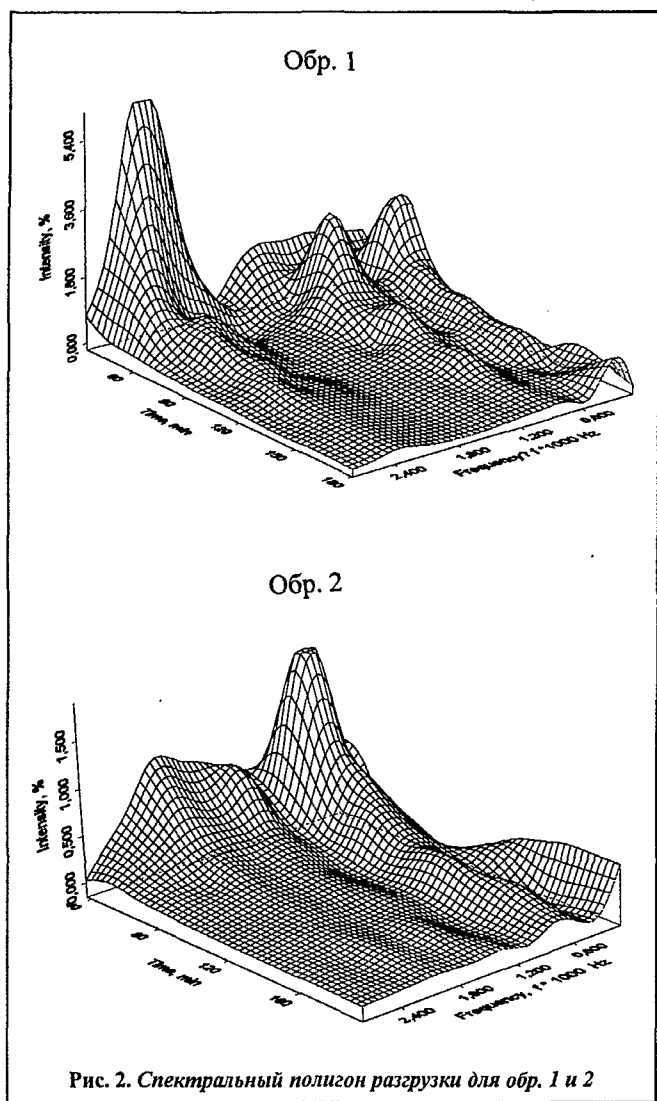


Рис. 2. Спектральный полигон разгрузки для обр. 1 и 2

имеется значительно расширенная, "размазанная", более слабая по амплитуде, огибающая двух линий в высокочастотной области спектра. Эти компоненты спектра быстро (примерно через 60 мин) затухают, и далее прослеживается след одной низкочастотной моды. В обр. 2 основная энергетика процесса диссипации связана именно с низкочастотными внутренними осцилляторами. В целом обр. 2 свойственна более крупномасштабная текстура частотного полигона, что говорит о низкой добротности резонансов, отражающих, по всей видимости, высокую акустическую неоднородность матрицы. Доминантных частот в этом образце две: низкая ($0,713 \cdot 10^{-3}$ Гц) и высокая ($1,736 \cdot 10^{-3}$ Гц) как среднее двух близких резонансов. Соотношение этих частот 1 : 2,4.

На рис. 3 показан спектральный полигон для высокопористого обр. 3, где просматривается только один широкий асимметричный резонансный отклик, несколько смещенный в сторону низких частот. Высокочастотные составляющие в данном случае практически вырождены. Максимальная интенсивность спектральной плотности здесь в 7,8 раза ниже, чем в обр. 1. Доминантная частота одна и составляет $1,389 \cdot 10^{-3}$ Гц.

Для карбонатного обр. 4 (см. рис. 3) возникает несколько иная картина: во-первых, максимальная амплитуда спектра в 15 раз меньше, чем в терригенном обр. 1; во-вторых, полностью вырождены высокочас-

тотные резонансы, и, наконец, при слабой разрешенности линий весь спектр сосредоточен в области нулевой моды. Отсутствие затухания по времени позволяет интерпретировать этот спектр как близкий к стохастическому шуму.

Таким образом, свободная разгрузка скелета терригенных пород сопровождается низкочастотными резонансными эффектами, связанными с микроструктурной перестройкой матрицы. По мере снижения пористости, проницаемости, размера слагающих зерен и пор матрицы спектр колебаний усложняется: возрастают интенсивность, число доминантных частот и монотонно увеличивается вклад высокочастотных составляющих. Это хорошо согласуется с тем, что в сейсмическом диапазоне также имеется тенденция возрастания доминантной частоты по мере перехода к более консолидированным и плотным геоматериалам, например в песке — 25 Гц, в глине — 40 Гц, в граните — 400 Гц [6].

Спектральный анализ позволяет отслеживать динамику диссипации энергии колебаний в механической системе. При всестороннем нагружении упругая энергия деформации аккумулируется в твердой фазе скелета. Характерно, что в первые десятки минут рассеивается до 80...85 % энергии в режиме с одной модой колебаний. Расчетный КПД деформационных колебаний, исходя из максимального вклада энергии, достаточно мал и составляет $10^{-5} \dots 10^{-3}$. Эти значения хорошо согласуются с оценками коэффициента сейсмической эффективности, например, при горных ударах, который, по литературным данным, составляет 10^{-4} , а в целом находится в интервале $10^{-6} \dots 10^{-2}$ [3].

Для количественного анализа дополнительно использовали переход к интегральной спектральной характеристике — средневзвешенной (эффективной) частоте системы (ν_{cp}), рассчитываемой по формуле

$$\nu_{cp} = \sum \alpha_i \nu_i / \sum \alpha_i, \quad i=1,2,\dots,N,$$

где i — номер спектральной составляющей; ν_i , α_i — частота и интенсивность i -й линии. На графиках изменения средневзвешенной частоты от времени (рис. 4), во-первых, наблюдается однозначная дифференциация спектрального параметра ν_{cp} и петрофизических свойств образцов керна. Во-вторых, различие по средней частоте внутри класса терригенных пород (обр. 1, 2, 3) не такое большое, как в случае с энергией колебаний, но оно резко возрастает при сопоставлении образцов с различным литологическим составом: терригенных и карбонатных. Другими словами, физико-механические свойства карбонатных пород (см. таблицу, обр. 4) способствуют быстрому снижению средней частоты и затуханию свободных колебаний. В-третьих, на графиках изменения средневзвешенной частоты для терригенных пород четко видно, что существуют определенные "фазы" процесса разгрузки, которые фиксируются по характерному ступенчатому изменению параметра ν_{cp} . Чем сложнее (неоднороднее) структура порового пространства образца керна, например обр. 1 по сравнению с обр. 2 и 3 (см. таблицу),

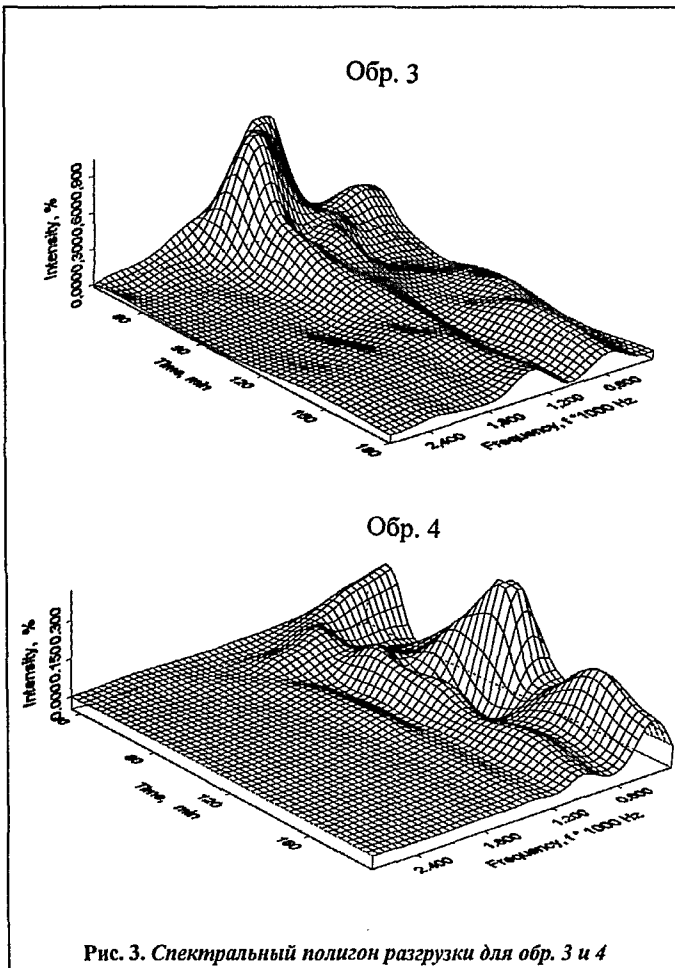


Рис. 3. Спектральный полигон разгрузки для обр. 3 и 4

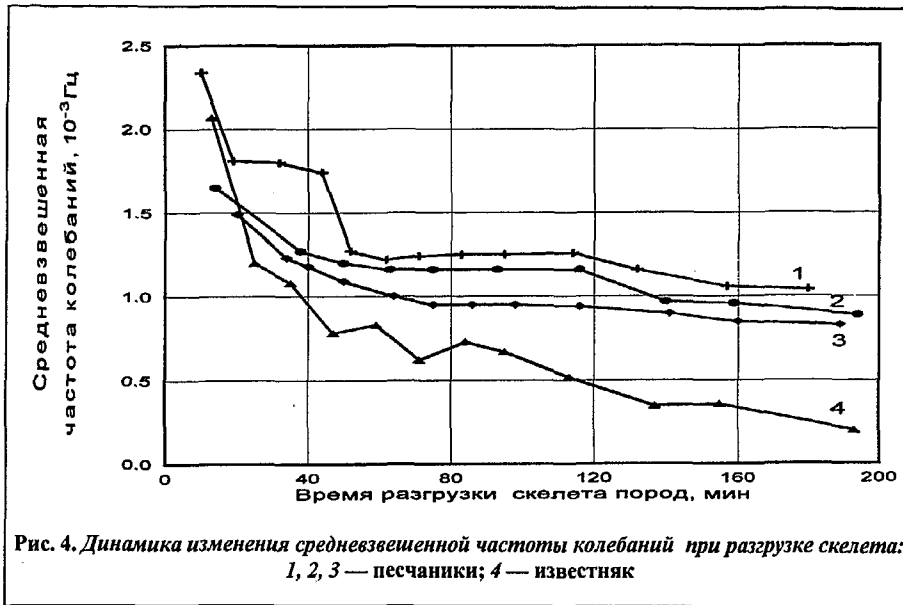


Рис. 4. Динамика изменения средневзвешенной частоты колебаний при разгрузке скелета: 1, 2, 3 — песчаники; 4 — известняк

тем больше фазовых переходов. Таким образом, существуют протяженные временные интервалы, в течение которых средняя частота колебаний системы остается на одном уровне (например, обр. 1: первый интервал от 19 до 40 мин, второй — от 55 до 110 мин).

Следовательно, можно говорить о наличии у сложной динамической системы, какой является горная порода, разрешенных квазиустойчивых динамических состояний. Наблюдаемая упорядоченность открытой термодинамической системы в неравновесном состоянии отражает факт выраженной самоорганизации, проявляющейся в оптимизации параметров состояния.

Таким образом, в механической системе имеет место постоянство средней частоты при монотонном разбалансе суммарной энергии колебаний. Это происходит, вероятно, до тех пор, пока не осуществится самосогласованная объемная перестройка структуры матрицы, например формирование дополнительных структурных полостей в виде микротрещин и микроканалов, объединяемых некоторым средним масштабным размером L . Далее система быстро переходит в следующее квазиустойчивое состояние. Отсюда процесс развития внутренней поверхности пор осуществляется не непрерывно, а скачкообразно (своеобразное квантование) от одного линейного масштаба к другому ($L_i \rightarrow L_{i+1}$, причем $L_i < L_{i+1}$). Каждому устойчивому состоянию при этом соответствует свой масштаб времени "жизни" Δt . Новая фаза разгрузки не наступит до тех пор, пока не реализуются, вероятно, все потенциально возможные структурные подуровни предыдущей фазы исходя из текущего запаса упругой энергии и мгновенных модулей упругости. Существование фаз разгрузки отражает в общем дискретную природу процесса микродеформаций пористых сред.

Возможный механизм наблюдаемых деформационных колебаний — это чередование фаз упругого сжатия и расширения элементов поровой поверхности и объема за счет микроструктурной неоднородности

скелета, различия упругих модулей, а также геометрических свойств кварцевых зерен и цемента. Основной запас накопленной упругой энергии идет на восстановление первоначальных размеров пор, при этом колебательный затухающий процесс обусловлен переменной скачкообразной скоростью движения границ пор за счет внутренних нелинейных сил трения. Природа этих сил обуславливает знакопеременные вязкоупругие микродеформации сдвига (нормальные или тангенциальные смещения частиц и фрагментов) и определяет индивидуальный сценарий разгрузки, зависящий от литологии и степени упаковки скелета.

Например, в тонкозернистом

обр. 1 максимальная амплитуда колебаний составляет $\pm 2,0$ мкм, а в более крупнозернистом обр. 2 она достигнет ± 5 мкм (см. таблицу).

Рассмотрим соответствие между спектральными и структурными характеристиками пород. Количество доминантных частот в спектрах в большей степени определяется наличием в матрице групп пор, каналов и трещин с различными линейными размерами. По данным ЯМР, в слабопроницаемом обр. 1 без нагрузки структура пустотного пространства крайне неоднородная. Полный объем в нем дифференцируется на 3 группы пустот с примерно равными объемными вкладами (32 % + 36 % + 32 %). Выделенные объемные доли групп расположены по мере возрастания их размеров. Доминантных частот в обр. 1 обнаружено тоже три.

В обр. 2 объем пустот представлен тремя группами (13 % + 31 % + 56 %), но более весомы две последние с крупными размерами, на которые приходится 87 % порового объема. Доминантных частот в спектре две, но высокочастотная мода (см. рис. 2), как уже отмечалось, состоит из двух близких резонансов, один из которых вполне может быть связан с менее представительной первой структурной группой.

В более проницаемом обр. 3 структура пустотного пространства наиболее простая и дифференцируется на две группы (22 % + 78 %), но при этом объемный вклад второй — доминирующий. По спектральному анализу наблюдается одна доминантная частота.

Таким образом, резонансы в породе в той или иной мере связаны с наиболее представительной (модальной) группой структурных элементов. При этом не исключено, что выделяемые в объеме группы являются взаимосвязанными и составными частями сложной изометричной поры, например, в центре и на ее периферии. В случае нескольких доминантных мод каждой их них можно приписать некоторый эффективный размер осциллятора. Предполагается следующая мо-

дель: чем меньше размер осциллятора, тем более высокую частоту он генерирует. Зависимость частоты осциллятора от его размера носит нелинейный характер. Реальная интенсивность резонансов, вероятно, является сложной функцией не только размера и объемного вклада, но также геометрии элементарного осциллятора и его упругих свойств. В целом достоверную первичную информацию об объекте несет характеристическая частота как аналог первого вступления в акустику.

Установленная корреляция между количеством доминантных частот и числом групп пор в матрице подтверждает главенствующую роль микроструктуры, которая при соответствующих упругих константах генерирует спектр доминантных частот. Поэтому данный динамический метод дистанционного зондирования может использоваться для получения дополнительной уникальной информации о свойствах геоматериала. При наличии аппаратуры метод может использоваться и в скважинном варианте.

По формуле $\nu = C_{сд}/e$ [3], связывающей доминантную частоту резонанса (ν) с величиной деформационных смещений (e), рассчитана реальная начальная скорость микросдвигов ($C_{сд}$) при разгрузке пористого геоматериала, которая составляет для карбонатного образца $0,444 \cdot 10^{-3}$ мкм/с, а для терригенных образцов $(5,1 \dots 10,4) \cdot 10^{-3}$ мкм/с. Сопоставление ее со средней скоростью раскрытия пор C_p (из диаграмм разгрузки) показывает, что в терригенных породах их отношение $C_{сд}/C_p$ варьирует от 4,5 до 7,2 ед., а в карбонатном образце значительно меньше единицы (см. таблицу). Из этого следует, что для генерации устойчивых резонансов в сцементированной породе должно выполняться граничное условие по скоростям деформаций, в частности $C_{сд} > C_p$.

Таким образом, в более регулярных и жестких по модулю терригенных породах возникают резонансные эффекты за счет перекачки части упругой энергии в акустическую. В аналогичном по коллекторским свойствам карбонатном образце, матрица которого по структуре более нерегулярная и пластичная, такой

выраженной трансформации не происходит, вероятно, из-за сильного демпфирования колебаний.

На практике, с учетом полученных выше данных, при сбросе поля напряжений карбонатный пласт быстро и монотонно увеличивает свою проницаемость, в то время как терригенный пласт будет продолжительное время релаксировать в колебательном режиме, а при его слоистом строении (за счет доминантных частот) возможно дополнительное интерференционное усиление или ослабление деформационных колебаний, что непосредственно отразится и на функции проницаемости в целом. Нефтеизвлечение в терригенных пластах в этом случае будет более эффективным, так как эквивалентно дополнительному вибровоздействию на залежь.

Выводы

Использование нового метода анализа горных пород позволяет установить спектр и доминантные частоты деформационных колебаний, которые могут быть полезны на практике при вибрационном воздействии на нефтяные пласты и построении сейсмологических моделей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Злобин А. А., Терентьев Б. В.. Исследование релаксации деформаций осадочных пород с использованием ядерного магнитного резонанса // Закономерности эволюции земной коры: Тез. докл. междунар. конф. — СПб.: СПбГУ, 1996. — Т. 1. — 251 с.
2. Береснев И. А., Митлин В. С., Николаевский В. Н. Роль коэффициента нелинейности при возбуждении доминантных сейсмических частот // ДАН СССР. — 1991. — Т. 317, № 5. — С. 1103—1107.
3. Николаевский В. Н. Геомеханика и флюидодинамика. — М.: Недра, 1996. — 447 с.
4. Пат. 2145080 РФ. Способ определения деформационных характеристик горных пород / А.А. Злобин, Б.В. Терентьев.
5. Аксельрод С. М. Ядерно-магнитный каротаж в искусственном магнитном поле // НТ вестник "Каротажник". — 1998. — № 49. — С. 46—63.
6. Николаевский В. Н. Механика пористых и трещиноватых сред. — М.: Недра, 1984. — 232 с.