

УДК 553.98

Д.В. Корост¹, Д.В. Надежкин², Г.Г. Ахманов³

ИЗУЧЕНИЕ ПУСТОТНОГО ПРОСТРАНСТВА НЕФТЕМАТЕРИНСКОЙ ПОРОДЫ ПРИ ГЕНЕРАЦИИ УГЛЕВОДОРОДОВ

Для получения новых данных, характеризующих процессы первичной миграции углеводородов (УВ), выполнен лабораторный эксперимент, заключающийся в поэтапном моделировании процессов генерации УВ в образце горной породы и наблюдении за изменением структуры порового пространства. Визуализированы процессы, контролирующие эмиграцию УВ из нефтематеринских пород. Методика и результаты эксперимента могут стать новым вещественным аналитическим инструментом для прогнозирования зон развития нетрадиционных коллекторов для доманикитов и баженитов.

Ключевые слова: генерация УВ, пиролиз, микро-СТ, вертикальная миграция, нетрадиционные коллекторы.

Processes of hydrocarbons (HC) generation, primary migration and structural changes are inaccessible for direct observation in nature, but they can be studied in laboratory experiments. Modern technical facilities of laboratories make it possible to accomplish experiments with HC generation from the organic-rich rocks at a new level. Recent technologies of laboratory experiments allow us to carry out the step-by-step description of such processes and their development and to study their reflection in alterations of rock structure.

Key words: hydrocarbon generation, pyrolysis, micro-CT, vertical migration, unconventional reservoirs.

Введение. Углеводороды (УВ) генерируются из твердого органического вещества (керогена) в результате термokatалитических реакций. Скорость таких реакций возрастает с увеличением температуры и зависит от глубины погружения нефтематеринской породы [Вассоевич, 1986; Тиссо, 1981].

При погружении осадочной породы с глубиной неизбежно изменяется ее структура, она преобразуется в результате уплотнения, дегидратации и перекристаллизации [Клубова, 1965; Burst, 1969].

В природных условиях процессы генерации УВ, их первичная миграция и структурные изменения в породе недоступны для непосредственного наблюдения, однако их изучение возможно экспериментальным путем. Первые такие работы относятся ко второй половине прошлого века. В основном они были направлены на исследование состава флюида, вырабатываемого нефтематеринскими породами на разных этапах генерации [Белецкая, 1990; Нестеров и др., 1993; Athy, 1930].

В меньшей степени изучены процессы трансформации минеральной матрицы породы, образования пустотного пространства и характер первичной миграции флюидов во время генерации УВ [Snarsky, 1962; Tissot, Pelet, 1971].

Современное техническое оборудование позволяет на новом уровне вернуться к экспериментам

по генерации УВ из образцов пород, богатых органическим веществом. С помощью последних технологий можно описать такие процессы пошагово, в их развитии, и изучить их отражение в изменениях строения породы.

Объект, методы и методика исследований. Эксперимент выполнен на образце глинисто-карбонатной породы доманикового горизонта (D_3fr), отобранном с глубины 1939 м из скважины в центральной части Мелекесской впадины (Западно-Татарский свод) (рис. 1). Порода отвечает необходимым требованиям — высокое содержание органического вещества и низкая степень его преобразованности, что подтверждено результатами пиролитических исследований по методу RockEval, которые свидетельствуют о том, что эта порода находится на начальном этапе генерации УВ и характеризуется высоким нефтегазоматеринским потенциалом ($S_1+S_2=79,26$ мг УВ/г породы) (табл. 1).

Лабораторный эксперимент заключался в моделировании генерации УВ в ненарушенном образце породы путем нагрева в атмосфере азота по заданной температурной программе и наблюдениях за изменениями структуры порового пространства.

Моделирование генерации УВ проводилось на пиролизаторе «RockEval 6». Пиролиз RockEval — один

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, науч. с.; *e-mail:* dkorost@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, инженер; *e-mail:* dvnadezhkin@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, доцент, канд. геол.-минер. н.; *e-mail:* akhmanov@geol.msu.ru

Таблица 1

Результаты пиролитических исследований образца породы из доманикового горизонта

Исследуемый параметр	Значение
S ₁ , свободные УВ, до 300 °С, мг УВ/г породы	7,09
S ₂ , УВ-продукты пиролиза керогена и смолисто-асфальтеновых веществ, 300–600 °С, мг УВ/г породы	72,17
PI, индекс продуктивности, S ₁ /(S ₁ +S ₂)	0,09
T _{max} , температура максимального выхода УВ при пиролизе керогена, °С	428
PC, пиролизуемый C _{орг} , мас.%	6,61
RC, остаточный (непиролизуемый) C _{орг} , мас.%	6,48
C _{орг} , общее содержание C _{орг} в породе, мас.%	13,08
HI, водородный индекс, мг УВ/г C _{орг}	552
OI, кислородный индекс, мг CO ₂ /г C _{орг}	6
C _{мин} , содержание минерального углерода в породе, мас.%	8,73

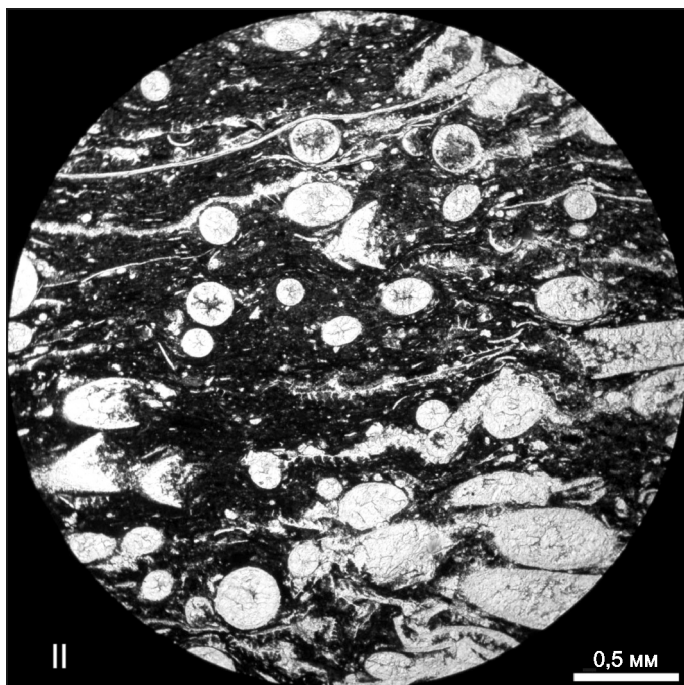


Рис. 1. Глинисто-углеродистая карбонатная порода с тентакулитами. Количество тентакулитов в породе достигает 50–70%, длина 1–1,5, диаметр 0,1–0,6 мм. Раковины выполнены кальцитом. Значительную часть в породе составляет органическое вещество

из наиболее распространенных методов определения типа и степени зрелости органического вещества (ОВ) [Лопатин, Емец, 1987; Espitalie, Bordenave, 1993]. Метод основан на программном нагреве образца породы в атмосфере инертного газа. Образующиеся в ходе нагрева УВ фиксируются пламенно-ионизационным детектором. Его сигнал фиксирует изменение количества УВ, выделившихся на каждом этапе прогрева образца породы, т.е. формирует так называемую пирограмму (рис. 2).

Углеводороды, находящиеся в породе в свободном состоянии или сорбированные, выходят в течение первых трех минут прогрева под воздействием постоянной температуры 300 °С (пик S₁). Затем прибор фиксирует УВ, получившиеся в результате крекинга керогена и тяжелой смолисто-асфальтеновой фракции битумоида (пик S₂) в температурном интервале 300–650 °С со скоростью нагрева 25 °С/мин (рис. 2). Общее содержание органического углерода (C_{орг}) вычисляется с учетом того, что углерод составляет 83% в элементном составе выделившихся УВ. Возможность контролировать нагрев породы и постоянно определять объем генерируемых ею УВ, что осуществляется

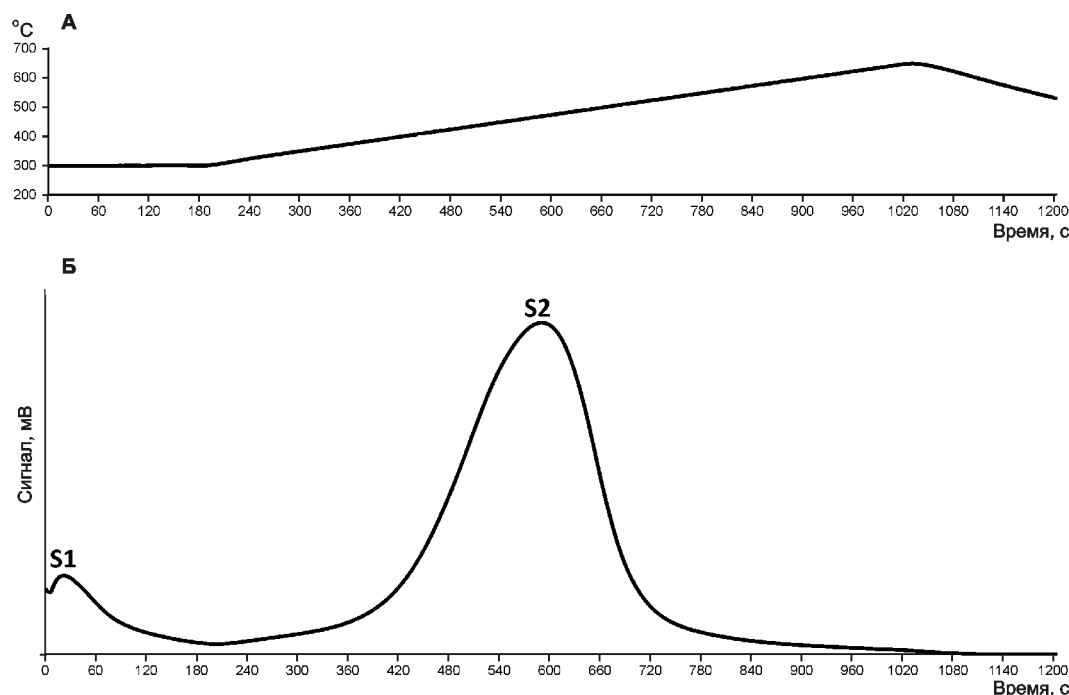


Рис. 2. Параметры прогрева образца по температурной программе Bulk rock (А) и пирограмма порошка исследуемого образца (Б)

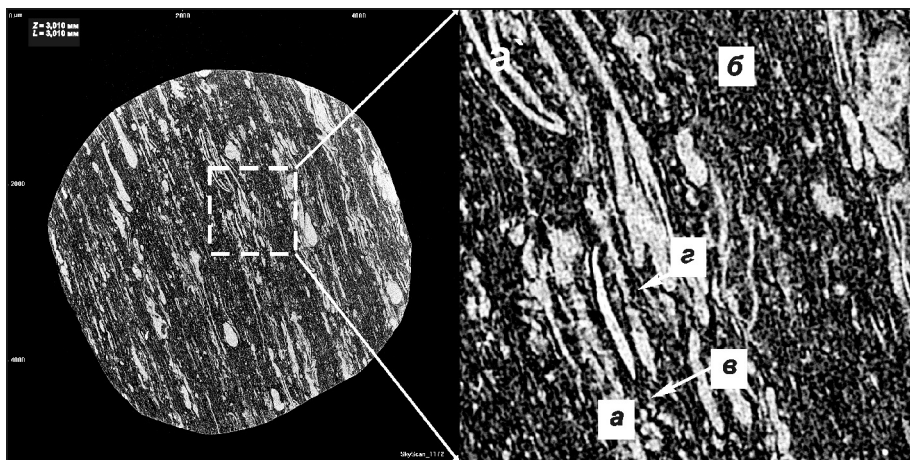


Рис. 3. Плотностное томографическое сечение образца породы: *а* — наиболее плотные светло-серые параллельные и субпараллельные участки, соответствующие карбонатным биогенным прослоям; выделяются остатки раковин тентакулитов, характерных для данного стратиграфического горизонта; *б* — серые участки, соответствующие микрокристаллической карбонатной массе; *в* — темно-серые участки — кероген и битумоиды; *г* — наиболее темные (до черного) участки — поры

с помощью пиролизатора «RockEval 6», отлично подходят для намеченного эксперимента.

Для наблюдений за соответствующими изменениями в структуре горной породы использован один из самых представительных на настоящее время неинвазивных методов — компьютерная микротомография (микроКТ, μ КТ) [Mees et al, 2003]. Наблюдения осуществлялись на компьютерном микротомографе «SkyScan-1172». Принцип работы системы основан на облучении объекта под различным углом и получении множественных рентгеновских теневых изображений [Hounsfield, 1973]. После съемки непрерывный набор изображений поперечных сечений объекта реконструируется при помощи модифицированного алгоритма Фелдкампа [Feldkamp et al.,

1984]. Такой набор сечений затем образует трехмерную плотностную модель, отображающую внутреннюю структуру и особенности минерального состава объекта с выбранной детальностью.

Для эксперимента принципиально важно, что получаемые плотностные срезы позволяют проанализировать внутреннее строение породы без какого-либо физического или химического воздействия на исследуемый образец (рис. 3).

Ключевым моментом эксперимента стало совместное применение вышеописанных методов пиролиза RockEval и микроКТ. Такой подход был применен впервые в научной геологической практике.

Эксперимент и его результаты.

Эксперимент проходил в два этапа. На первом этапе изучали изменения в структуре породы при ее последовательном прогреве, чтобы проанализировать их динамику и связь с генерацией УВ.

Таблица 2

Температурные программы разных сессий прогрева образца породы

Сессия	Интервал температуры, °С	Скорость нагрева до конечной сессии, °С/мин	Время выдерживания образца при конечной температуре сессии, мин
1	100–300	10	5
2	100–400	10	5
3	100–470	2	5
4	100–510	2	5

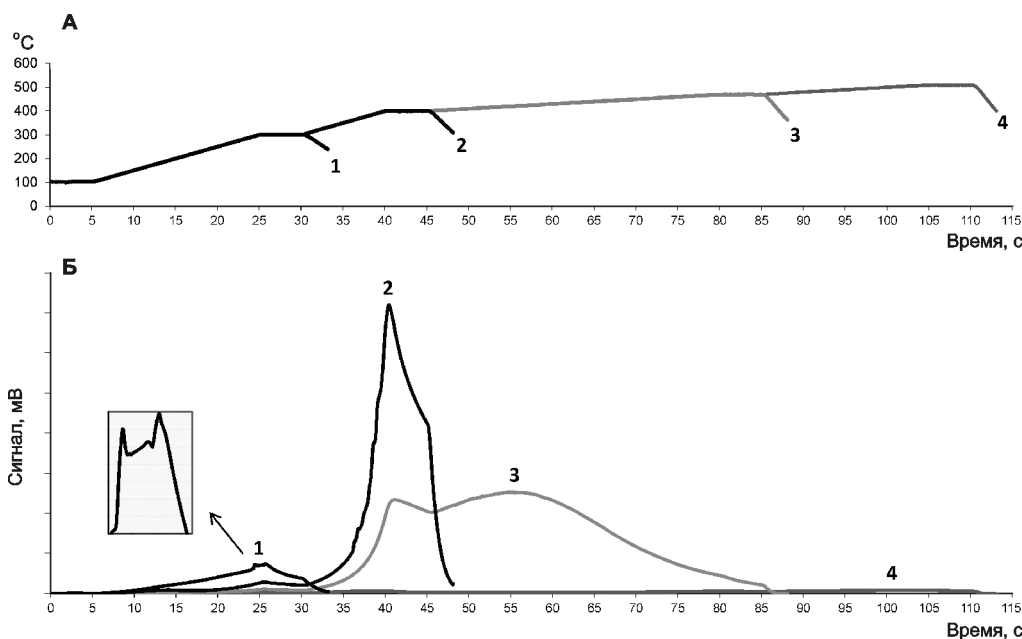


Рис. 4. Температурные программы для разных сессий прогрева (А) и пирограммы исследуемого образца для разных сессий прогрева (Б). Цифрами обозначена последовательность программ прогрева (табл. 2)

Для пиролитической и микроКТ-съемки из образца породы был изготовлен цилиндр диаметром 4 мм. МикроКТ-съемка проводилась в 5 сессиях. Для съемки образец всегда устанавливали на один и тот же торец, это позволяло на разных этапах эксперимента получать сравнимые сечения. МикроКТ-съемка чередовалась с последовательным прогревом образца в пиролизаторе до определенной температуры. Температурная программа в рамках описываемого эксперимента в каждой следующей сессии прогрева включала все предыдущие (табл. 2; рис. 4).

Сессии прогрева установили на основе предыдущих исследований. Температурный интервал каждой сессии должен был отвечать важнейшему этапу в генерации УВ нефтематеринской породой: 1) 100–300 °С — выход свободных и адсорбированных УВ и воды [Espitalie, Bordenave, 1993]; 2) 300–400 °С — начальная стадия образования углеводородов за счет высоко-температурного пиролиза твердого органического вещества (рис. 2), выход химически связанной воды [Уэндландт, 1978]; 3) 400–470 °С — температурный интервал, соответствующий наиболее интенсивной стадии образования углеводородов (рис. 2); 4) 470–510 °С — конечная стадия образования УВ. Максимальный нагрев образца определялся температурой начала активного термического разложения карбонатов [Топор, 1987], т.е., по сути, необратимого метаморфизма породы.

На рис. 5 суммированы результаты анализа структурных изменений породы при ее последовательном прогреве в ходе моделирования генерации УВ. Для большей наглядности на плотностных рентгеновских срезах выделена и представлена только часть спектра, соответствующая поровому пространству глинисто-карбонатной породы.

В результате исследований установлено, что исходная неизменная порода (рис. 5, А) характеризовалась многочисленными мелкими (до 20 мкм) порами. В целом поры связаны между собой слабо. Лишь на некоторых участках формируются небольшие трещины с раскрытостью до 5 мкм. Вероятно, наличие таких трещин объясняется тем, что толща, из которой отобран исследуемый образец, погружается и входит в верхнюю часть главной зоны нефтегенерации. Это подтверждается данными пиролитических исследований ($T_{\max}=428$ °С). Начало генерации УВ, вероятно, сопровождается увеличением порового давления, что в свою очередь может приводить к нарушению сплошности породы, причем прежде всего по напластованию.

После прогрева до 300 °С в образце отмечено увеличение количества и размеров трещин по напластованию породы (рис. 5, Б). Некоторые из новообразованных трещин выходят и раскрываются на поверхности образца, «выбрасывая» формируемые

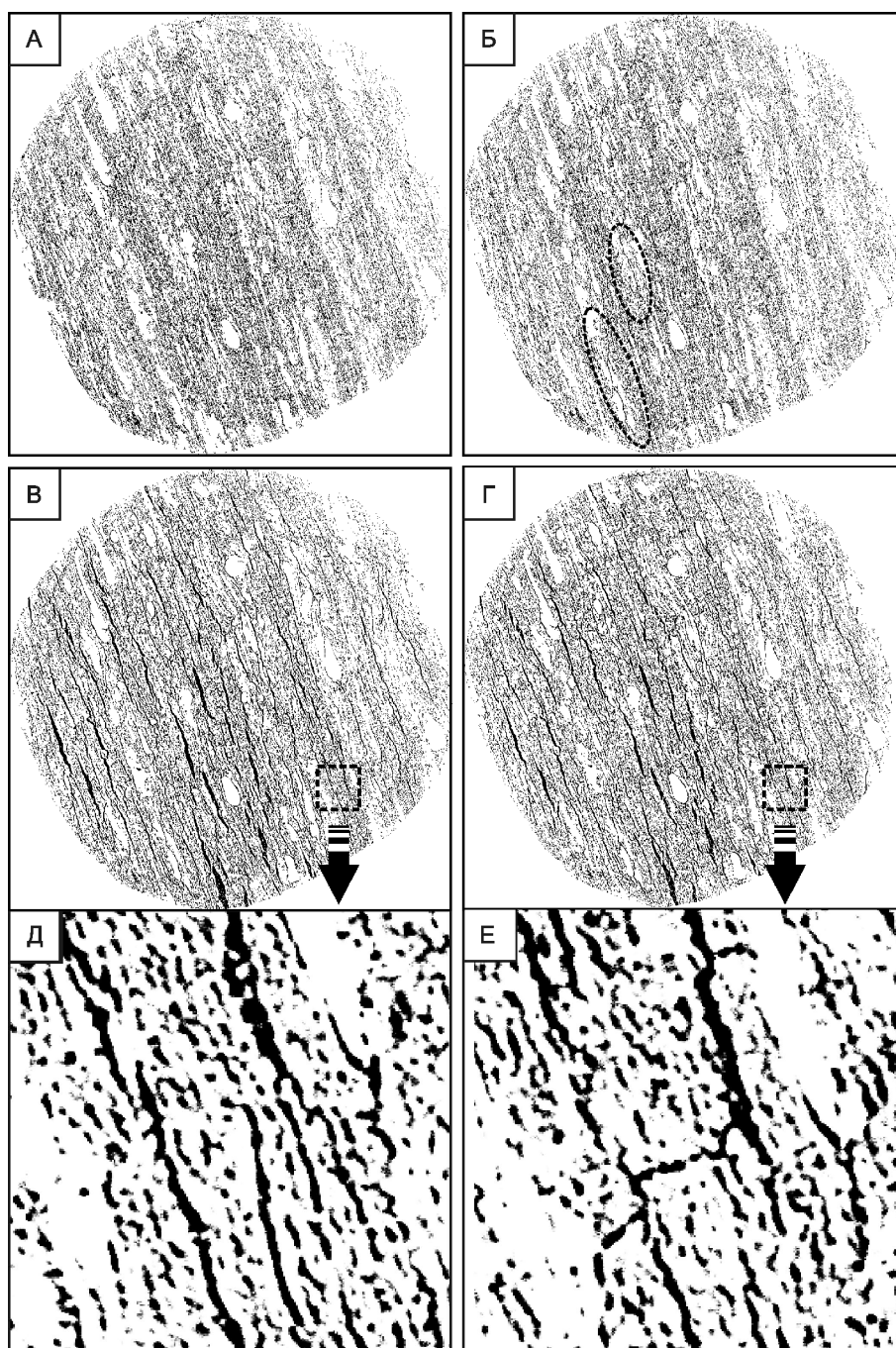


Рис. 5. Изменения в структуре образца по данным микроКТ-съемки: А — начальный неизменный образец; Б — образец прогрет до 300 °С; В, Д — образец прогрет до 400 °С; Г, Е — образец прогрет до 470 °С

УВ-флюиды наружу. Раскрытие наружу двух наиболее выраженных трещин в образце также зафиксировано на пирограмме, где отмечены два резких пика (рис. 4, Б), соответствующие относительно резкому повышению количества выходящих УВ при прогреве в температурном интервале 280–300 °С.

В образце, прогретом до 400 °С, количество и объем трещин, параллельных напластованию, становятся уже весьма значительными. Многие трещины раскрываются на поверхность образца (рис. 5, В, Д). Выход существенного объема УВ в ходе этой сессии прогрева зафиксирован на пиролитической кривой.

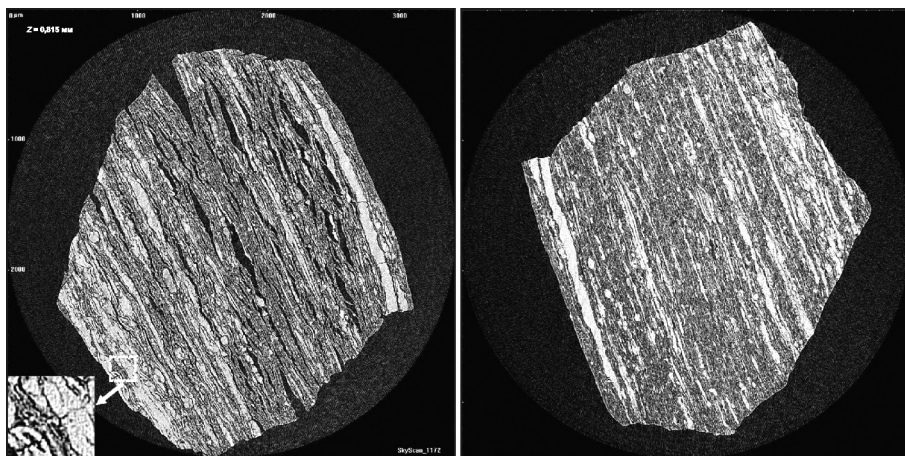


Рис. 6. Плотностное рентгеновское сечение образца породы из доманикового горизонта до (слева) и после (справа) моделирования процесса генерации УВ на пиролизаторе «RockEval 6»

Увеличилась мощность большинства трещин, они приобрели ярко выраженную линзообразную форму. Такая морфология, вероятно, связана с постепенным нарастанием внутрипорового давления по мере генерации новых порций жидких флюидов.

При нагреве образца до 470 °С морфология и количество трещин, параллельных напластованию, изменились слабо. В то же время во всем объеме образца возникли многочисленные трещины, перпендикулярные напластованию (рис. 5, Г, Е). Такие трещины характеризуются раскрытостью до 0,01 мм и протяженностью не более 0,1 мм. При этом среди них нет «слепых» трещин, т.е. все они соединяют образованные ранее относительно широкие трещины, параллельные напластованию. По-видимому, за счет таких перпендикулярных трещин происходит завершающая фаза разгрузки вновь образованных УВ из образца. Перпендикулярные напластованию трещины дают выход последним порциям УВ, которые образовывались между крупными параллельными напластованию трещинами, совершенствуя, таким образом, общую сеть путей первичной миграции флюидов в образце.

Дальнейший прогрев образца до 510 °С не принес никаких изменений в структуре порового пространства. Не отмечен и существенный дополнительный выход УВ из образца по данным RockEval.

Результаты эксперимента наглядно демонстрируют связь между этапами выхода УВ и изменениями в структуре образца при последовательном прогреве породы до определенных значений температуры. По нашему мнению, наблюдавшиеся в эксперименте процессы отражают ход генерации и первичной миграции УВ в газонефтематеринской породе.

Однако эксперимент существенно отличается от природного сценария тем, что прогрев породы в ходе лабораторного моделирования генерации УВ необходимо было многократно чередовать с ее охлаждением до комнатной температуры для проведения микроКТ-съемки.

Чтобы оценить влияние температурного расширения-сжатия на структуру породы, микроКТ-съемку выполнили на исходном образце той же породы. После проведения первой топографической съемки образец поместили в печь пиролизатора и в течение 10 мин. нагревали до 470 °С по программе Bulk rock, а затем выполнили повторную микроКТ-съемку.

На плотностном рентгеновском сечении, полученном после одноактного прогрева образца, трансформация нефтематеринской породы оказалась весьма значительной и очень похожей на полученную на первом этапе эксперимента, т.е. от-

мечены параллельно напластованию многочисленные линзообразные новые трещины и пустоты длиной до 1 и шириной до 0,07 мм. Появление таких трещин, по-видимому, вызвано аномально высоким поровым давлением, возникшим за счет скопления паров вновь образовавшихся УВ и воды в межслоевом пространстве породы, а также их последующей миграцией из образца. Кроме того, отмечены многочисленные тонкие (раскрытость до 0,006 мм) трещины, развитые перпендикулярно напластованию (рис. 6).

Наряду с увеличением объема пустотного пространства за счет новообразованных трещин отмечено уплотнение матрикса породы, что выразилось в уменьшении зон серого и темно-серого цвета, соответствующих керогену, битумоиду. По-видимому, редукция таких участков связана с генерацией УВ и их разгрузкой во вновь образованное пустотное пространство.

Перспективы исследований и их прикладной потенциал. Проведенные эксперименты ясно показали, что моделирование генерации УВ нефтематеринскими породами и наблюдения за ее процессами могут быть успешно осуществлены даже в неспециализированных лабораториях геохимической и петрофизической направленности, конечно, при условии, что их оборудование отвечает современным требованиям. Это, на наш взгляд, открывает большие перспективы для подобных интересных исследований как фундаментального, так и прикладного характера.

На следующем этапе приближения модели к природным условиям необходимо учитывать литостатическое давление, что потребует новых инженерно-технических решений по созданию обжима образца в ходе пиролитических и микроКТ-исследований. Несомненно, нужно будет анализировать состав генерирующихся и выделяющихся из образца УВ флюидов на всех стадиях эксперимента, т.е. на каждой сессии пиролитического прогрева, для чего потребуются усовершенствовать пиролитическое оборудование.

Новые интересные данные могут быть получены также при экспериментах с большей дискретностью

температурных интервалов прогрева образцов, т.е. при увеличении числа сессий прогрева. Кроме того, перспективно проведение подобных экспериментальных исследований с разными породами, обогащенными органическим веществом. Природную коллекцию можно будет расширить за счет искусственных смесей и образцов с заданными свойствами, что позволит типизировать и классифицировать процессы генерации УВ-флюидов, создать набор критериев для их характеристики.

Знание особенностей генерации УВ и сопровождающих ее процессов изменения строения породы может быть весьма полезным при прогнозировании зон развития так называемых нетрадиционных коллекторов (бажениты, доманикиты) — зон продуктивности отложений, являющихся материнскими для содержащегося в них флюида. Детальное изучение таких отложений позволит делать заключения о развитии продуктивных пластов в зависимости от состава отложений и степени зрелости органического вещества. Вопросы интенсификации притоков из подобных толщ также могут быть тесно связаны с лабораторным моделированием, сходным с описанным выше.

Как продемонстрировали результаты эксперимента, в слабопроницаемых породах перпендикулярные к напластованию трещины, формирующиеся лишь на определенном этапе «созревания» органического вещества, имеют решающее значение для формирования связанной сетки поровых каналов, способных

к фильтрации, т.е. соединенных в единую флюидодинамическую систему. На основе представлений, полученных в ходе пиролитических экспериментов по изучению изменений структуры и объема порового пространства, можно прогнозировать и/или картировать зоны развития микротрещиноватости, обеспечивающей наилучшую возможную фильтрацию в изучаемых отложениях.

Заключение. Эксперимент подтвердил возможность вертикальной миграции флюидов в изначально плотных непроницаемых нефтематеринских породах.

Установлено, что пустотное пространство богатой органическим веществом тонкодисперсной породы при контролируемом нагревании с целью генерации УВ изменяется следующим образом: а) поры исходной породы были мелкими и изолированными; б) с нагревом породы поры сначала соединяются между собой за счет пропагации новообразованных трещин вдоль напластования — субпараллельно слоистости формируются отдельные несвязанные фильтрационные интервалы; в) дальнейший прогрев приводит к образованию трещин, перпендикулярных напластованию, которые соединяют отдельные фильтрационные интервалы в единую систему.

Описанные эксперименты могут послужить основой для разработки новых методов, ориентированных на успешный прогноз зон развития нетрадиционных коллекторов. Для развития методики необходима апробация на промышленных объектах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белецкая С.Н.* Первичная миграция нефти. М.: Недра, 1990. 288 с.
- Вассоевич Н.Б.* Геохимия органического вещества и происхождения нефти. М.: Наука, 1986. 368 с.
- Клубова Т.Т.* Роль глинистых минералов в преобразовании органического вещества и формировании порового пространства коллекторов. М.: Наука, 1965. 105 с.
- Лопатин Н.В., Емец Т.П.* Пиролиз в нефтегазовой геохимии. М.: Наука, 1987. 144 с.
- Нестеров И.И., Симоненко Б.Ф., Ларская Е.С.* и др. Влияние температуры на количество и состав нефтидов при катагенезе ОВ (по экспериментальным данным) // Геология нефти и газа. 1993. № 11. С. 26–30.
- Тиссо Б., Вельте Д.* Образование и распространение нефти и газа. М.: Мир, 1981. 501 с.
- Топор Н.Д.* Термический анализ минералов и неорганических соединений. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. 190 с.
- Уэндландт У.* Термические методы анализа. М.: Мир, 1978. 526 с.
- Athy L.F.* Compaction and oil migration // AAPG Bull. 1930. Vol. 14. P. 25–35.
- Burst J.F.* Diagenesis of Gulf Coast clayey sediments and its possible relation to petroleum migration // AAPG Bull. 1969. Vol. 53. P. 73–93.
- Espitalie J., Bordenave M.L.* Rock-Eval Pyrolysis. Applied petroleum geochemistry. Ch. 2. Screening Techniques for Source Rock Evaluation, 1993.
- Feldkamp L.A., Davis L.C., Kress J.W.* Practical cone-beam algorithm // J. Opt. Soc. Amer. (A). 1984. Vol. 1. P. 612–619.
- Hounsfield G.N.* Computerized transverse axial scanning (tomography) // British J. Radiology. 1973. Vol. 46(552). P. 1016–1022.
- Mees F., Swennen R., Van Geet M., Jacobs P.* Applications of X-ray computed tomography in the geosciences // Geol. Soc. London. Spec. Publ. 2003. 215 p.
- Snarsky A.N.* Die primäre migration des erdöls // Freiburger Forschungsch. 1962. S. 63–73.
- Tissot B.P., Pelet R.* Nouvelles données sur les mécanismes de densité et de migration du pétrole, simulation mathématique et application à la prospection // Proceed. 8th World Petroleum Congress, 1971. Vol. 2. P. 35–46.