Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
1988, т. 115

УДК 550.89:551.25:552.54

ОБ ИЗМЕНЕНИИ СВОЙСТВ ПОРОВО-ТРЕЩИННОГО ПРОСТРАНСТВА КАРБОНАТНЫХ ПОРОД ПРИ УМЕРЕННО ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А.А.ШЕБЕСТА, В.М.ВИТОВТОВА, В.М.ШМОНОВ

Строение порово-трещинного пространства карбонатных пород-коллекторов определяет способность породы вмещать жидкие и газообразные углеводороды или другие флюиды. Погружение осадочных пород на большую глубину приводит к катагенной эволюции коллекторов - изменению структуры и объемов порового пространства за счет перераспределения материала под действием изменяющихся внешних факторов [4]. Катагенное преобразование осадочных пород обусловлено нарушением физико-химических равновесий сложной многокомпонентной системы горная порода - вода - газ - углеводороды. Масштабы катагенеза зависят от интенсивности действующих термобарических и геохимических факторов и их сочетания. Необходимо отметить важнейшую роль подземных вод в катагенезе карбонатных пород. Подземные воды как природные растворы выступают и в роли внешнего фактора, влияющего на процессы растворения, переноса и перестложения минеральных компонентов пород, и в роли участника взаимодействия природной системы, претерпевающего при этом существенные изменения своего состава и свойств.

В глубоких скважинах в интервалах отбора керна, как правило, зафиксированы резкие колебания проницаемости и пористости пород, связанные с литолого-фациальной изменчивостью. Помимо неоднородности литологического состава пород, на пористость и, следовательно, на проницаемость, существенно влияет температура.

В.М.Добрынин [2] отмечает, что связь между интенсивностью уплотнения пород и температурой проявляется количественно, что связано с влиянием температуры на скорость эпигенетических преобразований в породе. С одной стороны, увеличение температуры ведет к тепловому расширению породы и увеличению ее порового пространства. С другой стороны, интенсификация эпигенетических процессов в поровом пространстве (растворение минералов на контакте зерен и вынос растворенного вещества) способствует уменьшению объема пор. Например, в районах Предкавказья с глубин 4300 м наблюдается уменьшение открытой пористости песчаников до 6-7 % [5]. Развитые в них разномасштабные трещины дают основание рассматривать данные песчаники как коллекторы порово-трещинного типа. В районах, отличающихся тектонической активностью, на больших глубинах в породах наблюдается различная степень вторичного минералообразования, что соответствует различию в емкостных и фильтрационных свойствах одновозрастных пород. На платформенном берегу

Терско-Кумского артезианского бассейна, характеризующимся нисходящими движениями и застойным режимом вод, коллекторские свойства пород с глубиной погружения ухудшаются. На некоторых площадях открытая пористость достигает всего 2-6 %, что обусловливает проницаемость в сотые доли миллидарси [5].

Эксперименты по определению проницаемости горных пород на установке «Дарси" [6] позволили оценить зависимость проницаемости породы от температуры и внешнего давления на скелет породы и проследить динамику изменения проницаемости образцов пород при многосуточной фильтрации через них воды.

Данная установка с независимой регулировкой давления на каркас породы и флюид позволяет определять проницаемость горных пород на цилиндрических образцах с естественной структурой в условиях, соответствующих природным (температура и давление). Давление на образец породы (диаметр 0,7-1,2 см, длина 2-4 см) передавалось через тонкостенную (0,2 мм) медную трубку, к которой были припаяны две боковые шайбы с капиллярами, в один из которых подавался газ (аргон) под давлением 1-16 МПа, другой был соединен с вольюмометром ДАГВ-70-2. Образец в медной обечайке помещался в автоклав, который находился в электропечи.

Исследование проницаемости образцов пород проводилось следующим образом: определяли проницаемость при комнатной температуре и давлении обжима 50 МПа, затем проводили измерения при давлениях 80, 100, 125 МПа. После этого давление снижали до 50 МПа, устанавливали более высокую температуру (100 и 200 °С) и повторяли измерения при различных давлениях.

Для определения изменения проницаемости образцов при фильтрации через них воды вначале определялась проницаемость сухих образцов по аргону при температуре 200 °С и давлении на каркас породы 75 МПа. Затем на образец подавалось давление 130 МПа и через него фильтровалась дистиллированная вода под давлением 55 МПа в течение трех суток. Расход воды был 7-10 см^3/сутки. По истечении трех суток образец высушивался (при температуре 200 °С и давлении 75 МПа) и вновь определялась его проницаемость по газу. Этот цикл повторялся несколько раз.

Часть опытов проводилась по несколько видоизмененной методике. Чтобы не прерывать фильтрацию для высушивания образца и измерения проницаемости по газу, периодически измерялась объемная скорость потока воды при поддержании перепада давления. Объем порции воды при замере составлял 0,6-1,0 см^3 при точности измерения $\pm$0,05 см^3. Эти измерения позволили определять коэффициент фильтрации непосредственно в ходе экспериментов.

Согласно закону Дарси, проницаемость с учетом изменения плотности газа с температурой

$$K = \frac{Q \mu V_{тр}}{S \Delta p V_{ст}},$$

где Q - поток газа, приведенный к стандартным условиям; μ - вязкость газа или жидкости; $V_{тр}$ - удельный объем газа при температуре и среднем давлении опыта; S - площадь поперечного сечения образца; Δp - градиент

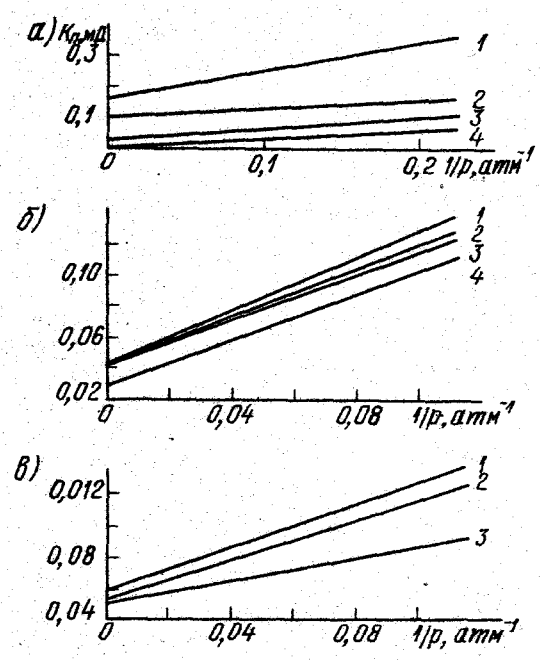


Рис.1. Зависимость проницаемости доломита от обратного, среднего давления фильтрации: а, б и в – при температуре соответственно 25, 100 и 200 °С
1, 2, 3 и 4 – при давлении на скелет породы, равном соответственно 50, 80, 100 и 125 МПа

давления; $V_{ст}$ – удельный объем газа при стандартных условиях.

В экспериментах использовались образцы известняка, доломита и песчаника, отобранные из скважин Тарумовской термоаномальной площади (Восточно-Предкавказский артезианский бассейн) с глубин 4800–5500 м.

По измеренным потокам газа (аргона) через образец доломита были определены значения проницаемости образцов по газу при различных температурах и давлениях на скелет породы. Зависимость проницаемости от величины, обратной среднему давлению газа, является линейной [3]. Проницаемость породы по жидкости (абсолютная проницаемость) всегда меньше проницаемости по газу и определяется в точке пересечения прямых с осью абсцисс (рис.1). В проведенных опытах абсолютная проницаемость доломита составила 0,01–0,16 мД при комнатной температуре, 0,031–0,044 и 0,05–0,06 мД соответственно при 100 и 200 °С.

Полученные результаты позволили оценить зависимость проницаемости доломита от температуры и внешнего давления (рис.2). Как и следовало ожидать, при любой постоянной температуре проницаемость породы уменьшается с увеличением внешнего давления. Анизотропия упругих свойств минералов и минеральных ассоциатов приводит к растрескиванию зерен при повышении температуры. Увеличение внешнего давления на скелет породы влечет за собой уплотнение структуры породы за счет залечивания дефектов и закрытия ряда трещин. Порода становится более однородной, проницаемость ее снижается. При дальнейшем увеличении температуры под действием термоупругих напряжений начинается процесс микротрещинообразования [1]. Зерна распадаются на блоки и отдельные агрегаты, и пористость породы увеличивается. Однако под действием внешнего давления процесс уплотнения породы продолжается: поры и

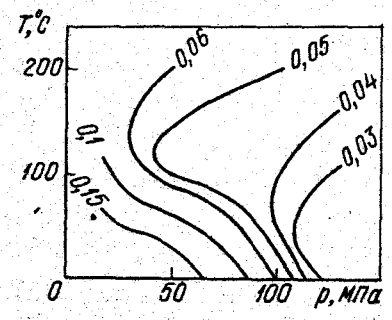


Рис.2. Линии равных проницаемостей для доломита в миллидарси

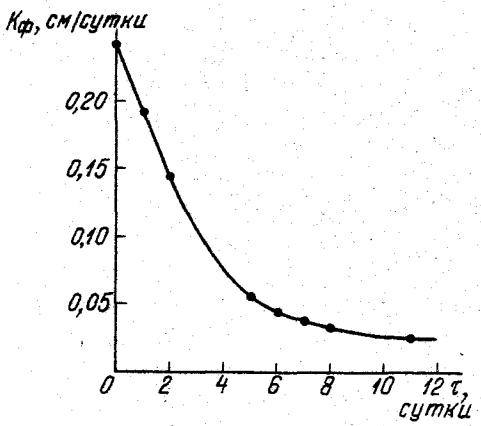


Рис.3. Изменение коэффициента фильтрации воды $K_ф$ для известняка при температуре 200 °С, внешнем давлении 130 МПа и перепаде давления фильтрации, равном 10 МПа

трещины забиваются тонким материалом продуктов разрушения минералов. Проницаемость породы при этом может незначительно увеличиться, не нарушая тем не менее общей тенденции: она продолжает уменьшаться при увеличении нагрузки на скелет породы.

В опытах по фильтрации дистиллированной воды через образцы известняка было обнаружено значительное снижение коэффициента фильтрации (рис.3). Давление воды на входе в образец и на выходе из него соответственно 60 и 50 МПа. Объемная скорость фильтрации воды составляла 7-8 см³/сутки. В отличие от известняка, при работе с песчаником в течение длительного времени не удавалось добиться фильтрации воды через образец в таких объемах, чтобы их можно было измерить.

Песчаник представляет собой плотную породу, состоящую из мелко- и тонкозернистого обломочного материала (в основном кварца) на карбонатно-глинистом цементе. Образец взят с глубины 5500 м. При давлении на каркас породы 130 МПа и температуре 200 °С давление воды на входе в образец поднимали до 100 МПа, но фильтрация осуществлялась очень медленно. Проницаемость песчаника до начала фильтрации была очень низкой (меньше 0,01 мД). Через 26 суток при вскрытии образца было обнаружено, что в капилляре, прилегающем к выходному торцу образца, образовался осадок, идентифицированный как карбонаты кальция и магния (рис.4). Взаимодействие воды с карбонатным цементом песчаника при высокой температуре привело к образованию значительных количеств углекислоты. По экспериментальным данным, в результате двухнедельного взаимодействия 1,2 г песчаника с 3,5 см³ дистиллированной воды при температуре 200 °С образовалось 0,31 мг CO_2. Увеличение содержания углекислого газа в растворе приводит к повышению растворимости карбонатов. На выходе из образца происходил резкий сброс давления и удаление углекислого газа. Помимо этого, происходило испарение тех небольших объемов фильтрующейся воды, так как система была открыта по отношению к атмосфере. Результатом этих процессов и было

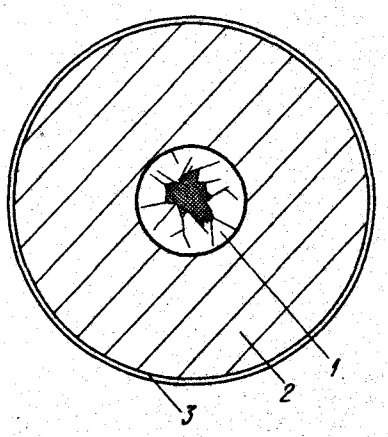


Рис.4. Карбонаты, выпавшие в осадок при фильтрации воды через песчаник (температура 200 °С, внешнее давление 130 МПа, увеличение 10)
1 – осадок; 2 – донышко (сталь); 3 – обечайка (медь)

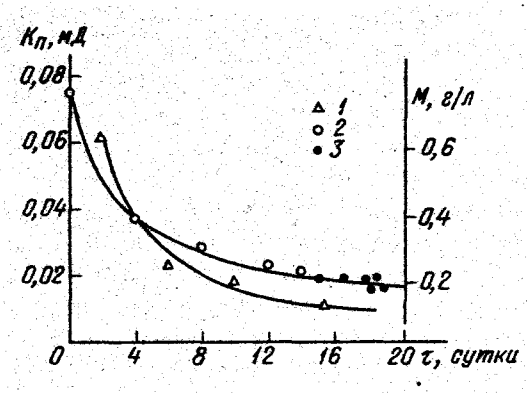


Рис.5. Изменение минерализации воды M и коэффициента проницаемости известняка $K_п$ при фильтрации воды через породу (температура 200 °С, внешнее давление 130 МПа)

1 – минерализация воды; 2 и 3 – проницаемость по газу и воде соответственно

образование карбонатного осадка на выходе из образца.

Реализация комбинированной методики определения проницаемости образцов пород по газу и по воде при многосуточной фильтрации воды через образцы известняка дала вполне удовлетворительную сходимость результатов. Проницаемость образцов известняка, определенная по газу до начала опытов, составляла 0,07–0,08 мД (температура 200 °С, внешнее давление 75 МПа). За время опыта произошло существенное снижение проницаемости породы (рис.5). В начальный период опыта после каждой трехсуточной фильтрации воды с величиной потока около 10 $см^3$/сутки и последующим высушиванием образца проницаемость образца определялась по газу, а в последние несколько суток, не прерывая фильтрацию, проницаемость измеряли по потоку воды. В течение всего опыта поддерживалась температура 200 °С, внешнее давление на скелет породы при фильтрации воды было увеличено до 130 МПа, так как фильтрация осуществлялась при среднем давлении 55 МПа.

Периодический анализ проб воды, фильтрующейся через породу, зафиксировал снижение минерализации воды в строгом соответствии с уменьшением проницаемости известняка. Впрочем, более правильно говорить о том, что проницаемость известняка снижается в соответствии с уменьшением минерализации воды, фильтрующейся через породу. Отметим, что до начала фильтрации образец находился продолжительное время (двое суток) под внешним давлением 75–130 МПа при температуре 200 °С, так что компенсация декомпрессии образца в ходе опыта не могла служить причиной такого значительного снижения проницаемости.

Уменьшение проницаемости породы может происходить по ряду причин. Во-первых, за счет химической кольматации путей движения воды: микротрещин и пор. Если обратить внимание на динамику изменения минерализации воды и соответственно проницаемости породы, то можно обнаружить, что в первые трое суток фильтрации произошел наибольший вынос растворенных компонентов (порода потеряла 0,25 % массы), тогда как за последние семь суток опыта потеря массы образца породы составила 0,05 %. Соответственно этому изменяется и проницаемость известняка. По-видимому, основными причинами уменьшения проницаемости породы было растворение минералов, которое в первую очередь затрагивало грани скелета, находящиеся под максимальной нагрузкой, и дальнейшее переотложение карбонатов по пути движения воды. Растворение и отложение солей в совокупности со значительным внешним давлением приво-

дило к уплотнению породы, уменьшению порового пространства и, в конечном итоге, к снижению проницаемости.

Выводы

I. Выполненная серия экспериментов позволила оценить влияние температуры и внешнего давления на проницаемость карбонатных горных пород. Увеличение температуры приводит к растрескиванию зерен и образованию микротрещин, что влечет за собой некоторое увеличение проницаемости пород. Но при погружении пород преобладает все-таки тенденция уменьшения проницаемости под действием внешнего давления.

2. Гидрогеохимические процессы взаимодействия водных растворов с горными породами в глубокозалегающих коллекторах ведут к снижению проницаемости пород. В первую очередь это касается призабойных зон нагнетательных скважин, где гидрогеохимические процессы протекают наиболее активно.

3. При разработке геотермальных месторождений циркуляционным способом снижение проницаемости пород за счет гидрогеохимических процессов повлечет за собой увеличение зоны теплоотбора в результате включения новых путей движения теплоносителя (более проницаемых участков) и увеличит время движения теплоносителя от нагнетательных скважин до эксплуатационных. Увеличение времени взаимодействия теплоносителя с горными породами (одного из важнейших факторов, определяющих интенсивность гидрогеохимических процессов) приведет к росту минерализации теплоносителя и накоплению в его составе агрессивных компонентов.

4. Результаты проведенных опытов свидетельствуют о важности и необходимости тщательных исследований кернового материала, которые помогут более полно представить картину движения водных растворов по подземному коллектору и динамику изменения при этом емкостных и фильтрационных характеристик горных пород коллектора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балашов В.Н., Зарайский Г.П. Экспериментальное и теоретическое исследование процесса разуплотнения горных пород при нагревании. – В кн.: Очерки физико-химической петрологии. М., Наука, 1982. Вып. 10.

2. Добрынин В.М. Изменение максимальной первичной пористости песчаников на больших глубинах. – Геология нефти и газа, 1968, № 9.

3. Катц Д.Л., Корнел Д., Кобаяши Р. и др. Руководство по добыче, транспорту и переработке природного газа. М., Недра, 1965.

4. Прошляков Б.К., Гальянова Т.И., Пименов Ю.Г. Коллекторские свойства осадочных пород на больших глубинах. М., Недра, 1987.

5. Ханин В.А., Канышева Р.А. Влияние вторичных преобразований на коллекторские свойства терригенных пород-коллекторов мезозоя в глубокопогруженных зонах Предкавказья. – В кн.: Геология и нефтегазоносность мезозоя Предкавказья. М., Наука, 1982.

6. Шмонов В.М., Чернышов В.М. Установка с неравным давлением на флюид и на твердые фазы. – В кн.: Проблемы эксперимента в твердофазовой и гидротермальной аппаратуре высокого давления. М., Наука, 1982.