

Н. А. МИНСКИЙ

**РОЛЬ КАЛЬЦИТА И МОНТМОРИЛЛОНИТА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ
ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ ОПТИМАЛЬНЫХ
СВОЙСТВ КОЛЛЕКТОРОВ**

(Представлено академиком Н. В. Беловым 2 VIII 1972)

Известно ⁽¹⁸⁾, что темп нарастания давления в осадочных породах, содержащих кальцит и монтмориллонит, повышается на определенной глубине. Некоторые геохимические причины этого явления рассматриваются с учетом зональности коллекторских свойств пород ^(5, 8).

Растворение и кристаллизация кальцита, взаимопревращение монтмориллонита и гидрослюды в породах, испытывающих вертикальные перемещения, зависят от изменений T , $P_{\text{общ}}$ и P_{CO_2} и от концентрации реагирующих компонентов ^(2, 4, 6, 9, 15), а также от изменений рН. Помимо отмеченных параметров, на величину рН оказывает влияние эффект высаливания CO_2 (S_{CO_2}) и эффект минерализации воды ($S_{\text{H}_2\text{O}}$) ⁽⁹⁾. Упомянутая связь исследована с учетом теории донорно-акцепторного эффекта ⁽¹⁾ и возможности ионизации льдоподобного каркаса воды ⁽¹⁰⁾.

Допускается, что кальцит и монтмориллонит имеют близкое равновесное значение рН (25° , 1 ат) 7,8 ^(2, 20). Для случая, когда седиментационная вода имеет значение рН (20° , 1 ат) 8,5 и умеренную напряженность теплового поля (60° на глубине 1,5 км), найдено, что граница устойчивости кальцита и монтмориллонита (г.у.к.) располагается на глубине 1,4 км ⁽⁹⁾.

Ниже обсуждается идеализированная модель изменения давления в породах, которая относится к отмеченному случаю. В качестве коллектора рассматривается песок (песчаник) с базальным кальцит-монтмориллонитовым цементом или трещиноватый известняк с примесью монтмориллонита; в качестве глинистого осадка — ил (глинистая порода) кальцит-монтмориллонит-гидрослюдистого состава. Рассматриваемая модель учитывает динамику структурно-минералогических изменений в породах, погружавшихся на различную глубину. Названные изменения изучались в палеогеновых, меловых и юрских песчаниках и известняках Синда, Потвара, в меловых песчаниках эпигерцинской платформы Средней Азии, в нижнекаменноугольных песчаниках и известняках Предуральяского варисского прогиба, в юрских песчаниках Джунгари и Восточного Тянь-Шаня, в неогеновых песчаниках Чукотского полуострова.

Изменение давления в жидкой фазе пород описывается формулами Эзи (1) и Дарси (2)

$$\sigma = P_{\text{ге}} - P_{1,2} = g \left(\frac{d_1 - d_2}{b} \right) \left\{ \ln \frac{\Phi_1}{\Phi_2} - (\Phi_1 - \Phi_2) \right\}, \quad (1)$$

где σ — эффективное давление на скелет породы, $P_{\text{ге}}$ — геостатическое давление, P_1 — поровое давление жидкости в глинистой породе, P_2 — поровое давление в коллекторе, g — постоянная силы тяжести, d_1 — плотность твердых частиц, d_2 — плотность воды, Φ_1 и Φ_2 — пористость в начале и в конце уплотнения, b — эмпирическая постоянная, получаемая с графика изменения пористости с глубиной

$$\Delta P = QKs/\mu Z, \quad (2)$$

где ΔP — перепад давлений, Q — расход фильтрующейся жидкости, K — проницаемость, s — площадь сечения потока, Z — длина пути фильтрации, μ — вязкость жидкости.

В начальный этап погружения, когда до 40% воды свободно удаляется через тонкий (до 2 м) слой осадка в бассейн (12), как показывают расчетные значения σ , в жидкой фазе осадка существует гидростатическое давление (рис. 1, a'').

Уменьшение проницаемости в глинистом осадке и в коллекторе в подзоне A_2 (что связано главным образом с кристаллизацией кальцита и с новообразованием монтмориллонита за счет терригенных силикатов) вызы-

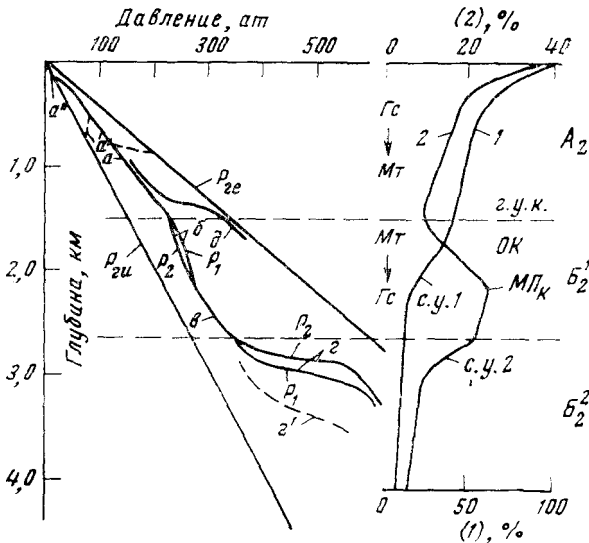


Рис. 1. Изменение давления в глинистой породе (1) и в коллекторе (2) и максимальной пористости в погружающихся породах, в состав которых входит кальцит, монтмориллонит (Мт) и гидрослюда (Гс). $P_{ге}$, $P_{гн}$ — геостатическое и гидростатическое давление; P_1 — давление в жидкой фазе в глинистой породе; P_2 — давление в жидкой фазе в коллекторе; ОК — область оптимальных свойств коллекторов; A_2 — верхняя подзона уменьшения проницаемости и емкости пустотных пространств; B_2^1 — подзона глубинного увеличения емкости пустотных пространств и проницаемости; B_2^2 — подзона уменьшения емкости пустотных пространств и увеличения проницаемости; МПк — аномалия максимальных значений пористости; с.у.1 — область ступенчатого уплотнения глинистых пород; с.у.2 — область ступенчатого уплотнения коллекторов. Объяснение в тексте

вает некоторое повышение темпа нарастания давления с глубиной (рис. 1, a). Пауза в погружении осадков приводит к сдвигу кривой $P_{1,2}$ в сторону $P_{гн}$ (рис. 1, a') (14). В моделях, не учитывающих снижения проницаемости коллектора в подзоне A_2 (3, 14, 17, 19), система является постоянно открытой. В такой системе коллектор способен пропустить жидкости больше, чем отжимается из глинистых пород. Достаточно быстрое отжатие (характерное для многих экспериментов) приводит к коллапсу поровых каналов в фильтрующем слое глины. Возникающая в результате этого изоляция глинистого пласта является причиной приближения P_1 к $P_{ге}$ (рис. 1, пунктирное ответвление от a).

В области оптимальных свойств коллекторов (ОК), на глубине 1,4–2,1 км, происходит снижение темпа нарастания давления с глубиной (рис. 1, b). В глинистых породах по сравнению с коллекторами появляется избыточное давление ($\Delta P_r = P_1 - P_2$). ΔP_r возникает из-за того, что емкость (и проницаемость) коллекторов возрастает и улучшается связь с областью разгрузки пластовых вод. В результате вновь активизируется эмиграция

жидкой фазы из достаточно уплотненных до этого глинистых пород. Отжатие жидкой фазы в коллектор облегчается тем, что в области ОК в глинистых породах, так же как и в коллекторах, растворяется кальцит, но в глинистых породах доминирует процесс превращения монтмориллонита в гидрослюда (процесс идет с уменьшением объема вещества) ⁽¹⁶⁾. Таким образом, появляются предпосылки для ступенчатого уплотнения глинистых пород (с.у. 1). Процесс с.у. 1 проявляется на фоне плавного уплотнения пород с глубиной ⁽¹¹⁾ и сопровождается гидрохимической инверсией подземных вод. Процесс с.у. 1 активизируется по мере активации связи коллектора с областью разгрузки пластовых вод, в основном под влиянием тектонических причин (разломы по периферии бассейна седиментации); с.у. 1 (и даже плавное уплотнение) проявляется весьма незначительно, если у коллекторов нет области разгрузки или потенциальные коллекторы в разрезе отсутствуют. Примером служат осадки некоторых акваторий Тихого океана, где до глубины 0,9 км заметного уплотнения глинистых осадков не наблюдается; окремнение океанических осадков препятствует развитию с.у. 1 и на более глубоком уровне (2—2,5 км).

Уплотнение известкового ила интенсивно проходит только в верхней части подзоны A_2 ; глубже известковые илы превращаются в консолидированные известняки. В известняках процесс с.у. 1 развивается преимущественно вдоль трещин и кальцитовых жил (где кальцит растворяется), а не по всей массе породы, как это имеет место в глинах, так как вещество известняков, если оно не рассечено трещинами, представляет собой замкнутую систему.

Кальцитовый каркас коллекторов более массивен по сравнению с каркасом глинистых пород. Объем пустотных пространств, возникших при растворении кальцита, в коллекторах сохраняется на большей глубине, чем у глинистых пород, и только глубже аномалии максимального значения пористости ($МП_k$) начинается заметное сближение зерен (и фрагментов) коллекторов, что вызывает плавное повышение темпа нарастания давления с глубиной (рис. 1, *в*).

В большинстве изученных районов в коллекторах, погружившихся (или погружавшихся) ниже 2,7 км, наблюдается перестройка структуры. Зерна и фрагменты пород в небольшом интервале глубин (в среднем 0,5 км) начинают занимать положение плотнейшей упаковки. Рассматриваемое ступенчатое уплотнение коллекторов (с.у.2) происходит в результате превышения σ над напряжением, возникающим при взаимном трении перемещающихся зерен (и фрагментов) пород (f). Процесс с.у. 2 сопровождается резким (в небольшом интервале глубин) повышением P_2 , до 500—600 ат (рис. 1, *з*); согласно уравнению (1) и (2), $\Delta P_k = P_2 - P_1$ может достигать при этом 100—140 ат. Уплотненные и обычно окремненные глинистые породы в области проявления с.у. 2 уже обладают противстоящим давлением скелета породы каркасом ($\sigma = P_{ге} - P_{гн}$ или $P_1 \rightarrow P_{гн}$). В области с.у.2 появляются предпосылки для реэмиграции жидкой фазы в боковую глинистую породу и вдоль коллектора в сторону ОК. В контактирующих с коллекторами эоценовых глинистых сланцах и мергелях и юрских аргиллитах (Потвар) наблюдалась разветвленная сеть трещин, которые могли возникнуть во время инъекции жидкой фазы в перечисленные породы путем естественного гидроразрыва при с.у. 2.

Пауза в погружении вызывает снижение $P_{1,2}$ (рис. 1, *з'*). Но глубже 3,5 км ΔP_k исчезает и $P_{1,2}$ приближается к $P_{ге}$, так как начинается пластическая деформация пород на уровне кристаллической решетки минералов. Быстрый подъем пород из подзоны B_2^1 в подзону A_2 (рис. 2, IV, V) приводит к картине геобарической (рис. 1, *д*), а также геотермической и физико-химической инерции. Так как глубина границы устойчивости кальцита (и монтмориллонита) уменьшается с понижением начальных значений рН седиментационных вод и с усилением напряженности теплового поля ⁽⁸⁾, в обстановке повышенной напряженности теплового поля ступен-

чатое уплотнение коллекторов происходит на меньшей глубине (1,5–2 км), но при условии, что $\sigma > f$.

В пространстве область оптимальных свойств коллекторов представлена линейной зоной или поясом, являющимся следом пересечения поверхности границы устойчивости кальцита и наклонного пласта. Вследствие того, что глубина поверхности границы устойчивости кальцита зависит от T , $P_{\text{общ}}$ и от начальных значений рН седиментационных вод (которые для различных пластов неравнозначны), пояс оптимальных свойств коллекторов имеет гетерогенную структуру и различную мощность, что подтверждается изучением природных объектов⁽¹¹⁾. Располагаясь на относительно постоянной глубине и сохраняя субпараллельную ориентировку с изогипсами погружающихся пластов, пояс оптимальных свойств коллекторов (или группа поясов) мигрирует вверх по их восстанию. Пояс оптимальных свойств коллекторов замыкается при этом в сводах погружающихся антиклиналей (рис. 2, II, III). Новый интерес представляют

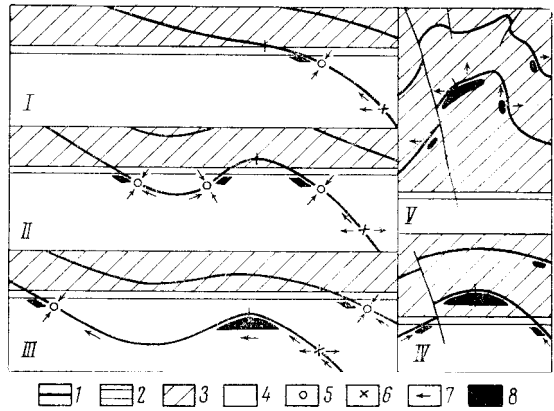


Рис. 2. Миграция областей оптимальных свойств коллекторов. I, II, III — циклы погружения пород; IV, V — фаза восходящих движений на примере месторождения Кхаур (Потвар). 1 — свиты нефтематеринских пород и коллекторов; 2 — граница устойчивости кальцита и монтмориллонита (с.у.к. на рис. 1); 3 — подзона A_2 ; 4 — подзона B_2^4 ; 5 — область ОК; 6 — область с.у.2; 7 — направление миграции флюидов; 8 — скопления углеводородов

тепловые аномалии на моноклиналях, где поверхность глубинного уровня границы устойчивости кальцита, имея положительный изгиб, создает предпосылки для формирования ловушек нефти и газа типа диагенетического выклинивания (по классификации Н. Б. Вассоевича, 1964 г.).

Рассмотренный материал прежде всего подтвердил огромное практическое значение закона Вассоевича о главной фазе нефтеобразования в связи с тем, что в начале этой фазы появляется относительный вакуум в коллекторах, что активизирует эмиграцию нефти из нефтематеринских пород. В главной зоне нефтеобразования, в поясах оптимальных свойств коллекторов должны концентрироваться основные запасы нефти.

Всесоюзный научно-исследовательский геологоразведочный нефтяной институт
Москва

Поступило
2 VIII 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Н. В. Белов, Минералогия, сборн. Львовск. геол. общ., № 7 (1953). ² Р. М. Гаррелс, Ч. Л. Крайст, Растворы, минералы, равновесия, М., 1968. ³ В. Д. Ломтадзе, ДАН, т. 98, № 3 (1954). ⁴ С. Д. Малинин, Сборн. Геохимические исследования в области повышенных давлений и температур, «Наука», 1965. ⁵ Н. А. Минский, М. К. Калинин, ДАН, т. 173, № 5 (1967). ⁶ Н. А. Минский, Изв. АН СССР, сер. геол., № 9 (1967). ⁷ Н. А. Минский, Ю. И. Корчагина, Геология нефти и газа, № 9 (1970). ⁸ Н. А. Минский, Международн. геохимич. конгресс, 1971. ⁹ Н. А. Минский, Геохимич. сборн. Тр. Всесоюзн. и.-и. геол.-разв. нефт. инст., т. 98, 4 (1971). ¹⁰ Н. А. Минский, там же, т. 139 (1973). ¹¹ Н. А. Минский, Сборн. Состояние и перспективы изучения коллекторов нефти и газа, 1971. ¹² Е. А. Романкевич, ДАН, т. 116, № 3 (1957). ¹³ Б. Н. Рыженко, Сборн. Геохимические исследования в области повышенных давлений и температур, «Наука», 1965. ¹⁴ Дж. Смит и др., Сборн. Международн. нефтяной конгресс, 1971. ¹⁵ Н. И. Хитаров, В. А. Пугин, Геохимия, № 7 (1966). ¹⁶ J. F. Burst, Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol., v. 53, 1 (1969). ¹⁷ C. Y. Chilingar, L. Knight, Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol., v. 44, 1 (1960). ¹⁸ G. Dickinson, Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol., v. 37, 5 (1953). ¹⁹ H. D. Hedberg, Am. J. Sci., v. 5, 31 (1936). ²⁰ G. Millot, Geol. des Argiles, 1964.