

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СТРУКТУРЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛИНИСТОГО МАТЕРИАЛА В ТЕРРИГЕННЫХ КОЛЛЕКТОРАХ

Предложена методика анализа структуры распределения глинистого материала в породе, базирующаяся на учете коэффициента пористости глинистой компоненты. Приведены уравнения, позволяющие на основе данных стандартных лабораторных исследований керна сделать количественные определения пористости глинистой компоненты и определить долевое соотношение рассеянного, структурного и слоистого типов глинистости. Для коллекторов сложного микрослоистого строения показана возможность определения коэффициента $\chi_{мг}$, необходимого для уточнения эффективной мощности коллекторов.

Сложившаяся на настоящий момент мировая и общероссийская тенденция потребления углеводородных ресурсов приводит к сокращению подтвержденных запасов углеводородного сырья, поскольку добыча растет быстрыми темпами, а поиск новых месторождений не только не восстанавливает извлеченные запасы, но зачастую найденные объемы не компенсируют затрат на осуществление поиска. В данной ситуации необходимо осуществлять бережное отношение к разведанным запасам, всестороннее их изучение, регулярный пересчет, локализацию остаточных запасов, что приведет к увеличению их коэффициента извлечения и воспрепятствует сокращению минерально-сырьевой базы.

В настоящий момент определению глинистости терригенных коллекторов при обработке и интерпретации данных ГИС, а также при классификации коллекторов не уделяется достаточного внимания [1]. На наш взгляд, это происходит из-за несогласованности понятия «глинистость», используемого различными исследователями. Так, В.В. Ларионов [8] доказал возможность использования метода гамма-каротажа для определения весовой глинистости, а Б.Ю. Вендельштейн [7] обосновал зависимость относительной аномалии каротажа самопроизвольной поляризации скважины от относительной глинистости. Тем не менее, многие современные исследователи используют данные как гамма-каротажа, так и поляризации скважины для прямого определения объемной глинистости без достаточного теоретического обоснования.

Кроме того, в практике интерпретации данных ГИС широко используются интерпретационные модели, разработанные лишь для двух наиболее упрощенных вариантов распределения глинистого вещества в структуре коллектора – рассеянного и слоистого типов глинистости [4, 6, 9, 10]. Более сложные модели так называемой двойной глинистости [2, 5] не получили широкого признания и распространения, что, возможно, вызвано еще более сложным строением коллекторов, наличием микрослоистости.

Предлагаемая нами методика анализа структуры глинистого материала основана на классических, общепринятых в мировой практике [11, 13] представлениях о типах распределения глины в породе. Так, для терригенного песчано-глинистого коллектора возможны три принципиальных варианта распределения глинистого вещества в структуре породы (рис. 1). В соответствии с классическими схемами, рассеянное глинистое вещество заполняет поровое пространство породы, структурное включено в скелетную часть, а слоистое располагается как в поровом пространстве, так и в скелетной части.

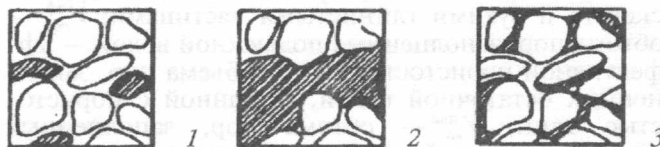


Рис. 1. Типы распределения глинистого материала в структуре горной породы: 1–3 – глинистость: 1 – структурная – глина входит в состав скелета породы, подвержена полному влиянию горного давления, поэтому максимально уплотняется с глубиной залегания пород; 2 – слоистая – глинистое вещество заполняет пространство как пор, так и скелетной части породы, поэтому подвержено влиянию горного давления частично; 3 – рассеянная – глинистый материал находится в порах породы и не подвержен влиянию горного давления

Вследствие этого справедливо считать, что на структурное глинистое вещество в полной мере действует горное давление; слоистое менее подвержено такому влиянию, а рассеянное ему не подвержено. Это выражается в различной степени уплотнения структурного, слоистого и рассеянного глинистого вещества с глубиной залегания пласта, что может быть отражено в изменении пористости глинистой составляющей терригенной породы.

Апробация предлагаемой методики анализа структуры распределения глинистого материала в породе выполнена на нескольких объектах по нефтяным месторождениям Западной Сибири. Для исследования выбирались объекты, основная масса коллекторов которых имеет тонкослоистую структуру, что вызывает определенные трудности при

интерпретации данных ГИС. Отчетливо выраженная слоистость пород отмечена в интервалах малой мощности (0,5—1,5 мм), прослои имеют нечеткие границы и незначительную протяженность. В такой ситуации практически невозможно применить подход В.Н. Дахнова [4] и определить коэффициент слоистой глинистости ($\chi_{\text{гл}}$) как отношение суммарной мощности глинистых прослоев к общей мощности пласта ($\chi_{\text{гл}} = \frac{h_{\text{гл}}}{H_{\text{п}}}$). В то же время пред-

ставленную породу нельзя считать однородной с рассеянным типом глинистости, поскольку анизотропия выражена достаточно ярко. Таким образом, анализируемые отложения имеют особую «микрослоистую» структуру, для анализа и количественной характеристики которой предлагается использовать понятие «пористость глинистой компоненты породы».

Для ее определения в терригенных породах и использования этого параметра в качестве меры уплотнения глин и их принадлежности к определенному структурному типу целесообразно воспользоваться результатами стандартных лабораторных исследований керна — определениями пористости, остаточной водонасыщенности и данными гранулометрических исследований. Решение поставленной задачи выполняется на основе пятикомпонентной модели терригенной породы:

$$V_{\text{п}} = V_{\text{ск}} + V_{\text{гл}} + V_{\text{пор}}^{\text{эф}} + V_{\text{пор}}^{\text{гл}} + V_{\text{во}}^{\text{мин}}, \quad (1)$$

где общий объем породы ($V_{\text{п}}$) состоит из $V_{\text{ск}}$; $V_{\text{гл}}$ — объема твердой части, представленного зернами скелета и сухими глинистыми частицами; $V_{\text{пор}}^{\text{эф}}$ — объема пор, заполненных подвижной водой — эффективной пористости; $V_{\text{пор}}^{\text{гл}}$ — объема пор, заполненных остаточной водой, связанной с пористостью глин; $V_{\text{во}}^{\text{мин}}$ — объема пор, заполненных остаточной водой, связанной исключительно с зернами скелета и соответствующих минимально возможному значению остаточной водонасыщенности чистого неглинистого коллектора.

Объемные коэффициенты такой модели выглядят следующим образом:

$$K_{\text{п}} = \frac{V_{\text{пор}}^{\text{эф}} + V_{\text{пор}}^{\text{гл}} + V_{\text{во}}^{\text{мин}}}{V_{\text{п}}} \text{ — коэффициент общей пористости;}$$

пористости;

$$K_{\text{гл}} = \frac{V_{\text{гл}}}{V_{\text{п}}} \text{ — коэффициент объемной глинистости;}$$

сти;

$$K_{\text{п}}^{\text{эф}} = \frac{V_{\text{пор}}^{\text{эф}}}{V_{\text{п}}} \text{ — коэффициент эффективной пористости;}$$

стости;

$$K_{\text{во}} = \frac{V_{\text{пор}}^{\text{гл}} + V_{\text{во}}^{\text{мин}}}{V_{\text{пор}}^{\text{эф}} + V_{\text{пор}}^{\text{гл}} + V_{\text{во}}^{\text{мин}}} \text{ — коэффициент остаточной водонасыщенности;}$$

ной водонасыщенности;

$$K_{\text{во}}^{\text{мин}} = \frac{V_{\text{во}}^{\text{мин}}}{V_{\text{пор}}^{\text{эф}} + V_{\text{пор}}^{\text{гл}} + V_{\text{во}}^{\text{мин}}} \text{ — коэффициент остаточной водонасыщенности чистого неглинистого коллектора;}$$

ной водонасыщенности чистого неглинистого коллектора;

$$K_{\text{гл}}^{\text{в}} = \frac{V_{\text{гл}} + V_{\text{пор}}^{\text{гл}}}{V_{\text{п}}} \text{ — объемный коэффициент}$$

влажной глинистости, т. е. глины, насыщенной частью остаточной воды;

$$K_{\text{п}}^{\text{гл}} = \frac{V_{\text{пор}}^{\text{гл}}}{V_{\text{гл}} + V_{\text{пор}}^{\text{гл}}} \text{ — коэффициент пористости глин,}$$

содержащейся в коллекторе.

С учетом коэффициента весовой глинистости ($C_{\text{гл}}$), определяемого по данным гранулометрического анализа, и при условии равенства минеральных плотностей глинистой и скелетной частей, основные зависимости между объемными параметрами выглядят следующим образом:

$$K_{\text{гл}} = C_{\text{гл}} \times (1 - K_{\text{п}}), \quad (2)$$

$$K_{\text{гл}}^{\text{в}} = \frac{K_{\text{гл}}}{1 - K_{\text{п}}}, \quad (3)$$

$$K_{\text{во}} = K_{\text{во}}^{\text{мин}} + \frac{K_{\text{п}}^{\text{гл}}}{1 - K_{\text{п}}} \times \frac{K_{\text{гл}}}{K_{\text{п}}}, \quad (4)$$

$$K_{\text{п}}^{\text{эф}} = K_{\text{п}} \times (1 - K_{\text{во}}^{\text{мин}}) - K_{\text{гл}}^{\text{в}} \times K_{\text{п}}^{\text{гл}}, \quad (5)$$

$$K_{\text{п}}^{\text{гл}} = \frac{K_{\text{п}} \times (K_{\text{во}} - K_{\text{во}}^{\text{мин}})}{K_{\text{п}} \times (K_{\text{во}} - K_{\text{во}}^{\text{мин}}) + K_{\text{гл}}}. \quad (6)$$

При расчете коэффициента пористости глин с использованием (6) необходимо оценить значение минимальной водонасыщенности ($K_{\text{во}}^{\text{мин}}$). Для этой цели можно использовать (4) и построить соответствующую палетку (рис. 2). Для оптимизации процесса определения значения $K_{\text{во}}^{\text{мин}}$ график построен в специфических координатах ($K_{\text{во}}; \frac{K_{\text{гл}}}{K_{\text{п}}}$), чтобы за-

висимость между остаточной водонасыщенностью и пористостью глин имела простой линейный вид. Это позволяет оценить значение $K_{\text{во}}^{\text{мин}}$, как величину свободного члена линейного уравнения на пересечении прямых линий, охватывающих фактические точки, с вертикальной осью $K_{\text{во}}$.

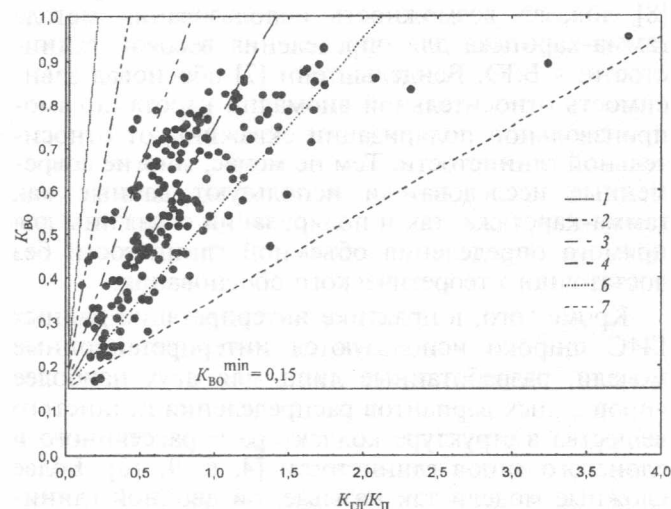


Рис. 2. Определение минимального значения остаточной водонасыщенности; прямые линии соответствуют равным значениям параметра $\frac{K_{\text{п}}^{\text{гл}}}{1 - K_{\text{п}}}$: 1—4; 2—2; 3—1; 4—0,6; 5—0,4; 6—0,2; 7—0

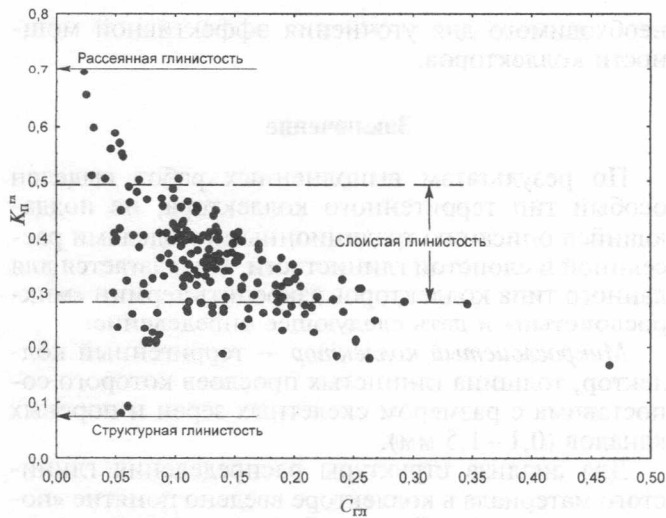


Рис. 3. Сопоставление пористости глинистой составляющей ($K_{П}^{гг}$) и массового содержания глинистой фракции (весовой глинистости $C_{гг}$)

Расчеты, проведенные на основе (6) с учетом постоянного значения минимальной остаточной водонасыщенности (15%), показали достоверность полученных значений коэффициента пористости глин и их соответствие общегеологическим представлениям о пористости глинистых пород [3].

Диапазон изменения рассчитанных значений пористости глинистой компоненты пород от 8 до 70%. Максимальные значения соответствуют пористости глинистых пород в поверхностных условиях (60–80%) [3], минимальные приближаются к пористости глин для данной глубины залегания при нормальном уплотнении (9%) [12].

На рис. 3. сопоставлена пористость глинистой составляющей с весовым содержанием глинистого материала в породе: в целом величина пористости глин уменьшается с общим ростом весовой глинистости. Это объясняется тем, что чем меньше общее количество глинистого материала, тем в более свободном состоянии он находится, а чем больше глинистой фракции, тем сильнее она подвержена действию горного давления и уплотнению.

В соответствии с графиком на рис. 3. слоистая глинистость занимает промежуточное положение между рассеянной и структурной глинистостью, однако точные границы, соответствующие слоистому типу, определить не представляется возможным. Тем не менее слоистую глинистость можно представить как смесь рассеянной и структурной составляющих в разных соотношениях. Смесь этих двух компонент необходимо рассматривать с учетом их фактического объема, занимаемого в структуре породы, т. е. учитывать пористость каждой из компонент. Пористость глинистого материала, находящегося в рассеянном и структурном видах оценивается как максимальное и минимальное значения общей пористости глинистой составляющей. По результатам выполненных расчетов пористость рассеянного типа глинистости ($K_{П}^{Ргг}$) 70%, а пористость глины структурного типа ($K_{П}^{Сгг}$) 8%. Для количественных определений содержания рассеянной и структурной глинистости можно ис-

пользовать систему уравнений баланса пористости и баланса объемных частей рассеянной ($K_{гг}^P$) и структурной ($K_{гг}^C$) глинистости:

$$\begin{cases} K_{гг}^P \times K_{П}^{Ргг} + K_{гг}^C \times K_{П}^{Сгг} = K_{гг}^W \times K_{П}^{гг}, \\ K_{гг}^P + K_{гг}^C = K_{гг}^W. \end{cases} \quad (7)$$

Коэффициент структурной глинистости отсюда выражается следующим соотношением:

$$K_{гг}^C = K_{гг}^W \times \frac{K_{П}^{Ргг} - K_{П}^{гг}}{K_{П}^{Ргг} - K_{П}^{Сгг}}, \quad (8)$$

Как показано на рис. 4., объем слоистой и рассеянной глинистости в целом растет с увеличением массового содержания глины. Однако соотношения разных типов глинистости в общем объеме глины различны. Так, в диапазоне от 2 до 12% объемы рассеянной и структурной глинистости примерно равны, а при более высокой весовой глинистости (> 15%) структурная глинистость значительно преобладает над рассеянной. Рост рассеянной глинистости практически останавливается на значениях 8–12%, в то время как структурная глинистость достигает 25 и даже 40%.

Необходимо отметить, что пористость слоистой глины определяется соотношением уплотненных глинистых частиц в середине глинистого прослоя и более рыхлых частиц на контакте со скелетными зернами, частично проникающими в поровое пространство. Имеет место зависимость пористости слоистой глинистости от толщины глинистых прослоев: чем значительнее толщина глинистых прослоев, тем их пористость в большей степени соответствует пористости структурной глинистости.

Для упрощенной модели слоистого глинистого коллектора, предложенной В.Н. Дахновым [4], который ввел понятие «коэффициент слоистой глинистости» $\chi_{гг}$, пористость глинистых прослоев полностью соответствует пористости глин структурного типа, поскольку такая модель не предпо-

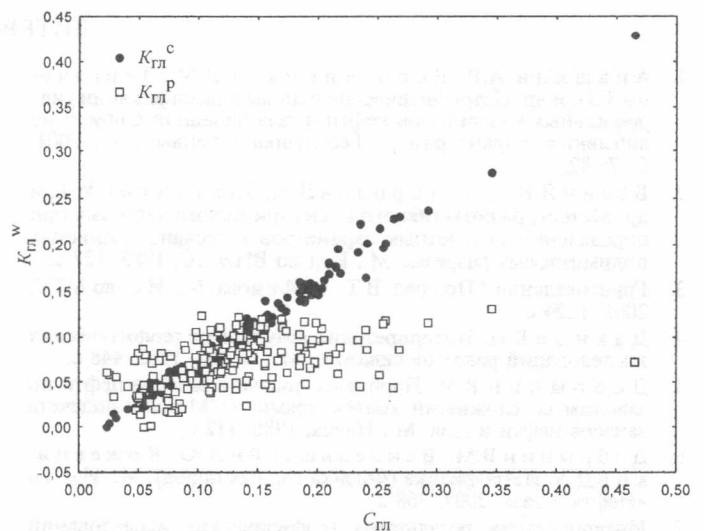


Рис. 4. Сопоставление коэффициента весовой глинистости ($C_{гг}$) с объемным содержанием рассеянной ($K_{П}^P$) и структурной ($K_{П}^C$) глинистости

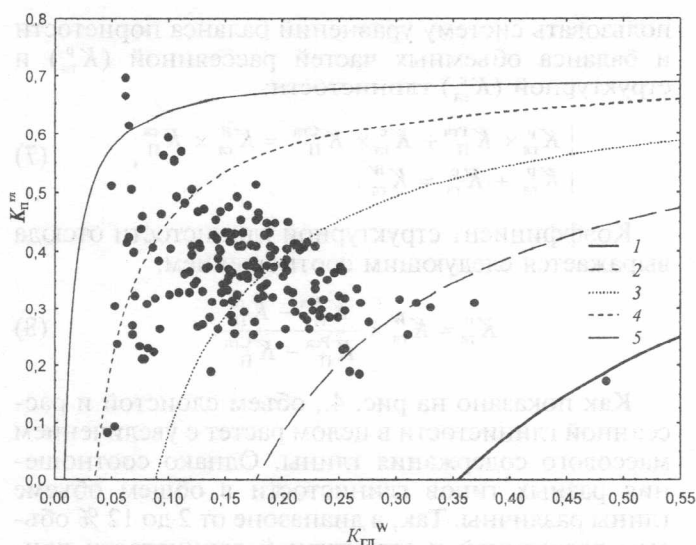


Рис. 5. Взаимосвязь между пористостью глинистого материала и объемным коэффициентом влажной глинистости; линии соответствуют равным значениям коэффициента слоистости ($\chi_{г^л}$): 1 — 0,4; 2 — 0,2; 3 — 0,1; 4 — 0,04; 5 — 0,01

лагает проникновение глинистых частиц в поровое пространство. В такой ситуации величина коэффициента слоистой глинистости $\chi_{г^л}$ отражает значение объемного коэффициента структурной глинистости $K_{г^c}$, рассчитанного по (8).

По нашему мнению, для более сложных микрослоистых коллекторов, имеющих в своем составе рассеянную, структурную и слоистую глинистость, уточнение эффективной мощности в соответствии с методическими рекомендациями [9, 10] необходимо проводить на основе коэффициента структурной глинистости, поскольку именно этот компонент глинистости находится в скелетной части коллектора, уплотнен также, как и мощные вмещающие глины, и обладает похожими свойствами. На рис. 5. приведен графический вид зависимости для определения коэффициента слоистости ($\chi_{г^л} = K_{г^c}$),

необходимого для уточнения эффективной мощности коллекторов.

Заключение

По результатам выполненных работ выделен особый тип терригенного коллектора, не поддающийся описанию традиционными моделями рассеянной и слоистой глинистости. Предлагается для данного типа коллекторов закрепить термин «микрослоистый» и дать следующее определение:

Микрослоистый коллектор — терригенный коллектор, толщина глинистых прослоев которого сопоставима с размером скелетных зерен и поровых каналов (0,1—1,5 мм).

Для анализа структуры распределения глинистого материала в коллекторе введено понятие «пористость глинистой компоненты», имеющее определенный физический смысл. Количественная оценка величины данного параметра выполняется на основе стандартных лабораторных исследований керн — определений пористости, остаточной водонасыщенности и гранулометрических исследований.

Предлагаемая модель микрослоистого коллектора позволяет представить микрослоистую глинистость как совокупность общепринятых типов глинистости — структурной и рассеянной, обладающих минимальными и максимальными значениями пористости глинистой компоненты.

Модель слоистой глинистости В.Н. Дахнова, уточняющая эффективную мощность коллекторов через коэффициент слоистой глинистости, можно считать частным случаем модели микрослоистого коллектора, когда рассеянная глинистость отсутствует и слоистая глинистость соответствует структурной. Поэтому для уточнения эффективной толщины микрослоистого коллектора справедливым будет принять содержание именно структурной глинистости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анашкин А.Р., Дорогиницкая Л.М., Дергачева Т.Н. и др. Петрофизические основы классификации гидрофильных коллекторов нефти и газа Западной Сибири по добычным параметрам // Геофизика (спецвыпуск). 2001. С. 7–82.
2. Басин Я.Н., Новгородов В.А., Злотников М.Г. и др. Методы радиоактивного и электрического каротажа при определении подсчетных параметров в песчано-глинистых полимиктовых разрезах. М.: Изд-во ВИЭМС, 1983. 127 с.
3. Грунтоведение / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
4. Дахнов В.Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. М.: Недра, 1982. 448 с.
5. Добрынин В.М. Проблемы подсчета запасов нефти по залежам со сложными коллекторами. // Методы подсчета запасов нефти и газа. М.: Наука, 1986. 112 с.
6. Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. Петрофизика (Физика горных пород). М.: Изд-во «Нефть и газ», 2004. 368 с.
7. Интерпретация результатов геофизических исследований нефтяных и газовых скважин: Справочник / Под ред. В.М. Добрынина. М.: Недра, 1988. 476 с.
8. Ларионов В.В. Радиометрия скважин. М.: Недра, 1969. 328 с.
9. Методические рекомендации по определению подсчетных параметров залежей нефти и газа по материалам геофизических исследований скважин с применением результатов анализов керн, опробований и испытаний продуктивных пластов / Под ред. Б.Ю. Вендельштейна, В.Ф. Козяра, Г.Г. Яценко. Калинин: НПО «Союзпромгеофизика», 1990. 261 с.
10. Методические рекомендации по подсчету геологических запасов нефти и газа объемным методом / Под ред. В.И. Петерсилье, В.И. Пороскуна, Г.Г. Яценко. М.-Тверь: ВНИГНИ, НПЦ «Тверьгеофизика», 2003. 256 с.
11. Теория и интерпретация результатов геофизических методов исследования скважин / Р. Дебранд. Пер. с фран. М.: Недра, 1972. 288 с.
12. Ханин В.А. Терригенные породы-коллекторы нефти и газа на больших глубинах. М.: Недра, 1979. 140 с.
13. Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties / Djebbar Tiab and Erle C. Donaldson // 2nd ed., Elsevier, Inc. USA, 2004. 889 p.

Российский государственный геологоразведочный университет
Рецензент — Н.К. Фортунатова