УДК 550.8.056

ПРИВЛЕЧЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПЕТРОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

ШЛИФОВ ПРИ ОБОСНОВАНИИ МЕТОДИКИ ВЫДЕЛЕНИЯ

КОЛЛЕКТОРОВ В УСЛОВИЯХ ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД

С ВТОРИЧНЫМИ ПРОЦЕССАМИ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ

(НА ПРИМЕРЕ ОДНОГО ИЗ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ)

INVOLVING THE RESULTS OF PETROGRAPHIC ANALYSIS OF THIN

SECTIONS WHEN JUSTIFYING THE METHODOLOGY FOR ISOLATING

RESERVOIRS IN TERRIGENOUS ROCKS WITH SECONDARY

MINERAL FORMATION PROCESSES (A STUDY OF ONE

OF THE DEPOSITS IN EASTERN SIBERIA)

Ш. В. Мухидинов, Е. О. Беляков Sh. V. Mukhidinov, E. O. Belyakov

ООО «Газпромнефть НТЦ», г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: петрографический анализ шлифов; связанность порового пространства; вторичные процессы минералообразования; граничные значения выделения коллекторов; абсолютная газопроницаемость

Key words: petrographic analysis of thin sections; pore space connectivity; secondary mineral formation processes; boundary values of reservoir separation; absolute gas permeability

Предлагается альтернативный подход для обоснования граничных критериев выделения коллекторов, основанный на использовании разномасштабной информации. Его особенностью является комплексирование результатов петрографических анализов шлифов и петрофизических исследований керна, что позволило повысить достоверность определения эффективных толщин.

Рассматриваемый разрез представлен терригенными и карбонатными породами. Данная работа ограничивается терригенным интервалом, который относится к вендским отложениям и представлен базальными конгломератами, гравелитами, песчаниками разнозернистыми, алевритами и аргиллитами. Породы залегают на кристаллическом фундаменте, местами метаморфизованном [1, 2], общие толщины пластов варьируют от первых метров до десятков.

Выделение коллекторов — одна из основных задач в разведке и разработке нефтяных месторождений. В песчано-гравелитовом разрезе непской свиты решение этой задачи осложнено тем, что породы на стадии катагенеза подвергались вторичным процессам. Эти процессы, как показывают результаты исследований, приводят преимущественно к ухудшению фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) горных пород. Основными постседиментационными факторами являются засолонения порового пространства, ангидритизация, доломитизация и регенерация кварца. Среди перечисленных факторов засолонение порового пространства в значительной степени определяет величину эффективных толщин пластов, их коллекторские свойства и продуктивность скважин [3, 4].

Особенности стандартного подхода обоснования методики выделения коллекторов. Обычно в практике выделение коллекторов осуществляется на основе прямых качественных признаков наличия проницаемых интервалов. Глинистая корка, образовавшаяся за счет проникновения фильтрата бурового раствора в пласт, приводит к сужению диаметра скважины, расхождению показаний микрозондов, а само проникновение фильтрата служит причиной появления градиента сопротивления на показаниях многозондовых электрических методов каротажа. При этом зачастую из-за геолого-технологических условий бурения скважин и вскрытия проницаемого интервала прямые признаки коллекторов типовым комплексом методов геофизических исследований скважин (ГИС) не фиксируются.

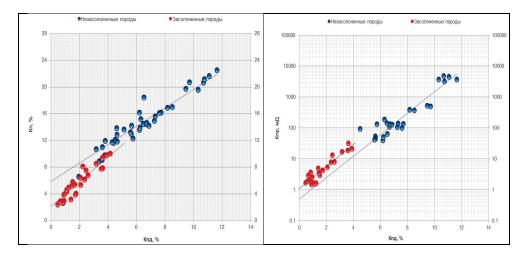
Как правило, в таких случаях используют количественные критерии для выделения коллекторов, в качестве которых могут быть граничные отсечки по открытой пористости (K_n), абсолютной газопроницаемости (K_{np}), двойному разностному параметру кривой гамма-каротажа (ΔJ_{γ}) и др. Граничные значения рассчитываются при нулевой динамической пористости (K_{no}), которая определяется выражением

$$K_{n\partial} = K_n (1 - K_{\theta O} - K_{HO}), \tag{1}$$

где K_n — коэффициент открытой пористости, определяемый путем насыщения образца керна водой, газом или керосином; K_{60} — коэффициент остаточной водонасыщенности, который оценивается по результатам изучения кривых капиллярных давлений (ККД); K_{n0} — коэффициент остаточной нефтенасыщенности, определяемый экспериментом по вытеснению флюидов.

Для оценки граничных отсечек параметров ФЕС были проведены соответствующие эксперименты на коллекции из 84 образцов керна. Для каждого образца была рассчитана величина динамической пористости K_{no} , и путем сопоставления результатов с пористостью и абсолютной газопроницаемостью были определены граничные величины K_n и K_{np} (рис. 1).

Кроссплоты, приведенные на рисунке 1, получены для засолоненных (Кгалит > 5 %) и незасолоненных (Кгалит < 5 %) пород. Объем галита в первой коллекции составляет в среднем 15 %. Следует отметить различие граничных величин K_n^{ep} и K_{np}^{ep} для засолоненных и незасолоненных пород. В зависимости от степени засолонения граничная пористость изменяется в диапазоне от 2,1 до 5,9 %, а абсолютная газопроницаемость варьирует в пределах 0,45–1 мД. Интересным фактом на этих графиках является то, что с засолонением значение граничной пористости снижается, а отсечка по проницаемости увеличивается.



 $Puc.\ 1.\$ Сопоставление открытой пористости (K_n) и абсолютной газопроницаемости (K_{np}) с динамической пористостью (K_{nd}) для терригенных пород непской свиты Чонской группы месторождений

Нами был проанализирован каротаж в пределах непской свиты вендских отложений, проведена интерпретация данных геофизических исследований скважин (ГИС). Отсутствие прямых признаков проникновения фильтрата бурового раствора в пласт обусловило необходимость использования граничных отсечек $K_n^{ep} = 5.9$ % и $K_{np}^{ep} = 0.5$ мД для выделения коллекторов. При этом выделенные по полученным отсечкам коллекторы, не подтвердились результатами испытаний пластов. Отсутствие притока из пористых ($K_n > K_n^{ep}$) и проницаемых ($K_{np} > K_{np}^{ep}$)

интервалов заставила нас с большей детальностью пересмотреть количественные критерии выделения коллекторов.

Использование результатов петрографического анализа шлифов в уточнении граничных критериев выделения коллекторов. Петрографический анализ шлифов позволил исследовать особенности влияния вторичных процессов минералообразования на структуру пустотного пространства (рис. 2).

Процессы засолонения (галитизация и ангидритизация), регенерация кварца и доломитизация привели к изменению ФЕС. При содержании галита до 6 % наблюдается значительное уменьшение пористости при незначительном ухудшении проницаемости. Когда доля галита превышает 6 % поровые каналы сужаются до полного исчезновения. То есть порода, имеющая $K_n > K_n^{\ ep}$ и 0 < Кгалит < 6 %, может считаться как засолоненный коллектор.

В связи с этим основная задача изучения фотографий шлифов состояла в оценке связанности пор между собой. Шлифы были изготовлены из торцов цилиндрического керна, что обеспечило комплексный анализ результатов петрографических и петрофизических исследований.

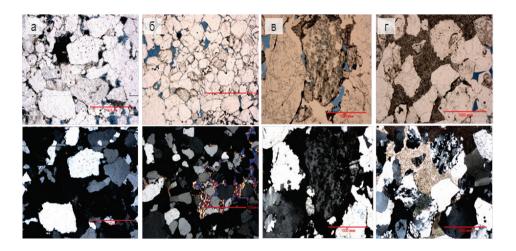
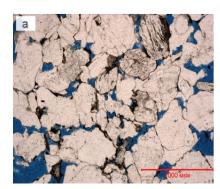


Рис. 2. **Фотографии шлифов, изготовленных из песчаников непской свиты:** а—с галитовым цементом; б—со следами ангидритизации; в—с регенерационным поровым кварцем и карбонатным цементом; г—с доломитовым цементом

Методика комплексирования петрографических и петрофизических исследований заключалась в следующем: разрез 13 скважин, из которых был отобран керн и изготовлены шлифы с шагом в среднем 2–3 шлифа/м продуктивного интервала, был детально расчленен не только по литологическим особенностям, но и по критерию связанности пор. Поскольку рассматриваемым вопросом в рамках данной работы является граница коллектор — неколлектор, критерий связанности пор определялся как «есть связанность» и «нет связанности» в двумерной плоскости шлифа путем визуальной оценки наличия или отсутствия связей между порами. В данном случае подразумевается, что в сопоставимом по размеру объеме связи между порами, прослеживаемые по шлифам, аналогичны во всех направлениях, поэтому вероятность фильтрации углеводородов существенно выше в тех породах, где прослеживается визуальная связанность, и, соответственно, ниже в породах с отсутствием таковой. Пример фотографий шлифов с наличием и отсутствием связей между порами приведен на рисунке 3.

В зависимости от принадлежности пород к интервалам со связанными/несвязанными порами сформированы две коллекции из 620 образцов керна, в

том числе 305 образцов из интервалов с несвязанными порами и 315 образцов из интервалов со связанными порами.



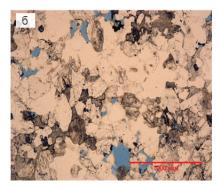


Рис. 3. Пример фотографий шлифов с наличием (а) и отсутствием (б) связанности пор

Сопоставление в поле проницаемость — пористость показывает, что облака точек для пород с наличием и отсутствием связанности пор имеют довольно четкую дифференциацию (рис. 4). Граница, разделяющая породы со связанными и несвязанными порами выражается в виде функции $K_{np}^{ep} = f(K_n)$ и имеет следующий вид:

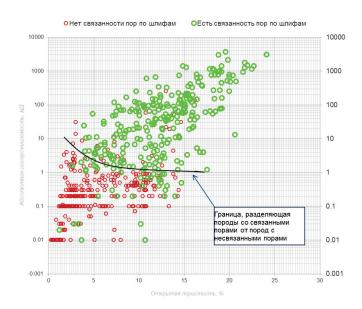


Рис. 4. Обоснование граничной отсечки абсолютной газопроницаемости по результатам петрографических и петрофизических исследований горных терригенных пород венда

Таким образом, коллекторами будут считаться те породы, газопроницаемость которых будет больше рассчитанной величины K_{np}^{ep} . При этом можно отметить, что величина граничной газопроницаемости увеличивается с уменьшением открытой пористости пород. Этот факт, установленный по данным экспериментальных

исследований реальных образов горных пород методами петрографии и петрофизики, подтверждает те критерии, которые были получены для засолоненных и незасолоненных пород (см. рис. 1).

На основе установленной «плавающей» отсечки по газопроницаемости были пересмотрены и уточнены границы коллекторов во всех скважинах лицензионных участков. В результате разработанный подход позволил снизить погрешность определения эффективных толщин в терригенных засолоненных коллекторах венда с 21,6 до 6,7 %.

Эффективность использования полученной методики определяется достоверностью определения абсолютной газопроницаемости по ГИС. Модель абсолютной газопроницаемости была построена на основе трехмерной связи керн — ГИС, где пористость и интервальное время пробега продольной волны (ΔT) являются основными определяющими параметрами. При этом K_n и K_{np} были определены на керне. Величина ΔT была оценена по данным ГИС в пределах выделенных однородных пропластков. Типизация пород по величине ΔT позволила на кроссплоте проницаемость — пористость получить трехмерную модель абсолютной газопроницаемости (рис. 5), которая описывается следующими уравнениями:

для пород с
$$\Delta T > 240$$
 мкс/м $K_{np} = \exp(10 \cdot K_n^{0.4} - 27.5);$ (3)

для пород с
$$\Delta T \le 240$$
 мкс/м $K_{np} = exp(9,9 \cdot K_n^{0.4} - 42,2 \cdot Ln(\Delta T) + 205,1)$. (4)

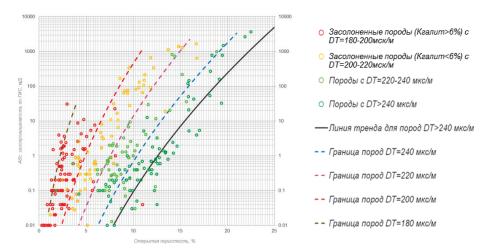


Рис. 5. Трехмерная зависимость абсолютной газопроницаемости (K_{np}) от открытой пористости (K_n) и интервального времени пробега продольной волны (ΔT) для терригенных пород венда

Достоверность оценки газопроницаемости определялась путем сопоставления расчетных величин K_{np} по ГИС с данными по керну. Для сопоставления расчетной и экспериментальной величин газопроницаемости были использованы данные по 124 прослоям, выделенным в разрезе 14 разведочных скважин исследуемой площади. Сопоставление представлено на рисунке 6. Из сопоставления видно, что погрешность определения газопроницаемости составляет $\pm 0,5$ порядка, что можно считать в пределах допустимой ошибки.

Таким образом, новый подход, основанный на использовании «плавающей» граничной отсечки по газопроницаемости, позволяет с учетом связанности пор выделять коллекторы. Такой пример по одной из скважин изучаемых участков представлен на рисунке 7.

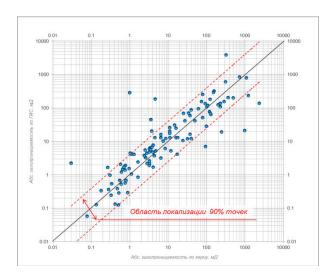


Рис. 6. Сопоставление расчетных значений абсолютной газопроницаемости (K_{np}) с экспериментально замеренными величинами газопроницаемости на керне для коллекторов исследуемых лицензионных участков

Стандартная методика выделения коллекторов, предусматривающая использование граничной отсечки по K_n обеспечила 19,8 м эффективной толщины проницаемого интервала, в котором в зависимости от ФЕС можно выделить три литотипа (таблица).

По результатам испытаний были получены притоки в первом и втором литотипах. Третий литотип, имея величину K_{np} в диапазоне 1-10 мД, оказался «сухим».

Фильтрационно-емкостные	свойства	выделенных литотипов

Номер п/п	Тип коллекторов	Диапазон изменения открытой пористости, %	Диапазон изменения абсолютной газопроницаемости, мД
1	Первый	15–17	10–100
2	Второй	15–17	1–10
3	Третий	6–8	1–10

В отличие от результатов использования стандартной методики, по новому подходу выделены коллекторы с суммарной толщиной 9,7 м, что в два раза меньше. Использование «плавающей» отсечки позволило исключить из коллекторов прослои, относящиеся к третьему литотипу, несмотря на то что пористость этих пород превышает установленное граничное значение.

Таким образом, на основе экспериментальных исследований керна горных пород и практических результатов изучения разреза скважин можно сделать вывод о том, что наличие проницаемости по газу ($K_{np} > 1$ мД) не является гарантом получения притока из пласта. Ключевым фактором, обеспечивающим движение флюидов в поровом пространстве, является связанность пор, которая определяет возможность миграции углеводородов благодаря наличию связей между порами с характерным соотношением размеров пор и длин связей между ними. Количественное описание данного параметра может быть выполнено в рамках концепции связанности порового пространства (КСПП), некоторые элементы которой изложены в работах [2, 5].

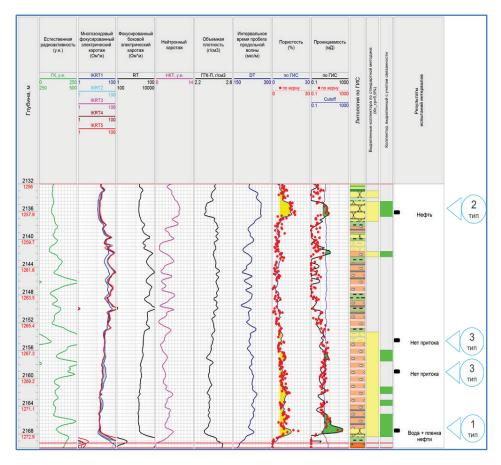


Рис. 7. **Сопоставление результатов выделения коллекторов** по стандартной и новой методикам

Библиографический список

- 1. Воробьев В. С. Перспективы нефтегазоносности фундамента Сибирской платформы (на примере Верхнечонского месторождения) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2013. № 10. С. 27–32.
- 2. Беляков Е. О., Мухидинов III. В. Использование обобщенных зависимостей для построения петрофизических моделей фильтрационно-емкостных свойств с оценкой граничных параметров выделения коллекторов и определения их характера насыщенности // Петрофизика сложных коллекторов: проблемы и перспективы. Сб. статей / Сост. Б. Н. Еникеев. М.: ООО «ЕАГЕ Геомодель», 2015. 383 с.
- 3. Городнов А. В., Черноглазов В. Н., Давыдова О. П. Определение фильтрационно-емкостных свойств засолоненных коллекторов в терригенных отложениях непского свода Восточной Сибири // Каротажник. 2012. № 12 (222). С. 26–41.
- Шубин А. В., Рыжков В. И. Изучение эффекта засолонения порового пространства терригенного коллектора по сейсмическим данным // Геофизика. – 2013. – № 5. – С. 17–25.
- 5. Вероятностная модель распределения флюидонасыщенности порового пространства пород как основа уточнения петрофизических моделей фильтрационно-емкостных свойств / Е. О. Беляков [и др.] // Нефтяное хозяйство. 2013. № 12. C. 48-50.
- 6. Вещественный состав пород фундамента Верхнечонского месторождения и их отражения в структуре поверхности «фундамент осадочный чехол» по данным сейсморазведки (Восточная Сибирь) / Т. М. Карих [и др.] // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2013. № 12. С. 13–21.
- 7. Методические рекомендации по подсчету геологических запасов нефти и газа объемным методом / Под ред. В. И. Петерсилье, В. И. Пороскуна, Г. Г. Яценко. Москва Тверь: ВНИГНИ, НПЦ «Тверьгеофизика», 2003.

Сведения об авторах

Мухидинов Шухрат Валиджонович, к. т. н., начальник отдела петрофизического моделирования, Управление петрофизического моделирования и интерпретации ГИС, Департамент геологической поддержки проектов, ООО «Газпромнефть НТЦ», г. Санкт-Петербург, e-mail: Mukhidinov.ShV@gazpromneft-ntc.ru

Information about the authors

Mukhidinov Sh. V., Candidate of Engineering, Head of the Department of Petrophysical Modeling, Petrophysical Modeling and Interpretation of GIS, Department of Geological Project Support, LLC «Gazpromneft NTC», Saint Petersburg, e-mail: Mukhidinov.ShV@gazpromneft-ntc.ru Беляков Евгений Олегович, к. г.-м. н., начальник управления петрофизического моделирования и интерпретации ГИС, Департамент геологической поддержки проектов, ООО «Газпромнефть НТЦ», г. Санкт-Петербург, e-mail: belyakov.eo@gazpromneft-ntc.ru

Belyakov E. O., Candidate of Geology and Mineralogy, Head of Petrophysical Modeling and Interpretation of GIS, Department of Geological Project Support, LLC «Gazpromneft NTC», Saint Petersburg, e-mail: belyakov.eo@gazpromneft-ntc.ru

УДК 556.3(571.1)

О ВЕРТИКАЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ ЯМАЛО-КАРСКОЙ ДЕПРЕССИИ (СЕВЕРНЫЕ РАЙОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ)

VERTICAL HYDRODYNAMIC ZONING OF THE YAMAL-KARA DEPRESSION (NORTHERN AREAS OF WESTERN SIBERIA)

Д. А. Новиков

D. A. Novikov

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, г. Новосибирск

Ключевые слова: пластовое давление; коэффициент аномальности; межпластовые перетоки; элизионный водообмен; Западно-Сибирский мегабассейн Key words: reservoir pressure; anomaly ratio; crossflows; expelled water exchange; the West Siberian megabasin

Гидродинамическим исследованиям Западной Сибири посвящены труды Б. Л. Александрова, Г. Д. Гинсбурга, А. Е. Гуревича, В. И. Дюнина, А. П. Каменева, В. Н. Корценштейна, Н. М. Кругликова, Б. Ф. Маврицкого, В. М. Матусевича, В. В. Нелюбина, О. В. Равдоникас, А. Д. Резника, О. Н. Яковлева и многих других исследователей [1–8].

При этом многими учеными отмечается тот факт, что даже основные гидродинамические закономерности Западно-Сибирского мегабассейна (ЗСМБ) до настоящего времени изучены лишь в общих чертах. В первую очередь это относится к рассматриваемым в рамках настоящей работы северным районам в гра-Ямало-Карской ницах депрессии (рис. 1).

В основу нашего исследования положены результаты испытания более 4 000 объектов 251 поисковой площади, а также материалы интерпретации ГИС и лабораторных исследований

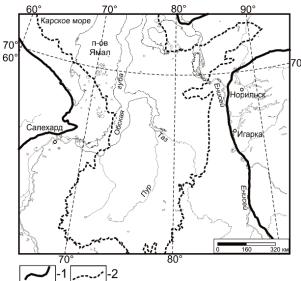


Рис. 1. **Местоположение района исследований** (границы: 1 — Западно-Сибирского мегабассейна; 2 — Ямало-Карской депрессии)