

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УДЕЛЬНОГО
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
СЛАБОСЦЕМЕНТИРОВАННЫХ ПОРОД ГАЗОВЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
СЕНОМАНСКОГО ВОЗРАСТА**

Н. Ю. Москаленко¹, В. Г. Мамяшев²

¹*Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть», г. Тюмень, Россия*

²*Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия*

Аннотация. Для слабосцементированных пород сеноманских отложений изучена степень различия между электрическими свойствами, полученными в атмосферных и термобарических условиях. По результатам экспериментов, проведенных на слабосцементированном керне для зависимости параметра насыщения от коэффициента водонасыщенности, произошло уменьшение значений коэффициента насыщения (n), что не соответствует теоретическим представлениям. Такая ситуация объясняется степенью уплотнения слабосцементированных образцов.

Показано, что при отсутствии необходимых экспериментов в пластовых условиях в качестве рекомендуемого уравнения для определения подсчетных параметров слабосцементированных пород сеноманских отложений возможно использование огибающей линии к общему полю точек, полученной по зависимости относительного сопротивления (P_o) от влажности (W_B) в атмосферных условиях.

Ключевые слова: слабосцементированные породы; удельное электрическое сопротивление, атмосферные условия; термобарические условия; пористость; водонасыщенность

**DETERMINATION OF PARAMETER SATURATION IN THERMOBARIC
CONDITIONS ON UNCONSOLIDATED CORE OF CENOMANIAN DEPOSITION**

N. Yu. Moskalenko¹, V. G. Mamyashev²

¹*Branch of LLC «LUKOIL-Engineering» «KogalymNIPIneft» in Tyumen, Russia*

²*Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia*

Abstract. The article is devoted to the study of difference between the electric properties received in atmospheric and thermobaric conditions for unconsolidated rocks. By the results of the experiments made on a unconsolidated core for dependence of parameter of saturation on coefficient of water saturation there was a reduction of values of coefficient of saturation (n) that doesn't meet theoretical expectations. Such situation is explained by extent of consolidation of slightly cemented samples.

It is shown that in the absence of necessary experiments in sheeted conditions, as the recommended equation for determination of subcalculating parameters of unconsolidated core of cenomanian deposits use of the bending-around line to the general field of points received on dependence of the $P_o = f(W_B)$ in atmospheric conditions is possible

Key words: unconsolidated rocks; true resistivity; atmospheric conditions; thermobaric conditions; porosity; water saturation

Керн является источником прямой информации о свойствах горных пород, слагающих геологические разрезы. Качественно отобранный керн во многом является залогом информативности результатов его петрофизических исследований, информативности и достоверности прямой геологической характеристики объектов

исследований, а также достоверности петрофизического обеспечения геологической интерпретации данных геофизических исследований скважин (ГИС).

Особенности пород-коллекторов сеноманского возраста газовых месторождений Западной Сибири обусловлены, прежде всего, их слабой цементацией и низкой механической прочностью. Другой особенностью является неоднородно-слоистая текстура пород (рис. 1).

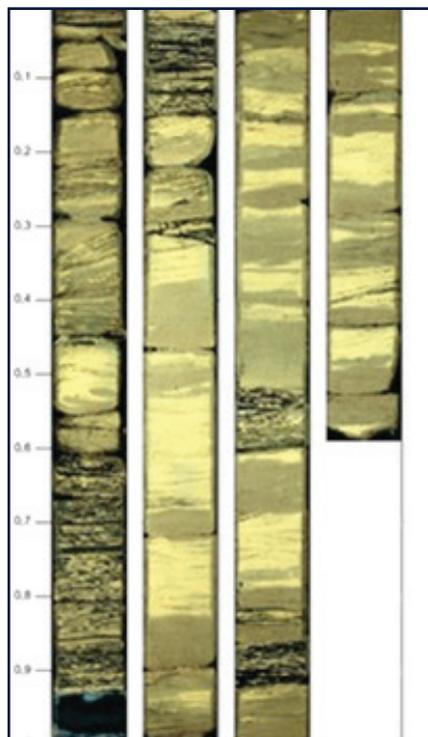


Рис. 1. Пример колонки керна слабощементированных пород

До конца 80-х годов прошлого столетия средний вынос керна из этих объектов составлял около 30–35 %. Соответственно, первые оценки подсчетных параметров (особенно коэффициентов пористости и газонасыщенности) оказались существенно заниженными. Достоверность широко применяемых зависимостей параметров удельного электрического сопротивления (УЭС) от пористости и водонасыщенности также оставалась невысокой. С применением новых, изолирующих технологий отбора керна средний вынос его уже к середине 90-х годов достиг 90–95 % [1]. Было установлено, что, несмотря на слабую цементацию пород-коллекторов газоносных отложений, применение изолирующих технологий позволило извлечь на поверхность монолитные, неразрушенные колонки слабощементированного керна. Благодаря этому появилась возможность получить более достоверные оценки указанных подсчетных параметров и пересчитать запасы газа в сторону их увеличения. Исследования слабощементированного керна потребовали разработки и применения новых технологий препарирования керна

и изготовления образцов для лабораторных исследований, а также новых методик его исследований.

Целью данной работы является обоснование адекватности результатов лабораторного моделирования удельного электрического сопротивления (УЭС) и соответствующих параметров УЭС слабощементированных пород пластовой характеристике этих пород.

Методика работ предусматривала проведение экспериментальных исследований УЭС образцов при их полной и частичной водонасыщенности в атмосферных условиях и в условиях, соответствующих пластовому залеганию пород. Наличие керна с сохраненной водонасыщенностью позволило рассматривать результаты измерений УЭС образцов такого керна и их объемной водонасыщенности в качестве критерия достоверности выполненного моделирования УЭС.

Исследуемый керн представлен песчаниками мелкозернистыми алевритовыми и алевролитами мелко- и крупнозернистыми, песчаными, осложненными прослоями глин и глинистых разностей песчаников и алевролитов. Соответственно, для рассматриваемых пород характерны существенные вариации гранулометрического состава.

Среди других особенностей петрофизической характеристики этих пород необходимо отметить влияние набухания глинистого цемента пород при насыщении их

водой, наиболее заметно проявляемое в глинистых разностях пород. В результате этого пористость пород при насыщении их моделью пластовой воды превышает пористость, определенную при насыщении керосином. Соответствующие «приращения» пористости при переходе от чистых (неглинистых) песчаников к глинистым породам возрастали от 0 до 3÷4 %.

В совокупности со слабой цементацией пород это создавало трудности при проведении лабораторного моделирования зависимостей параметров УЭС от емкостных свойств пород. Одной из первоочередных проблем было изготовление образцов пород правильной геометрической формы (цилиндрической) с сохранением их текстуры и строения (структуры) порового пространства, особенно при последующем насыщении образцов моделью пластовой воды.

Известен набор различных способов сохранения текстуры и свойств зерна слабощементированных пород, основанных на применении низкотемпературных технологий (замораживание зерна). Они же обеспечивают возможность изготовления образцов для лабораторных исследований. Отметим, что при этом, по мнению ряда специалистов, возможно негативное влияние низкотемпературной заморозки зерна на твердую фазу пород (разрушение, растрескивание зерен неустойчивых минералов).

В данной работе были использованы образцы, изготовленные как с помощью низкотемпературных технологий, так и способом вдавливания. При заморозке зерноприемная труба вместе с заглушками и зерном помещалась в жидкий азот, имеющий температуру минус 196 °С. Затем из замороженного зерна при промывке жидким азотом высверливались образцы-цилиндрики размером 30 x 30 мм. Высверленные образцы сразу же помещали во фторопластовую оболочку, а на торцы их устанавливали диски (фильтры) из латунной сетки. После термоусадки фторопластовой оболочки она плотно облегла боковую поверхность образцов и диски из латунной сетки (последние играли роль электродов при измерении УЭС).

Метод вдавливания применялся на незамороженном зерне. После очистки его от глинистой корки в зерно под давлением внедряют плунжер с внутренним диаметром 30 мм. «Выдавленный» таким образом образец сразу поступает в термоусадочный рукав. При помощи термоусадочной пленки обеспечиваются плотный прижим ее к боковой поверхности образца и фиксация торцевых фильтров из сетки. Эти материалы инертны по отношению к органическим растворителям, используемым при экстракции.

Образцы с дефектами прилегания термоусадочной «рубашки» и с нарушениями контакта с дисками из латунной сетки, а также наличием механических дефектов (трещин) исключались из рабочей коллекции. В качестве априорных данных были приняты результаты исследований изолированного зерна (с начальной насыщенностью и смачиваемостью).

Как уже отмечалось, целью работы является анализ влияния условий моделирования УЭС на традиционные петрофизические зависимости параметров пористости (P_n) и насыщенности (P_n) от пористости (K_n) и водонасыщенности (K_v).

Для измерения УЭС образцов слабощементированных пород применяется специальная аппаратура, основу которой составляет индивидуальный зернодержатель. Изначально были выполнены замеры УЭС на образцах, полностью насыщенных, в соответствии с ГОСТ 25494-82, моделью пластовой воды ($\rho_v = 0,388$ Ом·м). Измерения УЭС были выполнены на двухэлектродной установке, образцы помещали в зернодержатель. Для улучшения контакта электрода с поверхностью образца на них устанавливали прокладки из двух слоев фильтровальной бумаги, пропитанной тем же раствором, что и исследуемые образцы.

Определение удельного электрического сопротивления при эффективном давлении было выполнено на установке, обеспечивающей моделирование пластовых условий (при пластовой температуре 20 °С и эффективном давлении 12 МПа). Об-

разцы, экстрагированные и насыщенные моделью пластовой воды, помещали в кернодержатель установки. С помощью источника высокого давления в нем создавалось давление всестороннего обжима. Моделировалось начальное эффективное давление в образце породы в течение некоторого времени до стабилизации порового давления. В конце первой ступени после стабилизации измерялось УЭС и определялось изменение порового объема образца. Затем моделировали следующую ступень эффективного давления. После стабилизации порового давления проводили измерения, и так далее на всех ступенях, включая последнюю ступень, соответствующую глубине залегания пород.

С целью построения зависимости параметра насыщения (P_n) от водонасыщенности (K_v) для создания в образцах текущей водонасыщенности при применении метода центрифугирования, как наиболее экспрессного, образцы очень часто разрушались. Поэтому моделирование частичной водонасыщенности образцов было выполнено с помощью группового капилляриметра.

Для построения зависимости $P_n = f(K_v)$ в пластовых условиях были выполнены лабораторные исследования по определению остаточной водонасыщенности методом капилляриметрии с замером УЭС на каждой из девяти ступеней давления вытеснения (до давлений $P_k = 1,2$ МПа), соответствующей остаточной водонасыщенности пород. Затем образцы помещались в кернодержатель и проводились замеры в пластовых условиях.

Значение показателя степени (m) зависимости $P_n = f(K_n)$, полученной при атмосферных условиях, составило от 1,431, а при моделировании термобарических условий (ТБУ) оно возросло до 1,552. Такие изменения соответствуют традиционным представлениям при переходе от атмосферных условий к пластовым для слабосцементированного керна (рис. 2).

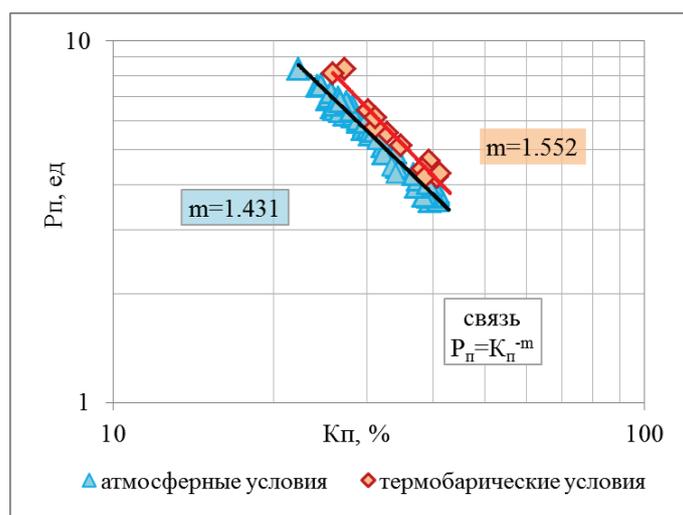


Рис. 2. Зависимость $P_n = f(K_n)$ для сеноманских отложений

Для зависимости $P_n = f(K_v)$ при переходе от атмосферных условий к пластовым произошло уменьшение значения показателя степени этой зависимости (n) с 1,757 до 1,502. Такой характер влияния ТБУ на величину показателя степени (n) для слабосцементированных пород отличается от наблюдаемых зависимостей для консолидированного керна [2] (рис. 3). Такая ситуация может быть объяснена изменением степени уплотнения слабосцементированных пород.

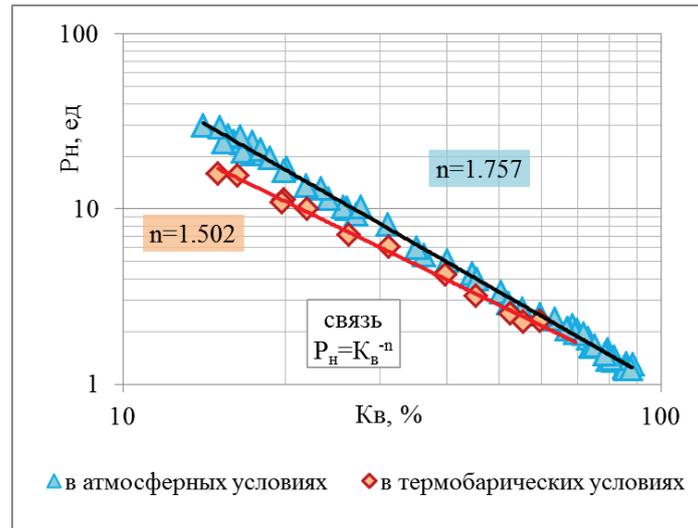


Рис. 3. Зависимость $P_n = f(K_v)$ для сеноманских отложений

Основным способом оценки достоверности насыщения является сопоставление со значениями остаточной водонасыщенности, полученной прямым методом по керну скважин, отобранному на безводной промывочной жидкости или по изолирующей технологии.

В качестве дополнительных данных для анализа УЭС в пластовых условиях могут быть использованы результаты потоковых экспериментов.

Измерения сопротивления центрального образца колонки в результате проведения исследований относительных фазовых проницаемостей при вытеснении нефти водой в пластовых условиях позволяют рассчитать его удельное электрическое сопротивление и, соответственно, найти относительное сопротивление (P_0). При условии всестороннего равномерного напряженного состояния изменение пористости породы можно рассчитать как

$$\Delta K_n = 0,1414 \cdot e^{(0,0842 \cdot K_n)}, \% \quad (1)$$

Для сопоставления результатов выполненного моделирования УЭС пород с данными, полученными на керне с сохраненной объемной водонасыщенностью (W_b), воспользуемся сопоставлениями вида $P_0 = f(W_b)$.

Такой подход позволяет привлечь данные соседних месторождений и площадей (включая скважины, пробуренные на нефилтующем растворе) и учесть различия минерализации пластовой воды этих месторождений.

Сопоставление результатов исследования образцов в атмосферных условиях с линиями, аппроксимирующими соответствующие зависимости $P_0 = f(W_b)$ для месторождений Ямала (Уренгойское, Заполярное и др.), показывает, что уравнения месторождений-аналогов практически являются огибающей линией к исследуемому полю точек в атмосферных условиях.

Результаты УЭС с потоковых экспериментов («кern — kern») и наличие изолированного керна (семь пропластков — «кern — ГИС») позволили подтвердить использование данного подхода в случае отсутствия собственных экспериментов в термобарических условиях (рис. 4). При этом данные для изолированного керна с сохраненной водонасыщенностью в целом повторяют данные при ТБУ.

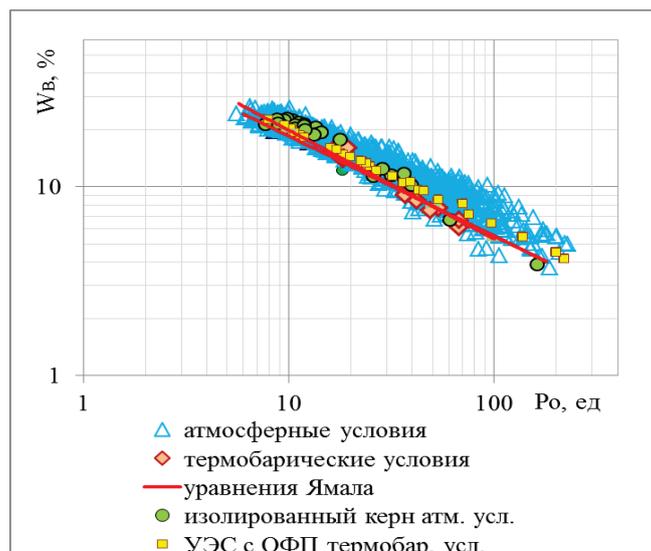


Рис. 4. Зависимость $P_0 = f(W_v)$ для сеноманских отложений

Таким образом, при отсутствии необходимых экспериментов в пластовых условиях, в качестве первого приближения для определения подсчетных параметров слабосцементированных пород сеноманских отложений предлагается использование огибающей линии к общему полю точек $P_0 = f(W_v)$ в атмосферных условиях. Необходимо учитывать, что данные изолированного ядра «секут» зависимости, полученные при моделировании, а это значит, что УЭС поровой воды в ядре с естественной водонасыщенностью растет с увеличением объемной водонасыщенности. То есть минерализация воды в залежи в коллекторах выше, а при переходе к неколлекторам и в сторону переходной зоны и контакта она уменьшается, что не фиксируется при использовании огибающей линии.

Поэтому для лучшего понимания особенностей свойств горных пород, в том числе и удельного электрического сопротивления, а значит и насыщенности, необходимо обеспечить отбор изолированного ядра и проведение исследований УЭС в термобарических условиях.

Библиографический список

1. Методическое руководство по отбору и анализу изолированного ядра / Я. М. Курбанов [и др.]. – 2001.
2. Добрынин В. М., Вендельштейн Б. Ю., Кожевников Д. А. Петрофизика: учеб. для вузов. – М.: Недра, 1991. – 368 с.

Сведения об авторах

Москаленко Наталья Юрьевна, начальник отдела петрофизического моделирования резервуаров и интерпретации данных геофизических исследований скважин, филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть», г. Тюмень, тел. 8(3452)545324, e-mail: MoskalenkoNY@tmn.lukoil.com

Мамяшев Венер Галиуллинович, к. г.-м. н., доцент кафедры прикладной геофизики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)452473, e-mail: tmngeofiz@mail.ru

Information about the authors

Moskalenko N. Yu., Head of the Department, Branch of LLC «LUKOIL-Engineering» «Kogalym-NIPIneft», Tyumen, phone: 8(3452)545324, e-mail: MoskalenkoNY@tmn.lukoil.com

Mamyashev V. G., Candidate of Geology and Mineralogy, Associate Professor at the Department of Applied Geophysics, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)452473, e-mail: tmngeofiz@mail.ru