

Сопоставление значений капиллярного давления, полученных методами центрифугирования и капилляриметрии

Андреева Р. Ю.

Андреева Радмила Юрьевна / Andreeva Radmila Yurjevna – студент, магистр,
горно-нефтяной факультет, кафедра разработки и эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений,
Уфимский Государственный Нефтяной Технический Университет, г. Уфа

Аннотация: в статье анализируется сопоставление кривых капиллярного давления от водонасыщенности, полученных методами полупроницаемой мембраны и центрифугирования.

Ключевые слова: водонасыщенность, керн, капиллярное давление, капилляриметр, центрифугирование.

В продуктивных пластах нефтяной и газовой залежи содержится вода, она остается со времени образования залежи и называется остаточной. Информация о нефтеводонасыщенности продуктивных пластов важна на всех стадиях разработки месторождений. В настоящее время для получения данной информации существуют прямые и косвенные методы, основанные на изучении образцов горной породы – керне.

Основным методом оценки остаточной водонасыщенности является прямое определение количества воды в кернах, отобранных из скважин, пробуренных на безводном растворе. Суть данного метода заключается в поднятии керна на поверхность, его герметизации и срочной доставки в лабораторию без повреждения консервирующей оболочки. Однако реализация прямого метода определения остаточной водонасыщенности очень трудоемка и требует не малых материальных затрат.

Косвенные методы же являются менее затратными и наиболее распространенными при количественной оценке остаточной водонасыщенности коллекторов. При данных методах в лаборатории моделируется процесс формирования залежей, в ходе которого в исследуемых образцах, искусственно насыщенных моделью пластовой воды достигается гидродинамическое равновесие, реально отображающее соотношение флюидов, содержащихся в продуктивных пластах.

Ведущими косвенными методами для измерения капиллярного давления являются:

- метод капилляриметрии (полупроницаемой мембраны),
- метод центрифугирования.

Метод полупроницаемых мембран является наиболее распространенным и широко применяемым. Он основан на измерении содержания воды в капилляриметре при вытеснении воды из образцов горной породы нефтью (моделью нефти) или воздухом (моделью газа) при различных перепадах давления. Такой способ нередко называют способом восстановления начального состояния системы, так как в опыте моделируется процесс вытеснения воды при заполнении ловушки нефтью или газом.

Такие опыты могут быть проведены в двух вариантах:

1. С индивидуальной камерой. (Мембрана рассчитана на один образец горной породы);
2. С групповой камерой. (Мембрана имеет больший диаметр, на нее помещают сразу несколько образцов).

Основным элементом в капилляриметре является полупроницаемая мембрана – тонкопористый диск из керамики, а важным параметром является – давление начала прорыва, которое определяют при проверке качества самой мембраны. Мембрану, насыщенную водой закрепляют в специальном держателе и заливают ее верхнюю часть водой. При помощи редуктора повышают давление воздуха под мембраной со скоростью не более 0,5 ат/час до появления в воде цепочки пузырьков выходящего воздуха. При этом значение давления и будет давлением прорыва ($P_{пр}$). Оно определяет максимальную величину капиллярного давления, которая может достигаться в опыте [1].

Начальное насыщение образцов рассчитывают по формуле:

$$K_{нас} = \frac{M_n - M_c}{\rho V_n} \cdot 100\%$$

где M_n – масса насыщенного образца, г; M_c – масса сухого образца, г;
 ρ – плотность аналога пластовой воды, г/см³; V_n – объем пор, см³.

Тогда минимальный входной радиус пор образца, из которых будет вытеснена вода, определяется по формуле:

$$r_{min} = \frac{2 \cdot \tau \cdot \cos \theta}{P_{пр}}$$

где τ – поверхностное натяжение, дин/см, θ – краевой угол, $P_{пр}$ – давление прорыва мембраны, дин/см².

Данный метод имеет некоторые недостатки:

- требует довольно большого количества времени проведения опыта, от 2 недель до нескольких месяцев;

- не подходит для образцов коллекторов трещинного, кавернового и каверно-трещинного типов.

Метод центрифугирования. Это простой и быстрый метод для определения остаточной водонасыщенности, который основан на вытеснении свободной воды из образцов горной породы под действием центробежных сил. Он заключается в центрифугировании насыщенных водой образцов и взвешивании их до и после центрифугирования, где после определяют объем воды, оставшейся в керне [1]. Коэффициент водонасыщенности определяют по формуле:

$$S_w = \frac{M_k - M_1}{M_2 - M_1}$$

где M_1 – вес сухого образца, г; M_2 – вес образца, насыщенного водой, г; M_k – вес образца с водой, оставшейся в нем после центрифугирования, г.

Стоит отметить, что метод центрифугирования не подходит для исследования слабосцементированных образцов, которые разрушаются в ходе эксперимента.

В настоящее время используют высокоскоростные петрофизические ультрацентрифуги, которые позволяют проводить массовые лабораторные исследования и обеспечивают необходимую точность. Однако методика расчета капиллярного давления и текущей нефтенасыщенности в методе центрифугирования вызывает определенные затруднения, поскольку у разных производителей рекомендации различны. Расчеты могут осуществляться различными методами, наиболее широко распространенными являются способ Б.И. Тульбовича [2] и способ Хасслера – Бруннера.

В конце 70-х годов прошлого века Б.И. Тульбович усовершенствовал известный способ Слобода [3], по которому текущая водонасыщенность определяется как средняя величина для всего образца керна по объему вытесненной жидкости. Была получена эмпирическая формула, по которой находят капиллярное давление, при этом зависимость капиллярного давления от насыщенности максимально приближена к зависимости, получаемой методом капилляриметрии.

$$P_k = 1.09 \cdot 10^{-9} \Delta \rho n^2 \left(\frac{9rl + 2l^2}{36} \right)$$

где P_k – капиллярное давление, МПа; $\Delta \rho$ – разность плотностей смачивающей и несмачивающей жидкостей, г/см³; n – частота вращения ротора, мин⁻¹; r – радиус вращения образца, см; l – длина образца, см.

Способ Хасслера - Бруннера основывается на определении капиллярного давления на внешнем торце керна и соответствующей насыщенности при разных угловых скоростях [4]. Так как в каждом сечении образца распределение капиллярного давления и насыщенности меняется из-за изменения расстояния от центра вращения, то данный способ в последнее время зарекомендовал себя в лабораторной практике как приоритетный при изучении средне- и высокопроницаемых пород – коллекторов порового типа.

На рисунке 1 показано сопоставление кривых капиллярного давления, которые были получены методами центрифугирования и капилляриметрии для одних и тех же образцов песчано – алевритовых пород – коллекторов Заполярного месторождения. Кривые капиллярного давления, выражающие зависимость капиллярного давления (P_k) от водонасыщенности (S_w), надежно отражают особенности распределения в пустотном пространстве породы – коллектора связанной и подвижной фаз и позволяют определять области совместного течения жидкостей.

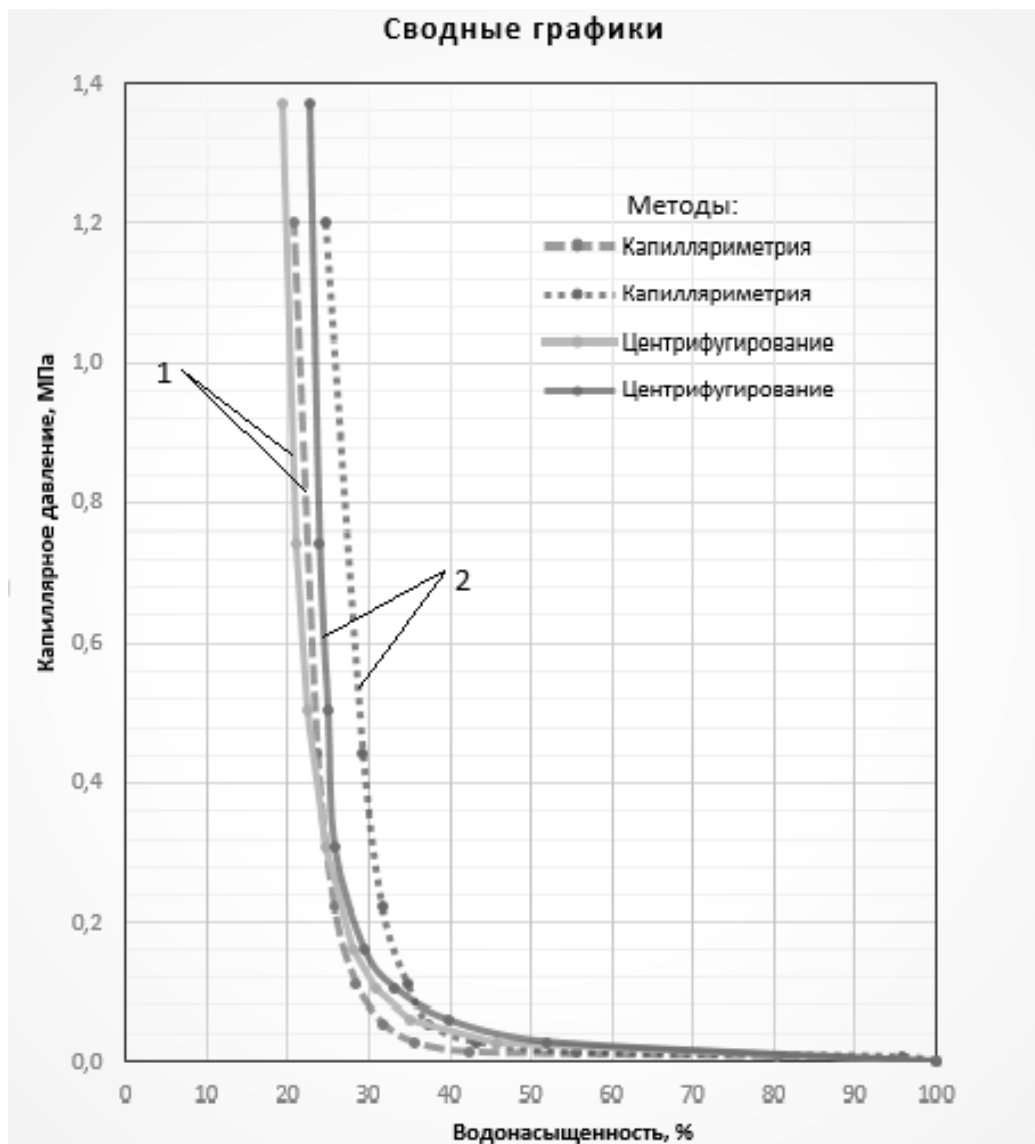


Рис. 1. Сопоставление кривых капиллярного давления, полученных методами центрифугирования и капилляриметрии для одних и тех же образцов Заполярного месторождения, с проницаемостью 1 - 1198,64; 2 - 564,26 (10^{-3}) мкм²

Исходя из рисунка, можно сделать выводы, что при сопоставлении кривых капиллярного давления от водонасыщенности, полученных методом центрифугирования и методом полупроницаемой мембраны для одних и тех же образцов горной породы близки между собой, а различия кривых составляют всего несколько процентов. Это объясняется различными механизмами вытеснения воды в роторе центрифуги и камере капилляриметра. В последнем полупроницаемая мембрана обеспечивает установление в камере искусственно созданного перепада давления и постепенный охват им всего объема пористой среды. В роторе центрифуги же в каждом сечении образца возникает собственный перепад давления, который увеличивается от центра вращения к периферии.

Литература

1. Ханин А. А. Породы – коллекторы нефти и газа и их изучение. М.: Недра, 1976. 295 с.
2. Тульбович Б. И. Методы изучения пород – коллекторов нефти и газа. М.: Недра, 1979. 199 с.
3. Slobod R. L., Chambers A., Prehn W. L. Use of centrifuge for determining connate water, residual oil and capillary curves of small core samples. Trans. Of AIME. 1951. V.192. P.127.
4. Коллинз Р. Течение жидкостей через пористые материалы. Перевод с английского. М.: Мир, 1964. 350с.