

## **СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАПИЛЛЯРНОГО ДАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЯ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ**

Патент РФ № 2546701

Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем нефти и газа РАН.

Автор: Свалов Александр Михайлович

Изобретение относится к нефтедобывающей промышленности и может быть использовано для повышения достоверности оценки запасов углеводородов и математического моделирования пластовых процессов в низкопроницаемых коллекторах нефти и газа. Техническим результатом является определение повышенных значения капиллярных давлений в низкопроницаемых образцах горных пород без явления разрыва жидких флюидов при вращении центрифуги. Способ включает вытеснение насыщающего образец породы флюида вытесняющим флюидом при вращении центрифуги. При этом перед вращением центрифуги в загерметизированном кернодержателе центрифуги повышают начальное давление путем закачки в него вытесняющего флюида до уровня, превышающего прогнозируемое максимальное значение капиллярного давления в образце породы. Также предложено устройство для реализации способа.

Изобретение относится к нефтедобывающей промышленности и может быть использовано для повышения достоверности оценки запасов углеводородов и математического моделирования пластовых процессов в низкопроницаемых коллекторах нефти и газа.

Известен способ определения капиллярного давления в образцах горных пород методом центрифугирования, включающий размещение образца горной породы, насыщенного вытесняемым смачивающим флюидом, в герметизируемом кернодержателе центрифуги, заполненном несмачивающим данную породу флюидом, с последующим вращением центрифуги с различными угловыми скоростями, измерением объемов вытесняемой жидкости в калиброванную мерную трубку кернодержателя центрифуги и последующим расчетом на основе полученных данных зависимости капиллярного давления от насыщенности образца вытесняемой жидкостью (Коллинз Р. Течение жидкостей через пористые материалы. – Перевод с англ. – Мир, 1964.-350 с.; Тульбович Б.И. Методы изучения пород-коллекторов нефти и газа. М.: Недра, 1979. – 199 с.; Гудок Н.С., Богданович Н.Г., Мартынов В.Г. Определение физических свойств нефтеводосодержащих пород: Уч. пособие для вузов. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 592 с.; Тиаб Дж., Дональдсон Э.Ч. Петрофизика: Теория и практика, изучение коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов. – Перевод с англ. – М.: ООО «Премиум-Инжиниринг», 2009. – 868 с.).

Данный способ определения капиллярного давления основан на различии распределения давления в разных фазах двухфазной вращающейся среды, обусловленном различием плотностей фаз, которое в установившемся состоянии компенсируется капиллярным давлением, то есть разницей давления в

смачивающей и несмачивающей фазах. Распределение давлений вдоль вращающегося образца в этих двух фазах определяется на основе точных гидродинамических формул, а установившаяся насыщенность образца смачивающей фазой определяется как разность начального количества этой фазы в образце и ее вытесненного объема, накапливающегося в калиброванной мерной трубке кернодержателя центрифуги и измеряемого при различных угловых скоростях вращения образца. Математическая обработка этих данных позволяет с удовлетворительной точностью построить зависимость капиллярного давления от насыщенности породы смачивающим флюидом. В качестве флюидов используются вода, нефть, газ (воздух).

Недостатком данного способа является принципиальная невозможность определения повышенных величин капиллярного давления (близких или превышающих одну атмосферу ( $\sim 0,1 \text{ МПа}$ )), характерных для низкопроницаемых коллекторов нефти и газа, из-за явления разрыва жидких флюидов, насыщающих образец породы, при высоких скоростях вращения центрифуги.

Технической задачей, решаемой предлагаемым изобретением, является расширение возможностей определения капиллярного давления методом центрифугирования для повышенных величин капиллярных давлений в породе.

Техническая задача решается способом, включающим повышение начального давления в загерметизированном кернодержателе центрифуги путем закачки в него вытесняющего флюида с помощью клапана одностороннего действия, устанавливаемого в кернодержателе, до достижения в кернодержателе необходимого уровня начального давления.

Новым является то, что в последовательность действий при определении капиллярного давления методом центрифугирования вводится дополнительный этап повышения давления в загерметизированном кернодержателе центрифуги с помощью установленного в кернодержателе дополнительного элемента - клапана одностороннего действия, позволяющего регулировать уровень начального давления в кернодержателе.

Сущность изобретения заключается в следующем. При вращении образца породы в центрифуге давление в насыщающих его флюидах (газе, воде или нефти) по параболическому закону повышается в направлении от внутреннего торца образца, ближнего к оси вращения, к внешнему (Коллинз Р. Течение жидкостей через пористые материалы. – Перевод с англ.– Мир, 1964. – 350 с.; Тульбович Б.И. Методы изучения пород-коллекторов нефти и газа. М.: Недра, 1979. – 199 с.).

Механизм разрыва жидкости, реализующийся при высоких скоростях вращения образца породы, поясним на примере распределения давления во вращающемся герметичном цилиндре, заполненном однородной жидкостью (фиг. 1). Как отмечалось выше, кривая распределения давления  $P$  (пунктирная линия 1) в жидкости имеет вид параболы, но с учетом того, что в существующих конструкциях центрифуг вращающийся образец удален от оси вращения достаточно далеко, для упрощения изложения можно считать распределение

давления вдоль цилиндра линейной функцией (прямая 2 на фиг. 1), что несущественно влияет на приводимые ниже числовые оценки (примерно на ~10%), не влияя при этом на следующие из этих оценок выводы.

При небольших, в пределах нескольких десятков атмосфер (нескольких МПа), изменениях давления в слабосжимаемых жидкостях, к которым относятся как вода, так и нефть или иная углеводородная жидкость, величина изменения давления  $\delta p$  в них линейно связана с величиной изменения плотности  $\delta \rho$  – повышение давления сопровождается повышением плотности, а уменьшение давления, соответственно, сопровождается разрежением жидкости, то есть уменьшением ее плотности. В герметизированном цилиндре, в котором отсутствует отток или приток жидкости извне, любое изменение давления в жидкости вдоль вращающегося цилиндра обусловлено перераспределением плотности жидкости внутри этого цилиндра. Таким образом, повышение давления в жидкости на внешнем торце цилиндра обусловлено сжатием, то есть уплотнением жидкости в этой части объема и, соответственно, разрежением, снижением плотности жидкости  $\rho$  вблизи внутреннего торца цилиндра. Распределение плотности  $\rho$  вдоль вращающегося цилиндра изображено на фиг. 1 в виде прямой линии 3. Пунктирными горизонтальными линиями на фиг. 1 изображены начальные распределения давления и плотности жидкости.

Из условия сохранения массы жидкости в герметичном цилиндре следует, что абсолютная величина прироста плотности жидкости  $\delta \rho$  на внешнем торце цилиндра должна быть равна абсолютной величине снижения ее плотности на внутреннем торце ( $-\delta \rho$ ) и, следовательно, в силу линейной зависимости изменения давления в слабосжимаемой жидкости от изменения ее плотности, абсолютная величина прироста давления  $\delta p$  вблизи внешнего торца цилиндра будет равна абсолютной величине снижения давления вблизи внутреннего торца ( $-\delta p$ ). Другими словами, если при начальном давлении жидкости в цилиндре, равном атмосферному давлению (1 атм), вращение цилиндра приводит к приросту давления жидкости на внешнем торце, равном, например, 0,5 атм, то на внутреннем торце, при линейном распределении, давление жидкости при этом понизится также на 0,5 атм.

Отсюда следует, что если с ростом скорости вращения цилиндра давление на внешнем торце увеличивается более, чем на 1 атм, то давление в жидкости вблизи внутреннего торца цилиндра при начальном давлении в нем, равном 1 атм, неизбежным образом понижается до отрицательных значений, при которых будет происходить разрыв жидкости, потеря ее сплошности и заполнение образовавшихся полостей насыщенным паром. Дальнейшее увеличение скорости вращения цилиндра будет приводить к увеличению размеров области разрыва жидкости вблизи внутреннего торца цилиндра, заполненной паром (или водной пеной), давление в которой будет находиться вблизи нулевых значений. Очевидно, что такой механизм разрыва жидкости при отрицательных давлениях реализуется и в любом вращающемся загерметизированном объеме, не обязательно имеющим форму цилиндра.

Описанный механизм потери сплошности жидкости во вращающемся цилиндре, заполненном однородной жидкостью, позволяет проанализировать особенности распределения давлений и в случае вращения загерметизированного кернодержателя центрифуги, заполненного вытесняющим флюидом и размещенным в нем образцом породы, насыщенным вытесняемой жидкостью (фиг. 2). Здесь индексом 1 отмечен кернодержатель центрифуги с измерительной калиброванной трубкой 2, индексом 3 отмечен образец горной породы, насыщенный вытесняемым смачивающим породу флюидом и размещенный внутри кернодержателя центрифуги.

Для дальнейшего анализа приведем формулы для перепада давления  $\Delta P$  (дин/см<sup>2</sup>) по длине образца породы во вращающейся жидкости, а также для капиллярного давления  $P_c$  (дин/см<sup>2</sup>), представляющего собой разность давлений в несмачивающем и смачивающем флюидах:

$$\Delta P = \rho \cdot \omega^2 \cdot (R_{\text{внш}}^2 - R_{\text{внт}}^2) / 2 \quad (1)$$

$$P_c = \Delta \rho \cdot \omega^2 \cdot (R_{\text{внш}}^2 - R_{\text{внт}}^2) / 2 \quad (2)$$

Здесь  $\rho$  – плотность вращающегося жидкого флюида (воды или нефти), г/см<sup>3</sup>;  
 $\Delta \rho$  – разность плотностей вытесняемого и вытесняющего флюидов, г/см<sup>3</sup>;

$\omega$  – угловая скорость вращения центрифуги, 1/сек;  $R_{\text{внш}}$  и  $R_{\text{внт}}$  – радиусы вращения, соответствующие внешнему и внутреннему торцу образца породы (фиг.2), см; (Коллинз Р. Течение жидкостей через пористые материалы. - Перевод с англ. – Мир, 1964. - 350 с.; Тиаб Дж., Дональдсон Э.Ч. Петрофизика: Теория и практика, изучение коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов. – Перевод с англ. – М.: ООО «Премиум-Инжиниринг», 2009. – 868 с.).

Отметим, что в формуле (2) приведено максимальное значение капиллярного давления  $P_c$ , достигаемое на внутреннем торце образца ( $R_{\text{внт}}$ ), при этом на внешнем торце ( $R_{\text{внш}}$ ) значение капиллярного давления общепринято считать нулевым, что следует из условия равенства давлений в обеих средах в калиброванной измерительной трубке.

Проанализируем особенности распределения давлений в наиболее часто применяемом варианте определения капиллярного давления методом центрифугирования, когда гидрофильный образец породы 3 (фиг. 2) насыщен водой, а вытеснение воды производится несмачивающим флюидом - воздухом. Будем учитывать то обстоятельство, что в силу того, что сжимаемость воздуха в рассматриваемых условиях на несколько порядков превышает сжимаемость воды, возможное малое изменение объема воды в кернодержателе центрифуги, обусловленное перераспределением давления в ней на несколько атмосфер, практически не приводит к изменению давления в воздушной среде.

Более того, как следует из формулы (1), центробежные силы, приводящие к перераспределению давления внутри вращающегося объема флюида,

пропорциональны плотности этого флюида, и, поскольку плотность воздуха примерно на три порядка ниже плотности воды, вращение образца, приводящее к изменению давления в воде вдоль образца породы на несколько атмосфер, практически не приводит к изменению давления в воздухе вдоль образца породы и кернодержателя центрифуги с измерительной трубкой.

Таким образом, можно заключить, что при вращении образца породы давление в вытесняющей воздушной фазе внутри кернодержателя центрифуги всюду близко к начальному атмосферному давлению  $\sim 1$  атм. Отсюда следует, что, если предположить, что капиллярное давление, то есть разница давлений в воздухе и воде, максимальная вблизи внутреннего торца образца, превышает 1 атм, то это будет означать, что давление в водной фазе в этой области неизбежным образом будет переходить в область отрицательных значений и в действительности здесь будет происходить описанный выше разрыв водной фазы. При дальнейшем увеличении угловой скорости вращения образца область потери сплошности водной фазы, обусловленная ее разрывом, будет расширяться.

Таким образом, можно заключить, что при вытеснении воды из образца горной породы воздухом (газом) методом центрифугирования значения капиллярного давления в образцах горной породы, превышающие 1 атм, даже теоретически недостижимы из-за разрыва водной фазы вблизи внутреннего торца вращающегося образца.

Рассмотрим другой случай, когда кернодержатель центрифуги заполнен нефтью как вытесняющей фазой, а образец породы по-прежнему насыщен водой как смачивающей фазой. Предположим, что при вращении центрифуги максимальное значение капиллярного давления, достигаемое на внутреннем торце образца, равно нескольким десятым долям атмосферы, для определенности, например, 0,5 атм. Давление в обеих жидкостях возрастает при приближении к внешнему торцу и, согласно формулам (1) и (2), прирост давления в нефтяной фазе при приближении к внешнему торцу образца будет в  $\rho/\Delta\rho$  раз превышать величину максимального капиллярного давления, равного, по предположению, 0,5 атм.

Если допустить, что вблизи внутреннего торца образца не происходит разрыва водной фазы, то есть давление в водной фазе вблизи этого торца превышает нулевое значение, то, соответственно, давление в нефтяной фазе здесь превышает 0,5 атм и при характерной для плотности воды и нефти величине отношения  $\rho/\Delta\rho \sim 4-5$ , давление в нефтяной фазе, равное на выходе из образца ( $R_{внш}$ ) давлению в водной фазе, будет превышать  $\sim 2,5$  атм.

Сопоставляя эту величину с числовыми оценками, сделанными для случая вращения цилиндра, заполненного однородной жидкостью, можно сделать качественный вывод, заключающийся в том, что в данном случае давление в водной фазе вблизи внутреннего торца образца в действительности должно понизиться от своего начального уровня, соответствующего атмосферному давлению, как минимум, на 1,5 атм. Этот вывод следует из того обстоятельства, что разрежение воды вблизи внутреннего торца в данном случае должно компенсировать не только уплотнение воды и нефти вблизи внешнего торца до

2,5 атм, что на 1,5 атм выше начального давления в образце породы, но и, дополнительно, уплотнение обеих фаз в измерительной трубке, а также меньшее на величину капиллярного давления разрежение нефти, по сравнению с водой, вблизи внутреннего торца образца.

Таким образом, из приведенных числовых оценок следует, что в случае вытеснения из образца породы воды нефтью из предположения, что капиллярное давление достигает 0,5 атм, следует, что водная фаза во внутренней части образца в действительности должна при этом потерять сплошность. В реальности, как это следует из приведенных оценок, при использовании нефти в качестве вытесняющей жидкости, в отличие от случая использования газа, будут недостижимыми даже значения капиллярного давления, находящиеся в диапазоне первых десятых долей атмосферы. Это обусловлено тем обстоятельством, что в загерметизированном кернодержателе центрифуги вблизи внутреннего торца образца породы в нефти, как в жидкой среде, подобной воде, при вращении образца также происходит заметное понижение давления от начального уровня, равного 1 атм.

Из проведенного анализа особенностей распределения давлений во вращающемся загерметизированном кернодержателе центрифуги следует, что для достижения высоких (превышающих ~1 атм и даже меньших) капиллярных давлений методом центрифугирования для предотвращения перехода жидких флюидов в область отрицательных значений давления и соответствующей потери их сплошности необходимо повысить начальное давление в кернодержателе центрифуги до значений, превышающих максимальное ожидаемое значение капиллярного давления. Так, например, повышение начального давления до 10 атм позволит без разрыва жидких флюидов в породе достигать величин капиллярных давлений во вращающемся образце породы в пределах 10 атм при использовании газа в качестве вытесняющего флюида и в пределах нескольких атмосфер при использовании в качестве вытесняющего флюида нефти или другой углеводородной жидкости.

Технически повышение начального давления в загерметизированном кернодержателе центрифуги может быть осуществлено путем закачки в него вытесняющего флюида через клапан 4 (фиг.2) одностороннего действия, пропускающего флюиды в одном направлении, установленного в кернодержателе, как это схематично показано на фиг.2.

Отметим, что описанный выше механизм разрыва жидких флюидов реализуется и в случае использования негерметизируемого кернодержателя центрифуги, то есть в случае, когда внутренний торец вращающегося образца сообщается с атмосферой. При использовании газа в качестве вытесняющей среды даже числовые оценки, приведенные выше для загерметизированного кернодержателя, переносятся на рассматриваемый случай, поскольку, как было показано выше, давление в газовой среде в загерметизированном кернодержателе практически не отличается от атмосферного. При использовании нефти в качестве вытесняющего флюида давление в нефтяной фазе вблизи внутреннего торца образца будет равно атмосферному давлению, то есть давление в нефти во вращающемся

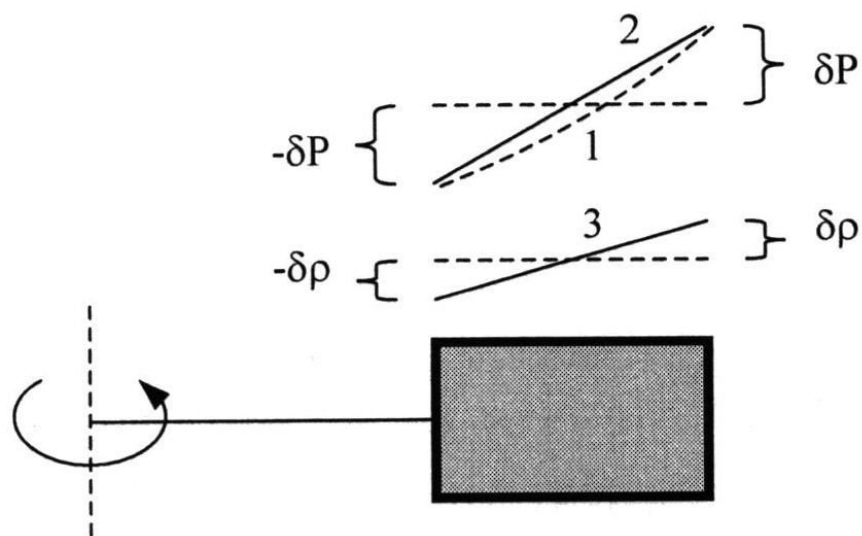
образце породы в этом случае не будет снижаться до отрицательных значений, но при капиллярном давлении, превышающем одну атмосферу, в водной фазе вблизи внутреннего торца вращающегося образца по-прежнему будет происходить ее разрыв. Таким образом, в любом варианте применения стандартного метода центрифугирования для определения капиллярного давления, физически невозможно достижение величин капиллярных давлений, превышающих одну атмосферу.

Применение предлагаемого способа и устройства для его реализации мало отличается от применения стандартного метода центрифугирования для определения капиллярного давления в образцах горной породы. Дополнительным элементом кернодержателя центрифуги является установленный в кернодержателе клапан одностороннего действия, с помощью которого перед вращением центрифуги производится закачка в загерметизированный кернодержатель вытесняющего флюида до достижения в нем начального уровня давления, превышающего ожидаемый уровень максимального капиллярного давления в образце данной породы.

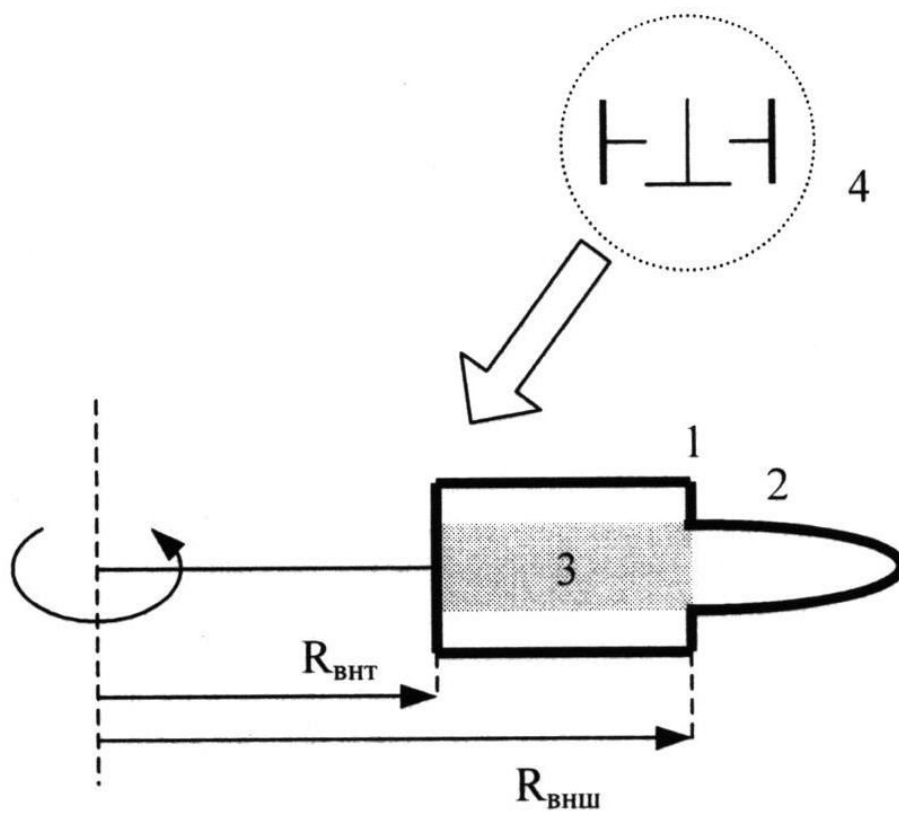
Последовательность действий при применении предлагаемого способа с использованием воздуха в качестве вытесняющего флюида будет следующей.

Насыщенный водой образец горной породы помещается в кернодержатель центрифуги с измерительной трубкой, на котором установлен клапан одностороннего действия. Кернодержатель, заполненный воздухом, герметизируется, после чего через установленный клапан производится дополнительная закачка воздуха до достижения давления в кернодержателе, равного 10 атм, что обеспечит достижение капиллярных давлений в образце породы в пределах этих 10 атм без разрыва водной фазы в области отрицательных значений давления. Затем центрифуга приводится во вращение с различными угловыми скоростями с последовательным ступенчатым нарастанием скоростей вращения. После достижения установившегося состояния для каждой скорости вращения определяется объем вытесненной воды, накапливающейся в измерительной трубке. Длительность периодов времени, необходимых для достижения установившихся состояний, а также шаг прироста скоростей вращения центрифуги определяются по существующим стандартным методикам. Математическая обработка полученных данных для получения зависимости капиллярного давления от насыщенности образца породы также производится в соответствии с существующими методиками.

ПРИЛОЖЕНИЕ



Фиг.1



Фиг.2