

Совершенствование аспирационного термомассометрического метода определения форм и видов связи воды, насыщающей породу

Н.А. Скибицкая, В.А. Кузьмин, М.Н. Большаков*, О.О. Марутян, Е.Г. Доманова

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва

E-mail: *rgu2006@mail.ru

Аннотация. Существующая лабораторная установка аспирационной термомассометрии, основанная на измерении массы и температуры в процессе изотермической сушки образца породы в потоке воздуха, удовлетворяет петрофизическим задачам изучения коллекторов нефти и газа. В то же время она имеет потенциал повышения точности исследований. В работе предложена модифицированная установка для изучения свойств водонасыщенных и углеводородонасыщенных пород, которая за счет своей конструкции повышает точность измерения.

Ключевые слова: аспирационная термомассометрия, изотермическая сушка, кривые сушки, связанная вода, остаточная вода, вода углов пор, вода микрокапилляров, структурно заземленная вода, фуникулярная вода, поры, коллекторы.

Для цитирования: Скибицкая Н.А., Кузьмин В.А., Большаков М.Н., Марутян О.О., Доманова Е.Г. Совершенствование аспирационного термомассометрического метода определения форм и видов связи воды, насыщающей породу // Актуальные проблемы нефти и газа. 2020. Вып. 2(29). С. 39–50. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art3>

Формирование нефтяных месторождений и их разработка неразрывно связаны с наличием в емкостном объеме коллекторов воды, которая находится в сложном состоянии и меняет свои физические свойства в зависимости от форм и видов связи воды с породообразующим веществом. Согласно общепринятой концепции, состояние остаточной воды и начальное распределение нефти, воды и газа в пласте определяются различными факторами: структурой порового пространства, физико-химическими свойствами пород, количеством и составом остаточной воды и др. Количество остаточной воды, заполняющей часть открытого емкостного пространства, определяет величину коэффициентов остаточной водонасыщенности ($K_{во}$), нефте-

и газонасыщенности (K_n , K_g) и эффективной пористости, используемых при подсчете запасов. В гидрофильных коллекторах остаточная вода содержится в виде пленки прочно- и рыхлосвязанной воды на стенках пор, воды углов пор и микрокапилляров, в виде энергетически не связанной, структурно-заземленной воды в центральной части пор, и определяет собой неснижаемую остаточную водонасыщенность [1].

Унификация форм воды и видов связи воды с породой находит свое отражение в различных классификациях. В гидрогеологии и инженерной геологии принята классификация, которая была предложена А.Ф. Лебедевым (1930 г.) и получила дальнейшее развитие в трудах В.Д. Ломтадзе, Е.М. Сергеева и др. [2–5].

В современном представлении вода в емкостном объеме гидрофильных пород подразделяется на:

- физико-химически прочно- и рыхлосвязанную, формирующую двойной слой;
- физически или менисково-связанную – вода углов пор, вода микрокапилляров;
- энергетически свободную, структурно-защемленную в центральной части пор, во все более увеличивающемся объеме при укрупнении пор и увеличении отношения диаметра пор к диаметру каналов более единицы ($d_{пор}/d_{кан} > 1$);
- фуникулярную – непрерывной связанности в динамическом, фильтрующем емкостном объеме коллектора.

В нефтенасыщенном или газонасыщенном коллекторе динамический или фильтрующий емкостной объем заполнен частично или полностью природным газом или нефтью. Приуроченность пластовых флюидов, газа, нефти, воды к динамической части емкостного объема породы-коллектора указывает на непрерывную, фуникулярную связанность каждого из флюидов в этом объеме и на возможность двухфазной (газ-вода, нефть-вода) или даже трехфазной (газ-нефть-вода) фильтрации этих пластовых флюидов в процессе добычи углеводородов. Результаты исследований свойств, формы и видов связи воды в водонасыщенных и нефтегазонасыщенных породах опубликованы в работах [1–8].

Точное определение объема остаточной воды в образцах пород является достаточно сложной задачей. Этим объясняется наличие различных методов ее определения. В петрофизической практике лабораторных исследований для определения

остаточной воды, как правило, применяют методы центрифугирования, капиллярных давлений, прямые методы (способ Закса) определения остаточной водонасыщенности парафинированного или герметизированного керна, отобранного при бурении скважин на РНО. Для более дифференцированной оценки водонасыщенности пород, как в водоносных пластах, так и в продуктивных отложениях нефтяных, нефтегазоконденсатных и нефтяных месторождений требуется более детальное изучение форм и видов связи с породой воды, насыщающей емкостные объемы породы. При этом важно выяснить и качественную роль различных форм воды, так как при разработке залежей водонасыщенность оказывает большое влияние на процессы извлечения углеводородов из порового объема.

Известно, что вода, содержащаяся в породе, в зависимости от форм связи ее с породой имеет разные физические свойства, такие, как электрическое сопротивление, гидродинамическая подвижность, диэлектрическая проницаемость и др. Естественно, что прежде чем использовать сведения о свойствах породы при некотором количестве воды в ней (неснижаемом в условиях опыта, либо остаточной в условиях пласта), важно знать состояние, в котором эта вода находится в породе.

В практике промысловой геофизики в основу интерпретации скважинных данных заложено количественное определение содержания воды в породе. Качественное ее состояние учитывается результатами петрофизических исследований, оценивающих поверхностную проводимость, обменную емкость, диффузионно-адсорбционную активность и т.д.

В лабораториях физики пласта, как правило, определяется количество неснижаемой воды (равновесной в условиях опыта), которой придается смысл «остаточной водонасыщенности». Причем, достигаемые количества неснижаемой водонасыщенности зависят от возможности применяемых методов, т.е. от сил, с которыми вода удаляется из образца. В промысловой геофизике результаты этих методов используют для построения корреляционных связей. Влагосодержание пород можно разделить на область влажного состояния и область гигроскопического состояния [9]. Существующие петрофизические методы определения водонасыщенности, как правило, не позволяют оценить физическое состояние воды во всем диапазоне влажности породы – в области гигроскопического и в области влажного состояния. Так, стандартный метод капилляриметрии с полупроницаемой мембраной ограничен низким давлением прорыва мембран, а поэтому позволяет изучить изменение водонасыщенности пород только в области влажного состояния. Область гигроскопического состояния изучается с помощью изотерм адсорбции [10]. Методы, перекрывающие весь диапазон влажности пород, существуют и включают в себя:

1) метод изотермической сушки в потоке воздуха по Мессеру [11], усовершенствованный Л.К. Танкаевой [12];

2) метод сушки над хлористым кальцием, названный С.И. Шишигиным сорбционным [13];

3) метод определения связанной воды по электрическому сопротивлению, предложенный С.И. Долговым в 1948 г. для грунтов [14] и С.И. Шишигиным и С.И. Конюховым – для горных пород [15];

4) метод ядерно-магнитного резонанса.

Однако по этим методам не установлен четкий критерий границы между свободной и связанной водой.

В этой связи, особое место занимают методы изучения разных форм и видов связи с породой воды, насыщающей породу, основанные на регистрации энергетических эффектов при изменении фазового состояния. Одним из таких способов является термографический метод изотермической сушки, который был теоретически обоснован М.Ф. Казанским [16]. В дальнейшем метод был модифицирован Я.Р. Морозовичем и Н.А. Скибицкой, которыми была разработана модифицированная установка аспирационной термомассометрии (АТММ) [17]. В установке реализована возможность одновременной фиксации веса образца и температуры поверхности образца в процессе его изотермической сушки термодинамическим устройством-держателем в потоке воздуха в аэродинамической трубе. Разработанный специальный хромель-копелевый датчик-держатель позволил обеспечить свободный обдув всей поверхности образца при одновременном непрерывном точном взвешивании и измерении температуры образца, помещенного в поток воздуха постоянной скорости и постоянной температуры [18].

В данной установке [17], фактически, были объединены возможности методов Мессера (в усовершенствованном Л.К. Танкаевой варианте) и М.Ф. Казанского. Принципиально это дало возможность разделять по видам и формам связи с породой воду, насыщающую образцы ненарушенной структуры (цилиндрические, кубические), на которых изучается комплекс петрофизических, структурно-емкостных, физико-химических и стендовых исследований свойств пород.

Как результат, была создана установка АТММ, в которой предварительно насыщенный дистиллированной водой пористый образец высушивается в аэродинамической трубе в потоке воздуха постоянной скорости (0,5 м/сек) и температуры (25 °С) и при этом измеряется изменение массы, пересчитанное в изменение коэффициента водонасыщенности, и температуры поверхности образца во времени. В установке АТММ осуществляется одновременная запись кривых изменения массы (кривая сушки), температуры образца и дифференциальной температуры (Δt – разности между температурой воздуха и температурой образца) во времени (термограмма сушки). Это позволяет разделить остаточную воду на виды по степени ее энергетической и структурной связанности с породой. Кривые

кинетики сушки при этом расчленяются на ряд четких интервалов, отвечающих изменению условий тепломассопереноса в водонасыщенных образцах по мере удаления из них воды различных форм и видов связи с породой (рис. 1). Интерпретация полученных данных по сушке образца осуществляется следующим образом. Точка θ_{M1} на термограмме (см. рис. 1) сушки является критической точкой деления влагосодержания материала на область влажного состояния материала и область гигроскопического состояния.

Значение влажности образца в точке θ_{M1} отвечает на изотерме адсорбции максимальному гигроскопическому влагосодержанию при равновесной влажности $p/p_s=1$ (давление насыщенных паров воды). В состоянии такой влажности у образца целиком заполнены все микрокапилляры ($r > 10^{-5}$ см).

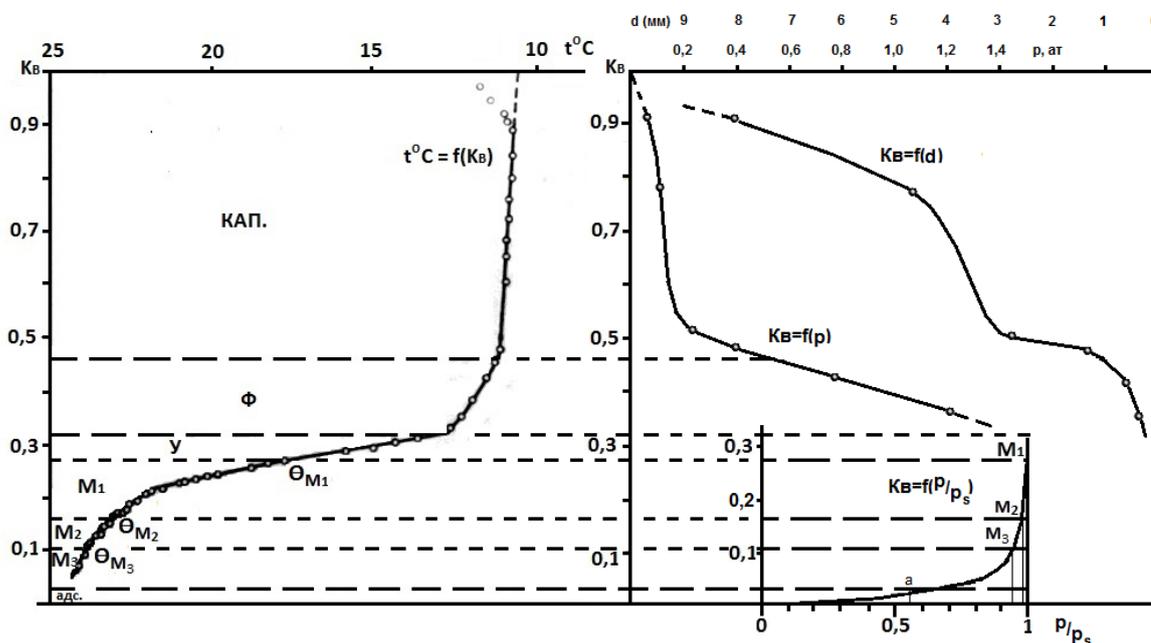


Рис. 1. Сопоставление термомассометрической кривой $t\text{ }^{\circ}\text{C}=f(K_{в})$ с изотермой адсорбции $K_{в}=f(p/p_s)$, с кривой капиллярных давлений $K_{в}=f(p)$ и с порометрической кривой $K_{в}=f(d_{кап})$. Обр. УБ-510, Усть-Балыкское месторождение, пласт БIV. Условные обозначения (интерпретация по Скибицкой Н.А.): КАП. – водонасыщенность образца, соответствующая содержанию в образце энергетически не связанной с породой структурно-защемленной в порах капиллярной воды (или воды, осмотически связанной в глинистом цементе); Ф – непрерывно связанной (фуникулярной или канатной) воды; У – воды углов пор (стыковой); M_1, M_2, M_3 – воды микрокапилляров 1-ой, 2-ой, 3-ей групп; адс./а – воды адсорбированной

Интервал $\theta_{M1}\theta_a$ на термограмме сушки описывает период испарения из образца влаги микрокапилляров ($r > 10^{-5}$ см). Нижняя граница этого интервала определяется по М.Ф. Казанскому [16] концом гистерезисного участка изотерм адсорбции-десорбции. Т. е. на изотермах адсорбции точка «а» соответствует началу капиллярной конденсации, а в форме уравнения БЭТ – эта точка означает начало отклонения от линейного участка. Таким образом, максимальным радиусом микрокапилляров выделенного участка будет радиус $r \leq 10^{-5}$ см.

Минимально возможным радиусом микрокапилляров участка будет радиус капилляров r , больший чем два диаметра молекул воды ($r > 2D$). Это означает, что если $r = 2D$, то конденсация паров воды в капиллярах невозможна. На рис. 2 показан пример массометрической и термометрической кривых сушки и интервалы различного энергетического и физико-механического состояний воды в образце породы из продуктивных нижнемеловых отложений пласта БV Усть-Балыкского нефтяного месторождения.

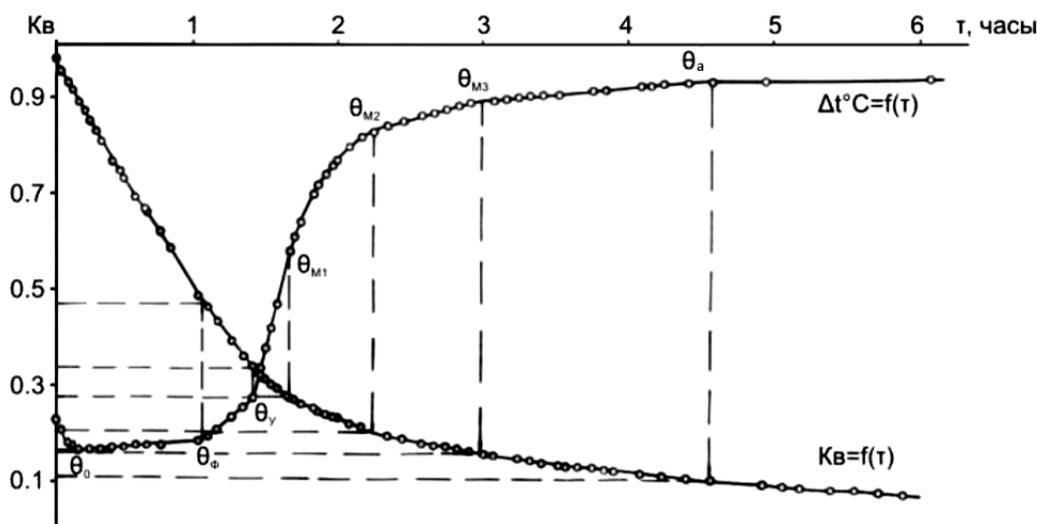


Рис. 2. Пример массометрической и термометрической кривых сушки образца породы интервалы различного энергетического состояния воды: $Kв$ – водонасыщенность образца, t – время

Отрезок от начала термограммы до точки θ_0 характеризует начальную стадию охлаждения образца, если температура его была больше температуры, соответствующей периоду постоянной скорости испарения. Эта стадия соответствует испарению влаги с поверхности образца и, как следствие, не несет информации о формах и видах связи влаги с породой внутри нее. Отрезок $\theta_0\theta_\phi$ отвечает испарению капиллярной влаги физико-механической формы связи, находящейся в порах образца радиусом $r > 10^{-5}$ см (в макрокапиллярах и макропорах).

Отрезок $\theta_\phi\theta_y$ на термограмме сушки отвечает периоду удаления из образца породы влаги фуникулярного (непрерывно-связанного, канатного) состояния. Линейный отрезок $\theta_y\theta_{M1}$ – период удаления влаги углов пор или стыковой влаги, характеризуется дальнейшим прогревом (увеличением температуры) образца. Отрезки $\theta_{M1}\theta_{M2}$, $\theta_{M2}\theta_{M3}$ и $\theta_{M3}\theta_a$ на термограмме сушки описывают период испарения из образца влаги микрокапилляров убывающих размеров ($r < 10^{-5}$ см) [17].

Усовершенствованная в 2010 г. в лаборатории трудноизвлекаемых запасов углеводородов в ИПНГ РАН (Н.А. Скибицкая, М.Н. Большаков, В.А. Кузьмин, О.О. Марутян) конструкция установки состоит из корпуса

(аэродинамическая труба), в котором с помощью фена (теплоэлектровентилятора) поток нагретого воздуха постоянной скорости (0,5 м/сек) и температуры (25 °С) обдувает влажный образец (рис. 3).

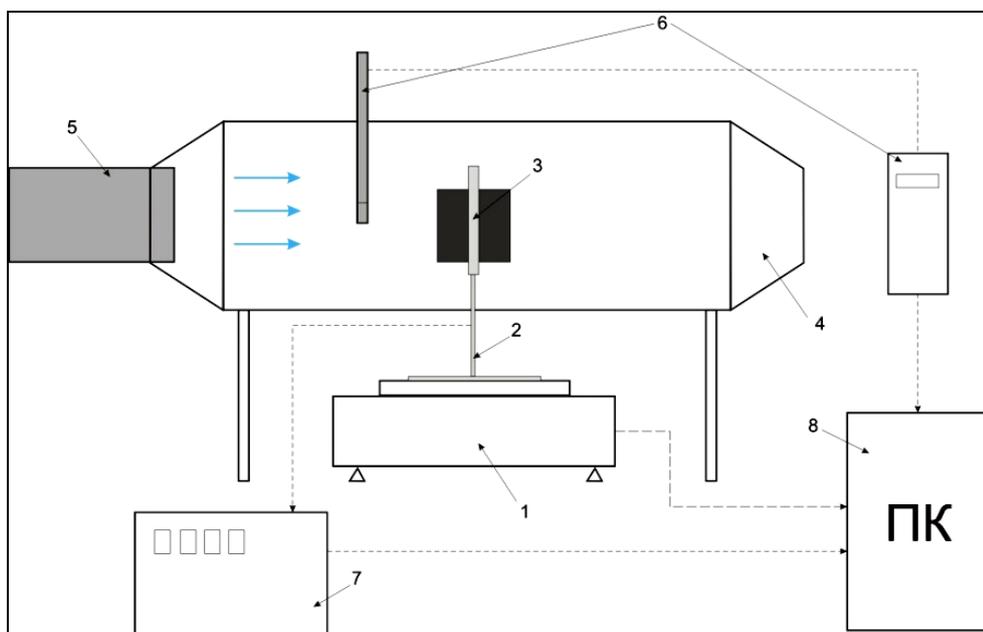


Рис. 3. Схема установки аспирационной термомассометрии: 1 – лабораторные весы (дискретность 0,001 г); 2 – держатель образца, позволяющий обеспечить свободный обдув всей поверхности образца; 3 – датчики температуры образца и температуры воздуха (дискретность 0,01 °С); 4 – аэродинамическая труба для стабилизации условий опыта, в которую помещается насыщенный образец; 5 – фен (теплоэлектровентилятор), обеспечивающий ускоренную сушку образца и удаление влаги из системы; 6 – термоанемометр для контроля скорости и температуры потока воздуха; 7 – измеритель температуры (АЦП); 8 – персональный компьютер с программным обеспечением (для регистрации данных в реальном времени)

Держатель с образцом при этом стоит на весах, расположенных под корпусом, для чего в корпусе имеется отверстие. Весы позволяют фиксировать изменение веса в процессе сушки. В установке имеются платиновые тонкопленочные датчики измерения температуры поверхности образца и измерения температуры потока нагретого феном воздуха. Данные веса, скорости потока, температуры образца и воздуха с помощью специального программного обеспечения

для регистрации массометрии и термограммы сушки водонасыщенного образца [19, 20] собираются на персональном компьютере.

Регистрация веса образца в установке производится каждые 2,5–5 минут. Применяется «мягкий» режим сушки, то есть температура воздуха 25 °С и скорость воздуха 0,5 м/сек. Конечная равновесная влажность образца в процессе сушки определяется влажностью в помещении, в котором проводится эксперимент.

Анализ работы установки и результатов термомассометрических исследований показали, что установка имеет потенциал для ее дальнейшей модернизации, связанный с возможностью повышения точности определения температуры высушиваемого образца.

Измерение температуры образца в установке производится датчиками температуры в определенных местах. Однако, на поверхности цилиндрического (кубического) образца имеется значительный температурный градиент из-за его неоднородной сушки в однонаправленном потоке нагретого воздуха, что может искажать кривые сушки образцов. Это связано с тем, что разные стороны образца по-разному обдуваются потоком воздуха, а капиллярный переток жидкости по тонким порам не обеспечивает равномерного насыщения образца во время сушки. Поэтому испарение на передней к потоку воздуха стороне образца более интенсивное, чем на

обратной к потоку стороне. Это приводит, во-первых, к различию температуры на поверхности образца и, во-вторых, к изменению динамики процесса сушки в зависимости от размеров пор в образце.

Для повышения точности определения форм и видов воды для образцов со сложной поровой структурой в установке предполагается реализовать дополнительный функционал – вращение образца, а также дистанционное измерение температуры образца [21]. Для этого образец располагается на вращающемся держателе. Вариант модифицированной установки представлен на рис. 4 (общий вид). Она, как и в прежнем варианте, содержит аэродинамическую трубу-корпус, тепловентилятор, направляющий поток воздуха постоянной скорости и температуры на образец, лабораторные электронные весы и персональный компьютер с программным обеспечением для регистрации и обработки данных в реальном времени.

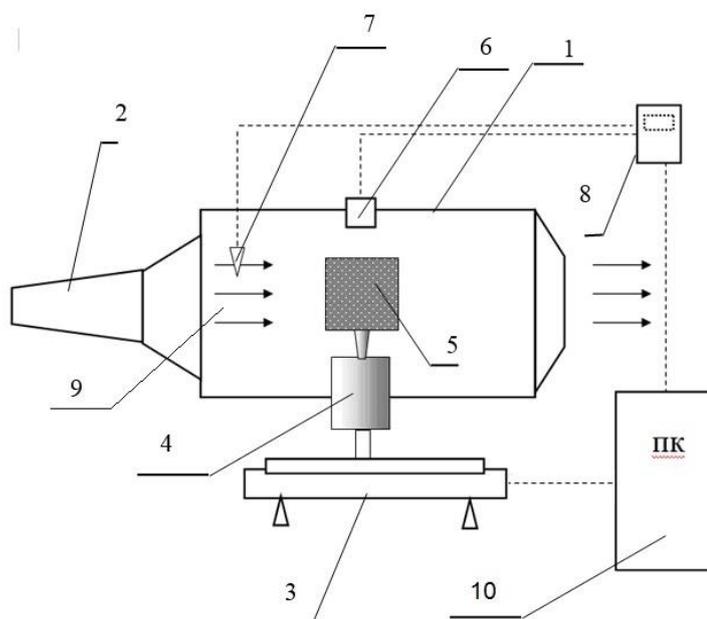


Рис. 4. Модифицированная установка АТММ: 1 – аэродинамическая труба; 2 – тепловентилятор; 3 – лабораторные электронные весы; 4 – шаговый электродвигатель; 5 – образец; 6 – инфракрасный датчик температуры образца; 7 – датчик температуры воздуха; 8 – измеритель температуры; 9 – поток воздуха; 10 – персональный компьютер

При этом держатель образца расположен на валу шагового электродвигателя для вращения образца, а инфракрасный датчик температуры позволяет измерять температуру образца на расстоянии, что дает возможность свободного вращения, а также снижает погрешность измерения веса за счет отсутствия проводных соединений.

Мягкое вращение образца позволяет привести в равные условия термосушки разные стороны образца и уменьшить эффект капиллярного перетока воды от передней, более обезвоженной части образца, на которую непосредственно воздействует поток нагретого воздуха, к менее обезвоженной противоположной части образца. Это особенно важно для тонкопористых образцов, в которых капиллярный перенос воды (жидкости) замедлен.

Такой образец рассмотрен в качестве примера интерпретации на рис. 5. На экспериментальной кривой связи водонасыщенности образца с разницей температур воздуха и образца можно достаточно уверенно выделить 4 участка. В точке 2 разделяются зоны фуникулярной воды и воды углов пор – это значение близко величине $K_{в0}$, полученной центрифугированием ($K_{в0} = 70\%$). В точке 1 при $K_{в} = 45\%$ разделяются зоны воды углов пор и воды микрокапилляров. Значение точки 3 близко величине $K_{г0}$ (коэффициент остаточного газонефтенасыщения), полученной способом прямоточной капиллярной пропитки, т. е. соответствует границе фуникулярной и структурно-связанной воды. Следовательно, показания термомассетрии подтверждаются данными центрифугирования и прямоточной капиллярной пропитки в доступном для этих методов диапазоне.

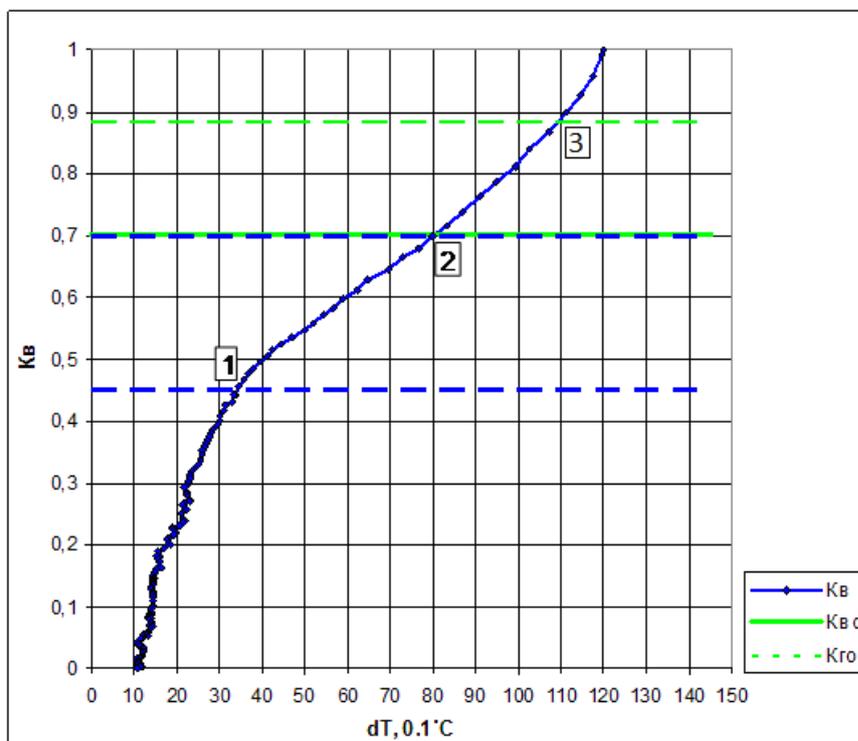


Рис. 5. Обр. 4/13. Экспериментальная связь водонасыщенности образца $K_{в}$ с разницей температур воздуха и образца dT (скв. № 210, инт. отбора 3740–3748,1 м, C_{1S1} , ВГКМ, $K_{п0} = 5,97\%$; $K_{г0} = 11,59\%$; $K_{в0} = 70,15\%$)

Предложенный способ дальнейшей модернизации установки аспирационной термомассометрии позволяет повысить точность измерений за счет более

равномерного испарения влаги пористого образца породы и измерения температуры бесконтактным инфракрасным датчиком в процессе сушки.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема: «Прогноз состояния ресурсной базы нефтегазового комплекса России на основе системных исследований перспектив нефтегазоносности природных резервуаров в карбонатных, терригенных и сланцевых формациях», № АААА-А19-119030690047-6).

Литература

1. *Амикс Дж., Басс Д., Уайтинг Р.* Физика нефтяного пласта. М.: Гостоптехиздат, 1962. 569 с.
2. *Лебедев А.Ф.* Почвенные и грунтовые воды. М.; Л.: Сельхозгиз, 1930. 278 с.
3. *Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Овчаренко Ф.Д.* и др. Вода в дисперсных системах. М.: Химия, 1989. 288 с.
4. *Сергеев Е.М.* Связанная вода в грунтах и ее влияние на их дисперсность и микроструктуру // Учен. зап. МГУ. Геология. 1956. Вып. 176. С. 221–231.
5. *Злочевская Р.И., Королев В.А.* Электроповерхностные явления в глинистых породах. М.: Изд-во МГУ, 1988. 177 с.
6. *Ханин А.А.* Породы-коллекторы нефти и газа и их изучение. М.: Недра, 1969. 368 с.
7. Поверхностные пленки воды в дисперсных структурах / Под ред. Е.Д. Шукина. М.: Изд-во МГУ, 1988. 279 с.
8. *Злочевская Р.И., Зиангиров Р.С., Сергеев Е.М., Рыбачук А.Н.* Исследование свойств связанной воды и двойного электрического слоя системы «глины–раствор» // Связанная вода в дисперсных системах: Сб. ст. 1970. Вып. 1. С. 102–138.
9. *Лыков А.В.* Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
10. *Багаутдинов А.К.* Некоторые особенности положения водонефтяного контакта залежей Советского месторождения // Вопросы нефтепромысловой геологии и проектирования разработки нефтяных месторождений Западной Сибири: Тр. Гипротюменнефтегаза, Тюмень, 1971. Вып. 19. С. 85–97.
11. *Messer E.S.* Interstitial water determination by an evaporation method // Trans. AIME, Petrol. Devel. and Technol. 1951. Vol. 192. P. 269–274.
12. *Танкаева Л.К.* Исследование метода определения остаточной водонасыщенности газонефтедержащих пород по кривым изотермической сушки образцов керна // Обз. инф. ВНИИОЭНГ. Сер. Геология и разведка газовых и газоконденсатных месторождений. М. 1969. Вып. 4. 40 с.
13. Шишигин С.П. Определение остаточной водонасыщенности методом капиллярного впитывания (вытяжки) // Геология нефти и газа. 1964. № 10. С. 41–43.
14. *Долгов С.И.* Исследование подвижности почвенной влаги и ее доступности для растений / Отв. ред. Л.И. Прасолов. М.; Л.: Изд-во АН СССР. 1948. 210 с.

15. *Шишигин С.П., Конюхов В.И.* Определение количества связанной воды в образцах пород коллекторов методом электропроводности // Геология и геофизика. 1964. № 7. С. 90–95.
16. *Казанский М.Ф.* Термограммы сушки капиллярно-пористых тел с разнородно-связанной влагой // Тепло- и массообмен в капиллярно-пористых телах: Сб. ст. М.: Госэнергоиздат, 1957. Вып. 8. С. 180–191.
17. *Скибицкая Н.А., Морозович Я.Р.* А.с. SU 320607 А1. Способ определения насыщенности горных пород флюидом, например водой. № 1427329; Заявл. 24.04.1970; Оpubл. 04.11.1971 // Изобретения. Полез. модели. Бюл. № 34. – Режим доступа: <http://www1.fips.ru>
18. *Скибицкая Н.А., Морозович Я.Р.* А.с. SU 467997 А1. Дифференциальный датчик температуры для термомассетрической аспирационной установки. № 1426158; Заявл. 24.04.1970; Оpubл. 25.04.1975 // Изобретения. Полез. модели. Бюл. № 15. – Режим доступа: <http://www1.fips.ru>
19. *Марутян О.О., Большаков М.Н.* Лабораторная установка аспирационной термомассетрии для определения водонасыщенности // IV Ежегодная Конференция молодых специалистов ИПНГ РАН: Тез. докл. М.: ИПНГ РАН, 2014. http://www.ipng.ru/uf/Theses_03122014_BolshakovMN_MarutianOO.pdf (Дата обращения 14.09.2020).
20. *Самохвалов Н.И., Большаков М.Н., Марутян О.О., Халиуллина А.Ф.* Виды и формы связи жидких углеводородов в нефтенасыщенных породах по данным аспирационной термомассетрии // Актуальные проблемы нефти и газа. 2017. Вып. 3(18). С. 7. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2017-18.art7>
21. *Скибицкая Н.А., Кузьмин В.А.* Патент RU 2680418 С1. Лабораторная установка аспирационной термомассетрии. № 2018107675; Заявл. 02.03.2018; Оpubл. 21.02.2019 // Изобретения. Полез. модели. Бюл. № 6. – Режим доступа: <http://www1.fips.ru>

Improvement of aspiration thermal massometry method for determination of forms and types of water binding in rocks

N.A. Skibitskaya, V.A. Kuzmin, M.N. Bolshakov*, O.O. Marutyan, E.G. Domanova

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

E-mail: *rgu2006@mail.ru

Abstract. The existing laboratory unit of aspiration thermal massometry, based on the measurement of weight and temperature during drying of rock sample in the air flow, meets the petrophysical tasks of studying oil and gas reservoirs. At the same time, it has the potential to improve the research accuracy. The paper proposes a modernized facility for studying properties of water-saturated and hydrocarbon-saturated rocks, which due to its design increases measurement accuracy.

Keywords: aspiration thermal massometry, isothermal drying, curves of drying, bound water, residual water, pore corner water, microcapillary water, structurally bound water, funicular water, pores, reservoirs.

Citation: Skibitskaya N.A., Kuzmin V.A., Bolshakov M.N., Marutyan O.O., Domanova E.G. Improvement of aspiration thermal massometry method for determination of forms and types of water binding in rocks // Actual Problems of Oil and Gas. 2020. Iss. 2(29). P. 39–50. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art3> (In Russ.).

References

1. Amix J., Bass D., Witing R. Physics of oil reservoirs. Moscow: Gostoptekhizdat, 1962. 569 p. (In Russ.).
2. Lebedev A.F. Soil and ground water. Moscow; Leningrad: Selkhozgiz, 1930. 278 p. (In Russ.).
3. Deryagin B.V., Churaev N.V., Ovcharenko F.D. et al. Water in dispersed systems. Moscow: Khimiya, 1989. 288 p. (In Russ.).
4. Sergeev E.M. Bound water in soils and its effect on their dispersion and microstructure // Scientific Notes of Moscow State University. Geology. 1956. Iss. 176. P. 221–231. (In Russ.).
5. Zlochevskaya R.I., Korolev V.A. Electrosurface phenomena in clay rocks. Moscow: Moscow State University, 1988. 177 p. (In Russ.).
6. Khanin A.A. Oil and gas reservoir rocks and their study. Moscow: Nedra, 1969. 368 p. (In Russ.).
7. Surface films of water in dispersed structures / Ed. by E.D. Shchukin. Moscow: Moscow State University, 1988. 279 p. (In Russ.).
8. Zlochevskaya R.I., Ziangirov R.S., Sergeev E.M., Rybachuk A.N. Investigation of the properties of bound water and a double electric layer of the clay–solution system // Bound water in dispersed systems: Collected papers. 1970. Iss. 1. P. 102–138. (In Russ.).
9. Lykov A.V. Drying theory. Moscow: Energy, 1968. 472 p. (In Russ.).
10. Bagautdinov A.K. Some features of the position of the oil-water contact of the Sovetskoye field // Issues of oilfield geology and design of development of oil fields in Western Siberia: Proceedings of Giprotymenneftegaz. Tumen, 1971. Iss. 19. P. 85–97. (In Russ.).

11. *Messer E.S.* Interstitial water determination by an evaporation method // Trans. AIME, Petrol. Devel. and Technol. 1951. Vol. 192. P. 269–274.
12. *Tankaeva L.K.* Investigation of the method for determining the residual water saturation of gas-oil-bearing rocks from the curves of isothermal drying of core samples // VNIIOENG Review Info. Ser. Geology and Exploration of Gas and Gas Condensate Fields. 1969. No. 4. 40 p. (In Russ.).
13. *Shishigin S.P.* Determination of residual water saturation by capillary absorption (extraction) // Geologiya Nefti i Gaza. 1964. No. 10. P. 41–43. (In Russ.).
14. *Dolgov S.I.* Study of the mobility of soil moisture and its availability for plants / Ed. by L.I. Prasolov. Moscow; Leningrad: USSR Academy of Sciences. 1948. 210 p. (In Russ.).
15. *Shishigin S.P., Konyukhov V.I.* Determination of the amount of bound water in reservoir rock samples by the electrical conductivity method // Russian Geology and Geophysics. 1964. No. 7. P. 90–95. (In Russ.).
16. *Kazansky M.F.* Thermograms of drying of capillary-porous bodies with heterogeneously bound moisture // Heat and mass transfer in capillary-porous bodies: Collected papers. Moscow: Gosenergoizdat. 1957. Iss. 8. P. 180–191. (In Russ.).
17. *Skibitskaya N.A., Morozovich Ya.R.* A.C. SU 320607 A1. A method for determining the saturation of rocks with a fluid, such as water. No. 1427329; Declared 24.04.1970; Publ. 04.11.1971 // Inventions. Useful models. Bull. No. 34. – Available at: <http://www1.fips.ru> (In Russ.).
18. *Skibitskaya N.A., Morozovich Ya.R.* A.C. SU 467997 A1. Differential temperature sensor for aspiration thermal massometry equipment. No. 1426158; Declared 24.04.1970; Publ. 25.04.1975 // Inventions. Useful models. Bull. No. 15. – Available at: <http://www1.fips.ru> (In Russ.).
19. *Marutyanyan O.O., Bolshakov M.N.* Laboratory equipment for aspiration thermal massometry for determining water saturation // The 4th Annual OGRI RAS Young Professionals Conference: Abstracts. Moscow: Oil and Gas Research Institute of the RAS, 2014. http://www.ipng.ru/uf/Theses_03122014_BolshakovMN_MarutianOO.pdf (Accessed on 14.09.2020). (In Russ.).
20. *Samokhvalov N.I., Bolshakov M.N., Marutyanyan O.O., Khaliullina A.F.* Types and forms of liquid hydrocarbon binding in oil-saturated rocks according to aspiration thermal massometry // Actual Problems of Oil and Gas. 2017. Iss. 3(18). P. 7. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2017-18.art7> (In Russ.).
21. *Skibitskaya N.A., Kuzmin V.A.* Pat. RU 2680418 C1. Laboratory installation of the aspiration thermomassometry. No. 2018107675; Declared 02.03.2018; Publ. 21.02.2019 // Inventions. Useful models. Bull. No. 6. – Available at: <http://www1.fips.ru>