

# ПОКАЗАТЕЛИ СМАЧИВАЕМОСТИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ И ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ НИМИ

Н.Н. Михайлов, Л.С. Сечина, И.П. Гурбатова  
ИПНГ РАН, Москва

## Введение

Смачиваемость пород-коллекторов нефти и газа углеводородами и водой влияет на характеристики двухфазной фильтрации и, соответственно, на эффективность почти всех известных технологий разработки месторождений углеводородного сырья с использованием заводнения.

Поверхность пород-коллекторов состоит из многих минералов с различными поверхностными свойствами, природные нефть и газ представлены смесью различных компонентов, а водная фаза представлена растворами разного состава с разной минерализацией. Изучение поведения этих многокомпонентных систем при инверсии смачиваемости позволяет применять те или иные способы увеличения нефтеотдачи. В водные растворы вводятся гидрофобизирующие агенты в целях снижения остаточной водонасыщенности и увеличения фазовой подвижности нефти, применяют многофункциональные поверхностно-активные реагенты, предназначенные для интенсификации основных технологических процессов добычи нефти, и т.д.

В зависимости от специфического взаимодействия многокомпонентных систем и способа определения смачиваемости различают следующие ее типы: преимущественно гидрофильный, преимущественно гидрофобный, нейтральный или промежуточный, дробный (частичный), гетерогенный, избирательный и недавно обнаруженный авторами микроструктурный тип смачиваемости [1, 2].

Существует несколько способов определения смачиваемости: измерение контактного угла, метод Амотта, метод USBM (метод центрифугирования), адсорбционные методы (адсорбция паров воды, адсорбция метиленового голубого), с помощью кривых капиллярного давления, метод ЯМР, с помощью капиллярной пропитки, кривых относительных проницаемостей, метод изотермической сушки (метод испарения) [3; 4].

Цель настоящей работы – экспериментальное изучение взаимосвязей между различными показателями смачиваемости и установление специфики влияния коллектора на показатели смачиваемости.

В данной работе рассматриваются и сопоставляются два метода: метод определения смачиваемости пород согласно ОСТ 39-180-85 и метод изотермической сушки.

### Проведение экспериментов

Из керна большого размера карбонатных пород Тэдинского месторождения и терригенных пород Самотлорского месторождения (пласт АВ<sub>4-5</sub>) были выпилены цилиндры меньшего размера в непосредственной близости друг от друга (параллельные образцы). Одна часть образцов исследовалась по ОСТ 39-180-85, другая часть – методом изотермической сушки.

Метод определения смачиваемости пород согласно ОСТ 39-180-85 предусматривает определение параметра, выражающего интегральную характеристику смачиваемости пород по данным капиллярного впитывания в образец воды и керосина при атмосферных условиях и в поле центробежных сил при центрифугировании.

Сущность метода заключается в определении смачиваемости по данным капиллярного вытеснения смачивающей жидкости несмачивающей, а затем капиллярного вытеснения несмачивающей жидкости смачивающей. Эксперимент проводится в два этапа: 1 – капиллярная пропитка, 2 – центрифугирование.

Количественно смачиваемость характеризуется показателями, которые выражаются через соответствующий вес на разных стадиях опыта. Находится объем самопроизвольно вытесненной керосином воды, общий объем вытесненной керосином воды, объем самопроизвольно вытесненного водой керосина, общий объем вытесненного водой керосина. Отношение объема самопроизвольно вытесненного водой керосина ( $V_k$ ) к общему объему вытесненного водой керосина ( $\Sigma V_k$ ) определяет показатель М. По показателю М принята следующая градация типа смачиваемости:

Показатель М	Тип смачиваемости
М = 0–0,2	гидрофобный
М = 0,2–0,4	преимущественно гидрофобный
М = 0,4–0,6	промежуточный
М = 0,6–0,8	преимущественно гидрофильный
М = 0,8–1,0	гидрофильный

Метод изотермической сушки образцов зерна основан на изучении пленочного течения воды по гидрофобной и гидрофильной поверхностям пор. Сущность метода состоит в определении объема свободной воды, испарившейся из гидрофобизованного образца, и объема свободной воды, испарившейся из образца после устранения гидрофобизации. Сопоставление этих объемов позволяет определить коэффициент гидрофобизации как долю площади поверхности пор, занятую гидрофобными веществами:

$$\theta_n = (W_1 - W_2)/W_1,$$

где  $\theta_n$  – коэффициент гидрофобизации;

$W_1$  – объем свободной воды, испарившейся из гидрофильного образца;

$W_2$  – объем свободной воды, испарившейся из гидрофобизованного образца.

При исследовании методом изотермической сушки образцы зерна насыщаются дистиллированной водой и помещаются в установку, представляющую собой термостат, где поддерживается температура 25 °С и влажность 33%. Термостат снабжен аналитическими весами. В процессе испарения воды получают кривые сушки сначала для гидрофобизованных образцов, затем, после экстракции, – для гидрофильных образцов.

#### Результаты экспериментов

Первая группа образцов Тэдинского месторождения (1–6) исследовалась согласно ОСТ 39-180-85 (показатель М); вторая группа образцов этого же месторождения (1'–6') исследовалась методом изотермической сушки (коэффициент гидрофобизации  $\theta_n$ ).

Как видно из табл. 1, показатель М изменяется от 0,1 до 0,47. Это характеризует образцы как гидрофобные и преимущественно гидрофобные.

Таблица 1

**Показатель М и коэффициент гидрофобизации  $\theta_n$  карбонатных образцов Тэдинского месторождения**

№ образца	М, доли единиц	№ образца	$\theta_n$ , доли единиц площади поверхности пор
1	0,27	1'	0,728
2	0,18	2'	0,610
3	0,1	3'	0,767
4	0,14	4'	0,759
5	0,47	5'	0,738
6	0,36	6'	0,568

Коэффициент гидрофобизации изменяется от 0,568 до 0,767. Из этого следует, что доля площади поверхности пор, занятая адсорбированными углеводородами, составляет больше 50%, то есть данные образцы также можно отнести к преимущественно гидрофобным.

Несмотря на то что образцы выпилены в непосредственной близости друг от друга, свойства их различны. В табл. 2 приведены данные по пористости параллельных образцов Тэдинского месторождения, а на рис. 1 изображена кривая капиллярного давления для одного из карбонатных образцов этого же месторождения.

Таблица 2

**Пористость параллельных образцов**

№ образца	Пористость, %	№ образца	Пористость, %
1	15,2	1'	16,7
2	14,1	2'	11,7
3	12,1	3'	13,3
4	15,7	4'	17,9
5	11,1	5'	12,1
6	13,2	6'	11,4

Как следует из табл. 2, пористость параллельных образцов различна.

Из рисунка видно, что и остаточная водонасыщенность образцов различна.

По кривым капиллярного давления были вычислены средние радиусы пор параллельных образцов и установлено, что процентное содержание пор с определенным радиусом различно как внутри каждой из исследованных групп, так и между группами (рис. 2 и 3).

Результаты экспериментов показали, что показатель смачиваемости  $M$  зависит от содержания пор разного размера. Чем больше в образце пор со средним радиусом 21,6–7,68 мкм, тем меньше значение показателя  $M$  и тем гидрофобнее образец (рис. 4). Начиная со среднего радиуса пор в 4,3 мкм и меньше показатель смачиваемости уменьшается, начинается переход к гидрофилизации образца (рис. 5).

Коэффициент гидрофобизации, полученный для второй группы образцов, увеличивается при уменьшении суммарного процентного содержания пор размером 21,6–7,68 мкм (рис. 6). Такая же зависимость прослеживается для пор размером 0,504–0,06 мкм.

Для пор размером 4,32 и 2,16 мкм наблюдается обратная зависимость – чем больше процентное содержание пор такого размера, тем больше коэффициент гидрофобизации (рис. 7).

Таким образом, установлено, что показатели смачиваемости связаны с особенностями поровой структуры и коррелируются с диапазоном пор определенного размера.

В табл. 3 приведены данные по определению показателя М и коэффициента гидрофобизации  $\theta_n$  терригенных пород Самотлорского месторождения. Капилляриметрия для этих образцов не проводилась.

Таблица 3

**Показатель М и коэффициент гидрофобизации  $\theta_n$  терригенных образцов Самотлорского месторождения**

№ образца	М, доли единиц	№ образца	$\theta_n$ , доли единиц площади поверхности пор
1	0,467	1'	0,200
2	0,469	2'	0,140
3	0,403	3'	0,174
4	0,522	4'	0,142
5	0,503	5'	0,138
6	0,526	6'	0,164
7	0,525	7'	0,195
8	0,524	8'	0,207
9	0,924	9'	0,165
10	0,996	10'	0,144

Из табл. 3 следует, что показатель М для терригенных пород изменяется от 0,403 до 0,996, то есть смачиваемость этих образцов характеризуется как промежуточная и гидрофильная.

Коэффициент гидрофобизации терригенных образцов изменяется от 0,138 до 0,207, то есть данные образцы можно охарактеризовать как преимущественно гидрофильные.

На рис. 8 показана зависимость коэффициента гидрофобизации от показателя М для карбонатных пород Тэдинского месторождения. Как видно из рисунка, большему значению показателя М соответствует меньшее значение коэффициента гидрофобизации.

Увеличение показателя  $M$  указывает на гидрофилизацию пород, а уменьшение коэффициента гидрофобизации также указывает на гидрофилизацию пород.

На рис. 9 показана зависимость коэффициента гидрофобизации от показателя  $M$  для терригенных пород Самотлорского месторождения. Как видно из рисунка, тенденция изменения степени гидрофобизации от показателя  $M$  такая же, что и на рис. 8: большему значению показателя  $M$  соответствует меньшее значение коэффициента гидрофобизации.

Таким образом, результаты экспериментов указывают на определенную корреляцию между показателями смачивания, основанными на различных физических принципах определения.

### Обсуждение результатов

Оба испытанных метода характеризуют смачиваемость породы водой и углеводородами. Показатель  $M$  указывает на предпочтение породы смачиваться водой и керосином. Коэффициент гидрофобизации определяет долю площади поверхности пор, занятую гидрофобными веществами, другими словами, определяет относительную смоченность поверхности пор водой и углеводородами.

Несмотря на различия рассмотренных методов и по показателю смачиваемости  $M$ , и по коэффициенту гидрофобизации, исследованные образцы керна квалифицируются одинаково: карбонатные образцы керна Тэдинского месторождения преимущественно гидрофобны, а терригенные образцы керна Самотлорского месторождения преимущественно гидрофильны.

Согласно определенному в ходе опыта показателю  $M$ , образцы Тэдинского месторождения разделились на гидрофобные, преимущественно гидрофобные и с промежуточной смачиваемостью.

Показатель  $M$  зависит от распределения пор по размеру: чем больше пор со средним радиусом 21,6–7,28 мкм, тем меньше показатель  $M$  и тем гидрофобнее образец. Чем больше пор со средним радиусом 4,3–0,06 мкм, тем больше показатель  $M$  и тем гидрофильнее образец. По показателю  $M$  наиболее гидрофобны более крупные поры, что указывает на сложный микроструктурный тип смачивания.

Коэффициент гидрофобизации  $\theta_n$ , определенный на параллельных образцах Тэдинского месторождения, изменяется в пределах 0,568–0,767.

Коэффициент гидрофобизации  $\theta_n$ , определенный на параллельных образцах Самотлорского месторождения, изменяется в пределах 0,138–0,207.

Коэффициент гидрофобизации зависит от распределения пор по размеру следующим образом: чем больше пор со средним радиусом 21,6–7,28 мкм, тем меньше коэффициент; такая же зависимость наблюдается для пор со средним радиусом 0,504–0,06 мкм. Увеличение содержания пор размером 4,32–2,16 мкм приводит к возрастанию коэффициента гидрофобизации  $\theta_n$ . По коэффициенту гидрофобизации наиболее гидрофобны поры с радиусом 4,32–2,16 мкм.

Такое расхождение в показаниях смачиваемости пор объясняется следующими факторами:

- а) действительная разница в смачиваемости пор параллельных образцов;
- б) при определении показателя  $M$  вытеснение контролируется только капиллярными силами; вытеснение происходит из центра пор, а поверхность поровых каналов остается гидрофильной;
- в) толщина смачивающей водной пленки в порах большего радиуса пор меньше, чем в тонких порах, поэтому в цикле пропитки пор керосином последнему легче гидрофобизовать поверхность порового пространства через более тонкую, смоченную водой пленку.

Сопоставление показателя  $M$  и коэффициента гидрофобизации  $\theta_n$  показывает значительный разброс точек. Такой разброс можно объяснить реальным различием между параллельными образцами керна и различием в методах определения смачиваемости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов Н.Н., Семенова Н.А., Сечина Л.С. Микроструктурная смачиваемость и ее влияние на фильтрационно-емкостные свойства продуктивных пластов. М.: Нефтегаз International, 2009. С. 8–11.
2. Anderson W.G. Wettability Literature Survey. Pt 6. The Effects of Wettability on Waterflooding, // JPT. 1987. № 12. P. 1605–1619.
3. А.с. 1022005 СССР. Способ определения степени гидрофобизации поверхности пор.– № 3229848/18-25; Заявл. 30.12.80; Опубл. 07.06.83 // Открытия, изобрет. 1983. № 21. С. 123. Соавт.: Танкаева Л.К., Сечина Л.С., Приваленко Н.В.
4. Dixit A.B, Buckley J.S., McDougall S.R., Sorbie K.S. Эмпирические показатели смачиваемости в пористой среде и зависимость между ними, полученная по моделированию в поровом масштабе // Transp. Porous Media. 2000. Vol. 40. P. 27–54.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

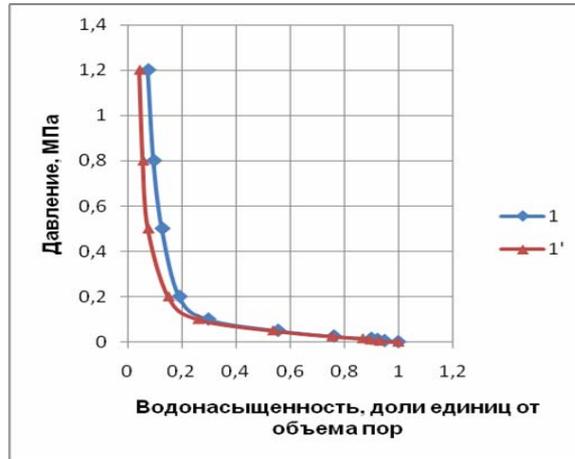


Рис. 1. Кривые капиллярного давления параллельных образцов 1 и 1' карбонатных пород Тэдинского месторождения

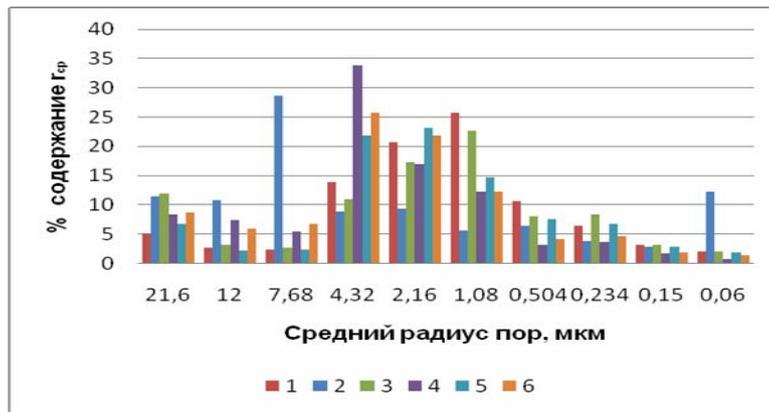


Рис. 2. Процентное содержание пор со средним радиусом для образцов 1–6.

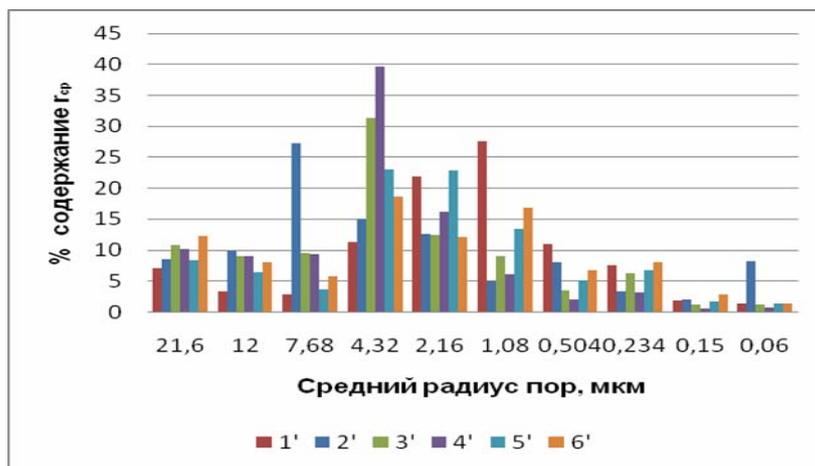


Рис. 3. Процентное содержание пор со средним радиусом для образцов 1'–6'.

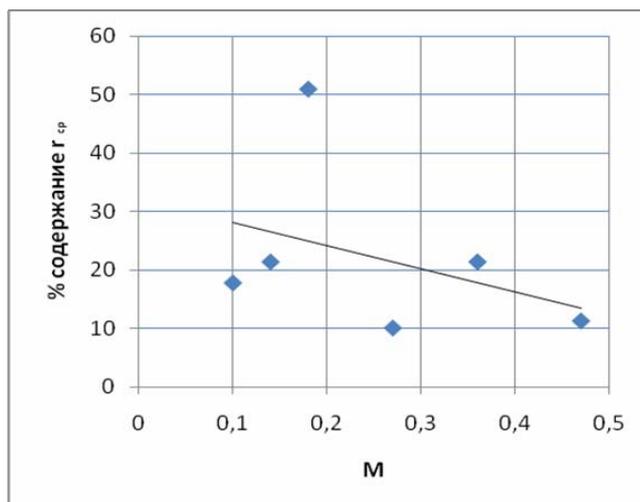


Рис. 4. Зависимость показателя М от суммарного процентного содержания пор со средним радиусом 21,6–7,68 мкм

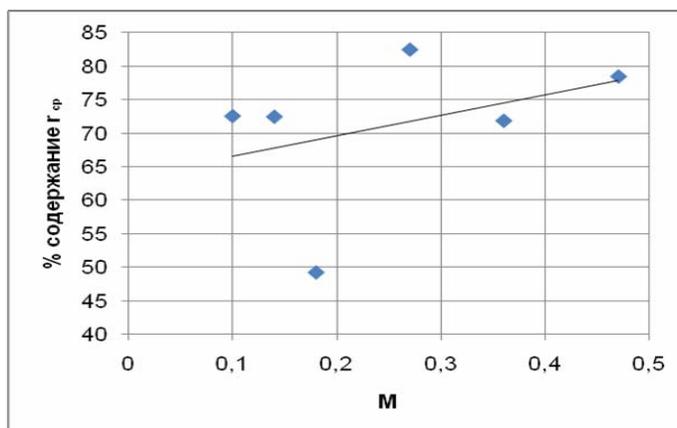


Рис. 5. Зависимость показателя М от суммарного процентного содержания пор со средним радиусом 4,3–0,06 мкм

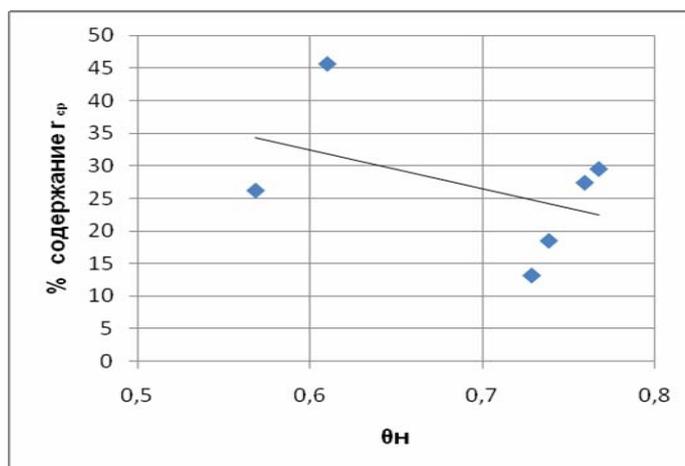


Рис. 6. Зависимость коэффициента гидрофобизации  $\theta_n$  от суммарного процентного содержания пор со средним радиусом 21,6–7,68 мкм

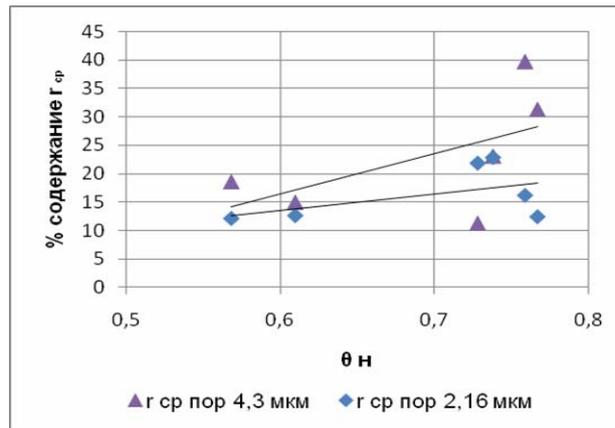


Рис. 7. Зависимость коэффициента гидрофобизации  $\theta_n$  от суммарного процентного содержания пор со средним радиусом 4,32–2,16 мкм

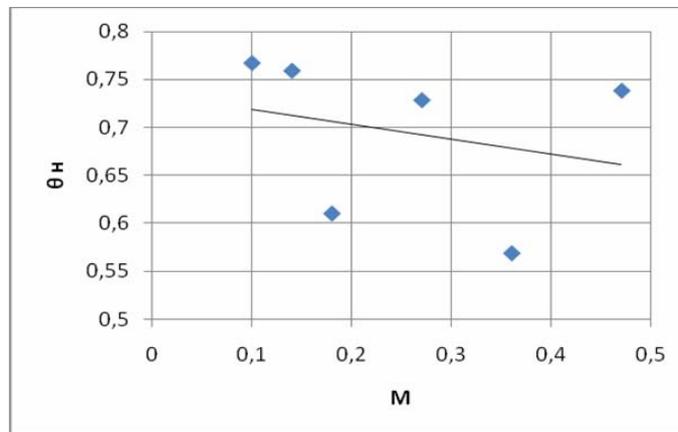


Рис. 8. Зависимость коэффициента гидрофобизации  $\theta_n$  и показателя M для карбонатных образцов Тэдинского месторождения

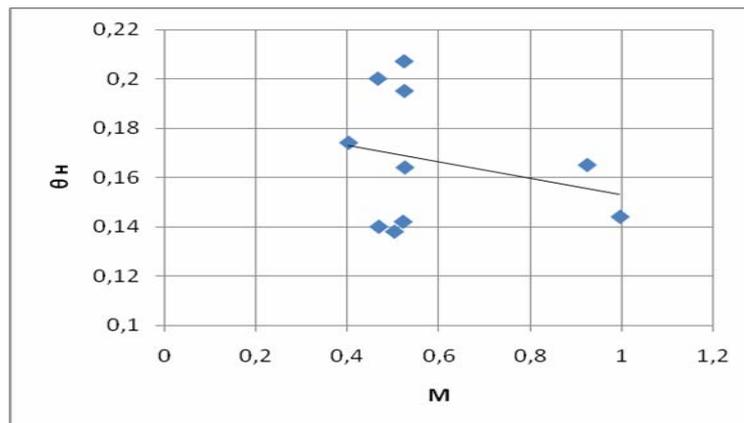


Рис. 9. Зависимость коэффициента гидрофобизации и показателя M для терригенных образцов Самотлорского месторождения