



Исследование эффекта динамического запираания эмульсий, содержащих твердые включения¹

Рахимов А.А.* , Ахметов А.Т.** , Валиев А.А.* , Асадуллин Р.Р.**

*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

**Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа

***ООО «Уфимский научно-технический центр», Уфа

В работе представлены результаты экспериментальных исследований течения стабилизированных водонефтяных эмульсий, приготовленных из нефти и пластовой воды скважин Западно-Кочевненского месторождения, а также с наличием хризотила и аэросила в цилиндрических и плоских капиллярах (модели трещины). Обнаружен эффект динамического запираания, состоящий в том, что на участках капилляров и в модели трещин, при постоянно действующем перепаде давления, течение обратных водонефтяных эмульсий со временем останавливается. Увеличение содержания изотропных и анизотропных частиц приводит к увеличению вязкости эмульсии и уменьшению времени наступления динамического запираания. При одинаковом процентном содержании частиц у эмульсий, содержащих хризотил, время наступления запираания и объем протекшей эмульсии до запираания на порядок меньше, чем у эмульсий с содержанием аэросила. Однако при этом вязкость эмульсии с аэросилом даже выше, чем у аналогичной эмульсии с хризотилом.

Ключевые слова: дисперсия, эмульсия, капилляр, ячейка Хеле–Шоу, динамическое запираание

1. Введение

Опыт разработки нефтяных месторождений свидетельствует о том, что в процессах первичного и вторичного вскрытия продуктивных пластов, при проведении ремонтных работ в скважинах, а также при их эксплуатации постепенно ухудшаются коллекторские свойства призабойной зоны пласта. Чаще всего это является следствием отрицательного воздействия технологических жидкостей на водной основе, наиболее широко используемых в отрасли. Альтернативными системами являются составы на углеводородной основе, в частности обратные эмульсии. Подтверждением высокой эф-

фективности применения растворов на углеводородной основе для глушения нефтяных скважин служит успешный опыт их применения в качестве промысловых жидкостей при бурении и вскрытии продуктивных пластов на многих месторождениях страны. Применение разработанных рецептур позволяет повысить технико-экономические показатели бурения и ремонтов скважин и сохранять естественные коллекторские свойства продуктивных пластов на уровне 96–100% [1].

Обратные водонефтяные эмульсии представляют собой микрокапли дисперсной фазы — воды, находящиеся в дисперсионной среде — нефти. Основным гидродинамическим свойством эмульсий является их высокая вязкость по сравнению с вязкостью несущей фазы. Повышение концентрации дисперсной фазы ведет к существенному возрастанию вязкости эмульсии. Изучение микрогидродинамики (microfluidics) позволяет установить особенности течения эмульсий в отдельных порах порового пространства. На основе ранее про-

¹Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-31-00360-мол. а) и средств государственного бюджета по госзаданию 0246-2018-0004.

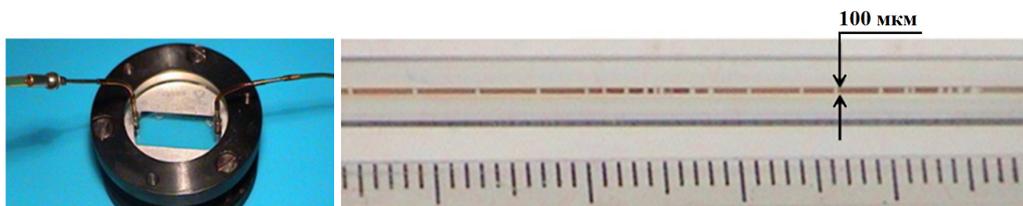


Рис. 1. Плоские капилляры (разборная ячейка Хеле–Шоу) с поступательным течением (слева) и цилиндрический капилляр с осесимметричным течением (справа)

веденных экспериментов [2–6] известно, что течение стабилизированной нефтенолом водонефтяной эмульсии в щелевидной модели (плоская ячейка Хеле–Шоу) и в капиллярах разного диаметра при постоянном перепаде давления приводит к тому, что массоперенос эмульсии по показаниям прецизионных электронных весов, измеряющих с точностью до 0,1 мг, со временем прекращается. Детальное изучение структуры потока под микроскопом показывает, что на самом деле течение прекращается не полностью, а уменьшается со временем более чем на 3 порядка, поэтому это явление было названо эффектом динамического запираания. Наличие данного эффекта объясняет успех применения водонефтяных эмульсий в потокоотклоняющих технологиях, в качестве жидкостей для глушения скважин и буровых растворов с кольматационными свойствами.

2. Экспериментальная установка

Эксперименты проводились в цилиндрическом стеклянном капилляре с осесимметричным течением и в плоском капиллярном канале (ячейке Хеле–Шоу) с поступательным течением (рис. 1).

Оба типа капиллярных структур изготовлены из прозрачных (стеклянных) элементов. Течение организовано путем подачи жидкостей при перепаде давления в 200 кПа на вход капиллярных структур, на выходе давление соответствовало атмосферному, расходные характеристики потока измерялись при помощи электронных весов НМ-200, связанных с компьютером. Картина течения записывалась на цифровую видеокамеру в масштабе модели и микромасштабе через микроскоп Stemi–2000C (рис. 2).

Цилиндрические стеклянные капилляры имеют длину 2 см и диаметр 100 мкм. Жидкость подводилась по полиэтиленовым трубкам с внутренним диаметром 1,5 мм.

Для изучения процессов в плоском капиллярном канале была разработана ячейка Хеле–Шоу размером 4 × 2 см с величиной зазора между пластинами 50 мкм. Ячейка Хеле–Шоу широко ис-

пользуется для изучения неустойчивости Релея–Тейлора при вытеснении вязких сред маловязкими, при исследовании движения многофазных систем [2]. Ячейка образовывалась между двумя толстыми цилиндрическими пластинами из оптического стекла, помещенными в стальную обойму, зазор определялся толщиной подбираемой фольги, а размеры в плане — окошком, которое в ней вырезалось. В верхнем стекле были просверлены два отверстия, в одно из которых жидкость подавалась под давлением, а из другого поступала на электронные весы, расстояние между входным и выходным отверстиями 4 см. Движение происходит в образованном пластинами и фольгой объеме.

Реологические характеристики эмульсий определялись с помощью современного высокоточного реометра HAAKE MARS III системой измерения двойного конуса–пластины.

Эмульсия является неньютоновской жидкостью, зависимость напряжения сдвига от скорости деформации сдвига с большой степенью достоверности аппроксимируется формулой Оствальда-де Ваала $\tau = k\dot{\gamma}^n$.

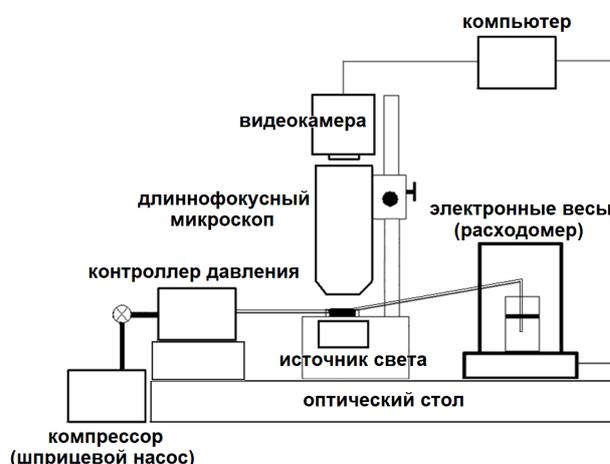


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

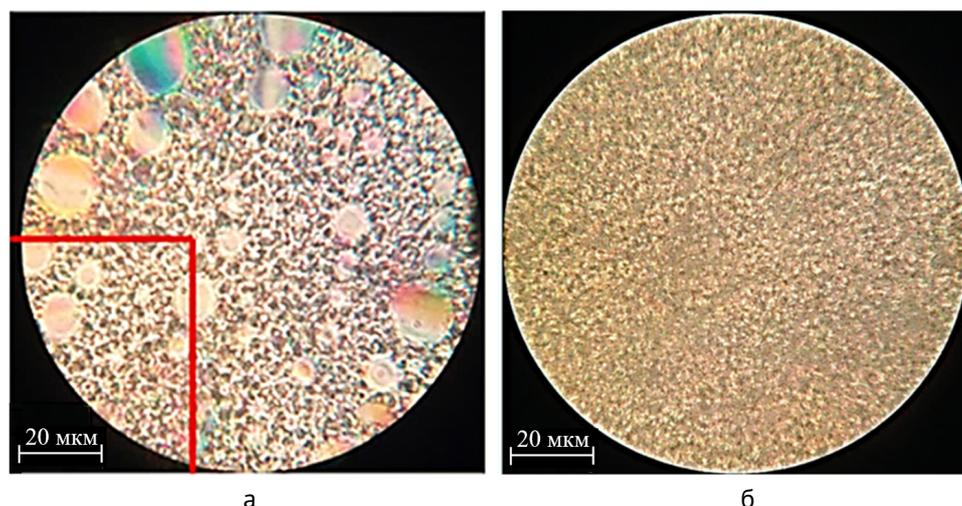


Рис. 3. Фотоизображения эмульсии с 1% эмульгатора (а) и 4% эмульгатора (б), диаметр видимой части составляет 114 мкм. Прямоугольником выделена область для подсчета размера капель

2.1. Обратные водонефтяные эмульсии

Используется эмульсия — 29% нефти, 70% воды, 1% эмульгатор (нефть Западно-Кочевненского месторождения) светло-коричневого цвета, вязкая. Спустя сутки после приготовления наблюдается выделение несущей фазы. Состав эмульсии: 70 мл пластовой воды с минерализацией 150 гр/л, 29 мл нефти, 1 мл эмульгатора Девон 4в марка А (концентрация эмульгатора в углеводородной фазе составляет 3,3%). Для эмульсии с содержанием 4% эмульгатора количество нефти составило 26 мл, 4 мл эмульгатора (в углеводородной фазе — 13,3%).

Приготовление: в емкость наливалась нефть и необходимое количество эмульгатора. Далее производилось перемешивание с частотой 500 об/мин. Спустя несколько минут частоту оборотов повышали до 3600 об/мин и добавляли с помощью дозатора воду по каплям. После этого перемешивание продолжалось в течение 30 минут.

После приготовления сделаны микрофотографии эмульсии. На рис. 3 представлены фотографии эмульсии с содержанием 1% и 4% эмульгатора, полученные с помощью микроскопа PZO.

Для контроля полученного увеличения снят объект-микрометр. С помощью программы Axio Vision изучены структуры эмульсий и распределение капель по размерам, для эмульсии с 1% эмульгатора построена гистограмма (рис. 4). Для построения использовалась часть приведенного изображения (прямоугольник на рис. 3(а)).

На этой площади отмечались размеры диаметров капель, которые заносились автоматически в таблицу. Далее, в программе Excel, проводилась

сортировка по размерам. Подсчитывалось количество капель с диаметром от 1 до 2 мкм — первый столбец и подобным образом с шагом 1 мкм до максимального диаметра, затем по полученным значениям построена гистограмма распределения числа капель в зависимости от диаметра. Изученная эмульсия преимущественно содержит капли размером от 2 до 8 мкм.

С помощью реометра HAAKE MARS III сняты реологические кривые на прямом и обратном ходе (рис. 5). Прямой ход осуществлен увеличением вращения скорости деформации сдвига с малых значений (0,05 1/с) до больших (500 1/с) постепенно, обратный ход — с больших значений уменьшение скорости деформации сдвига до малых значений.

Реометр измеряет напряжение сдвига по силе тока в обмотке, кажущаяся вязкость вычисляется путем деления полученного значения τ на $\dot{\gamma}$, при малых скоростях деформации сдвига получа-

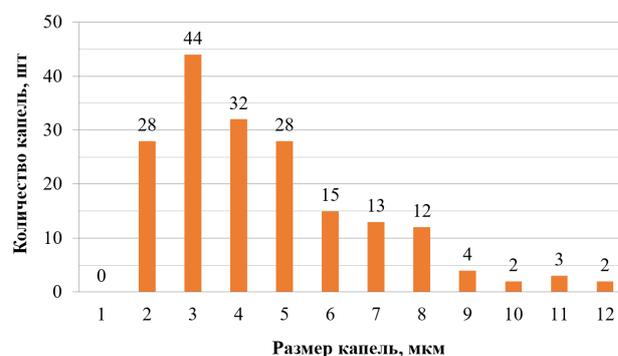


Рис. 4. Распределение капель по размерам

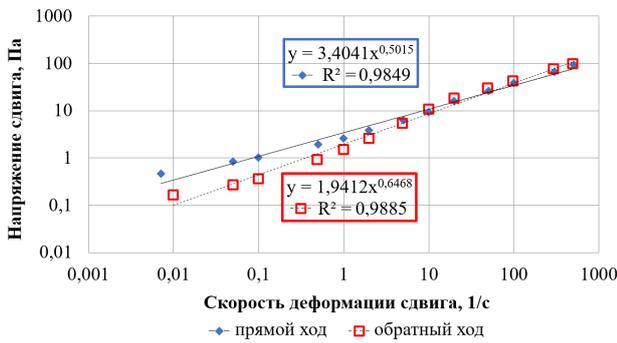


Рис. 5. Зависимость напряжения сдвига от скорости деформации сдвига, прямой и обратный ход (двойной логарифмический масштаб)

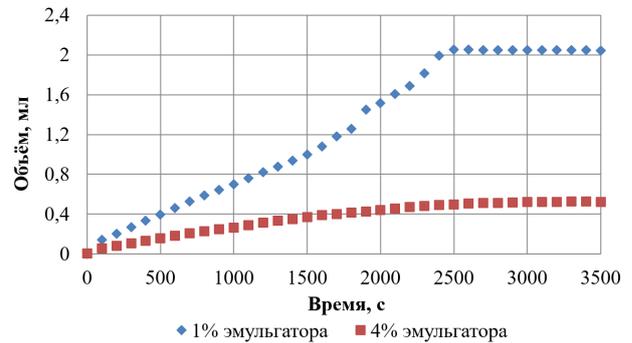


Рис. 6. Сравнение времени записания эмульсии с использованием Западно-Кочевненской нефти с разной концентрацией эмульгатора

ется деление типа «ноль на ноль», что вносит существенные ошибки в аппроксимационные кривые эффективной вязкости. Поэтому, при достаточно хорошей аппроксимации степенной функцией реологических кривых, эффективную вязкость нужно вычислять исходя из аналитического выражения $\tau = k\dot{\gamma}^n$. Таким образом, эффективную вязкость вычисляем по формуле $\mu = k\dot{\gamma}^{n-1}$, получаем значения $\mu = 3,4041\dot{\gamma}^{-0,4985}$ для прямого хода и $\mu = 1,9412\dot{\gamma}^{-0,3532}$ для обратного хода.

Эмульсия с содержанием 4% эмульгатора (рис. 3(б)) имеет размеры капель порядка 1 мкм, в то время как средний размер эмульсии с 1% эмульгатора составлял 3 мкм. Построив аналогичным образом (рис. 5) реологические кривые для эмульсии с содержанием эмульгатора 4% получили $\mu = 11,296\dot{\gamma}^{-0,5397}$ для прямого хода и $\mu = 10,189\dot{\gamma}^{-0,5033}$ для обратного хода.

Для сравнения эмульсий с эмульгатором концентрации 1% и 4% приводим отношения их вязкостей, используя показатели консистентности k и неньютоновского поведения n (из формулы $\tau = k\dot{\gamma}^n$), получаем выражение $\frac{\mu_2}{\mu_1} = \frac{k_2}{k_1}\dot{\gamma}^{n_2-n_1}$, откуда, подставив полученные значения для прямого хода, имеем $\frac{\mu_2}{\mu_1} = 3,32\dot{\gamma}^{-0,0412}$. Для $\dot{\gamma} = 1$ отношение вязкостей составит 3,32, для $\dot{\gamma} = 10$ — 3,02, для $\dot{\gamma} = 100$ — 2,74. Таким образом, сравнение эмульсий с концентрацией 1% и 4% эмульгатора показало, что вязкость эмульсии с 4% эмульгатора в 3 раза выше для прямого хода, для обратного хода отношение вязкостей будет около 5.

На рис. 6 представлено сравнение кривых записания эмульсии с использованием Западно-Кочевненской нефти с разной концентрацией эмульгатора, эксперимент проводился по схеме рис. 2.

Увеличение концентрации эмульгатора привело к уменьшению объема протекшей эмульсии до

записания, однако время наступления записания осталось примерно тем же.

При переходе в состояние «записания» движение в капилляре можно изучать с помощью микроскопа по последовательности видеокadres. На рис. 7 приведены кадры до и после наступления записания для эмульсии с 4% эмульгатора. Структура течения со временем существенно преобразовалась: в стационарном гидродинамическом потоке картина однородна (кадр 1), в состоянии «записания» наблюдалась перемежающаяся структура, на кадре 4 можно различить 3 составляющих: углеводородная — прозрачная, эмульсия — белая (за счет рассеивания света) и выделившаяся водная фаза — прозрачная, ограниченная менисками.

Из рис. 6 видно, что с ростом концентрации эмульгатора происходит уменьшение объема протекшей эмульсии. Одной из причин этого является более высокая вязкость эмульсии с 4% эмульгатора по сравнению с эмульсией с добавлением 1% эмульгатора.

Для изучения влияния частиц на характер записания были проведены эксперименты с эмульсиями содержащими частицы нитевидной формы (хризотил) и сферической формы (аэросил).

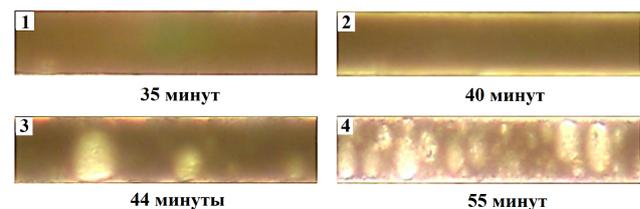


Рис. 7. Микровидеоизображения структуры течения эмульсии в цилиндрическом микроканале (диаметр 100 мкм) при перепаде давления 200 кПа

2.2. Эмульсии с хризотилом

Рассмотрим структуру асбеста. Плоскостные молекулы хризотилового асбеста имеют слоистую несимметричную структуру, вследствие чего они сворачиваются в очень тонкую трубочку. Диаметр такого «элементарного» игольчатого кристалла у хризотил-асбеста 10–30 нм, у крокидолита — 50–99 нм. Микроструктура асбеста — игольчатые кристаллы и их сростки. Товарный асбест представляет собой комплексы из сотен и тысяч соединенных вместе элементарных игольчатых кристаллов, имеющих поперечник около 0,1–0,5 мкм [7].

В ходе работ установлено, что при низкой концентрации эмульгатора (менее 1%) эмульсии с примесью хризотила являются нестойкими и разрушаются практически сразу после приготовления. В связи с этим эксперименты проводились на эмульсиях с высоким содержанием эмульгатора Девон 4в марка А (4%). Эмульсии с содержанием 4% эмульгатора и различной концентрацией хризотила (0,1%, 1%, 3%, 5%) изготавливались аналогично эмульсии с 4% эмульгатора; внешний вид полученных эмульсий в связи с низким процентным содержанием хризотила не отличался от внешнего вида аналогичной эмульсии с 4% эмульгатора.

С помощью реометра HAAKE MARS III получены реологическая кривая и кривая зависимости кажущейся вязкости от скорости сдвига на обратном ходе (рис. 8). Обратный ход вязкости значительно ниже прямого для всех измерений.

Вязкость эмульсии с 0,1% хризотила, согласно полученной зависимости (рис. 8), аналогична вязкости эмульсии без добавления хризотила. По сравнению с эмульсией с содержанием 0,1% хризотила, у эмульсии с 3% хризотила вязкость выше более чем в 2,5 раза и в полтора раза выше, чем у

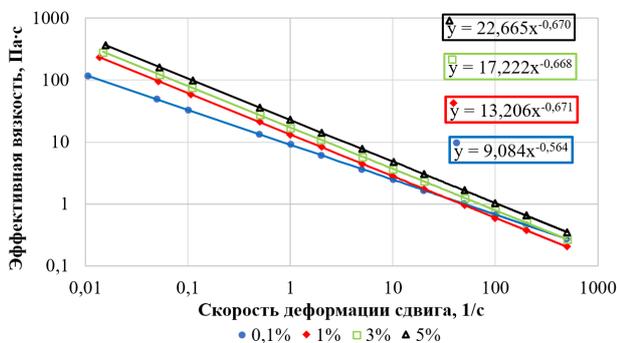


Рис. 8. Зависимость эффективной вязкости от скорости деформации сдвига для эмульсий с содержанием хризотила 0,1%, 1%, 3% и 5%, обратный ход (ось ординат — логарифмический масштаб)

эмульсии с содержанием 1% хризотила. Вязкость эмульсии с 5% хризотила оказалась более чем в 1,5 раза выше вязкости эмульсии с 3% хризотила на прямом ходе измерения и в 1,3 раза выше для обратного хода.

Гидродинамические эксперименты по течению в капиллярах проводились аналогично подразделу 2.1 на той же установке (рис. 2). На рис. 9 приведена расходная кривая — сравнение графиков записания эмульсий с различным содержанием хризотила. Для эмульсии с содержанием 4% эмульгатора и 1% хризотила замедление потока наступило за время около 15 секунд, далее шло уплотнение структуры. Поскольку масса протекшей эмульсии незначительна (2 мкг), то на графике видны неровности — колебания, связанные со сверхчувствительностью весов к малейшему изменению потоков воздуха. По сравнению с записанием эмульсии без добавления хризотила (рис. 6), где записание наступило лишь по истечении 3000 секунд, в данном случае (рис. 9) записание наступило уже за время менее 50 секунд, т.е. в 60 раз быстрее. Поскольку записание произошло достаточно быстро, микроструктура течения за это время изменилась несущественно, что отражено для эмульсии с содержанием 3% хризотила на рис. 10 (для эмульсий с другим содержанием хризотила картины аналогичные). Только спустя 10 минут начинает образовываться структура из деформированных микрокапель воды.

Из рис. 9 видно, что изменения концентрации хризотила уже до 1% достаточно для ускорения наступления записания. Дальнейшее увеличение концентрации до 3% не привело к существенному изменению объема и времени до наступления записания.

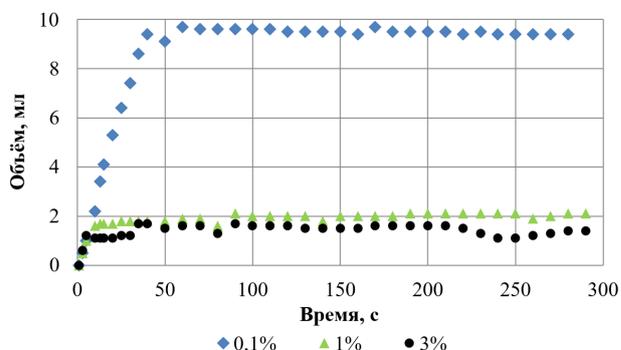


Рис. 9. Зависимость объема протекшей эмульсии (26% нефти и 70% воды) с использованием Западно-Кочевненской нефти с добавлением 4% эмульгатора от времени с различной концентрацией хризотила (0,1%, 1% и 3%)

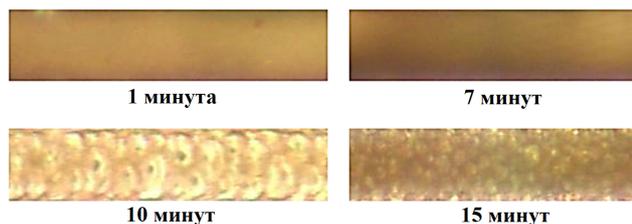


Рис. 10. Микровидеоизображения структуры течения эмульсии с 3% хризотила в цилиндрическом микроканале (диаметр 100 мкм) при перепаде давления 200 кПа

2.3. Течение эмульсии с хризотилом в модели трещины – ячейке Хеле–Шоу

Гидродинамические эксперименты в плоской модели проведены аналогично подразделу 2.1 на той же установке (рис. 2), только вместо капилляра использовалась ячейка Хеле–Шоу. При течении эмульсии без хризотила в ячейке Хеле–Шоу получили линейный график с расходом $Q = 5$ мкл/с. На рис. 11 приведены расходные кривые для эмульсий с 4% эмульгатора и с 0,1% и 5% хризотила.

Как и при течении в капилляре, для эмульсии с содержанием 5% хризотила время и объем протекшей эмульсии до запираания значительно меньше, чем у эмульсии с содержанием 0,1% хризотила. Объем протекшей эмульсии незначителен, запираание произошло уже вблизи входа в ячейку.

2.4. Эмульсии с аэросилом

«Аэросил» — одно из торговых наименований пирогенного коллоидного диоксида кремния, применяемого в различных областях техники. Аэросил представляет собой порошок из изотропных мелких частиц, с формой близкой к сферической. В настоящей работе использовался Aerosil R 202 — гидрофобный аэросил, обработанный силосаном, который используется при производстве силиконовых герметиков, клеев, покрытий на основе эпоксицидов и винилэфиров. Плотность $SiO_2 = 2,65$ г/см³, удельная площадь поверхности $S = 100 \pm 20$ м²/г. Для сферической формы частиц, используя площадь сферы, получаем: $d = 6m/\rho S$. Подставляя имеющиеся значения, получаем диаметр частиц аэросила $d = 23$ нм.

Эмульсия и способ ее приготовления использовался тот же (эмульгатор 4%), однако вместо хризотила добавили аэросил.

Сравнение полученных реологических зависимостей напряжений сдвига от скорости сдвига при различных концентрациях аэросила для прямого хода приведены на рис. 12, а на рис. 13 — сравнение

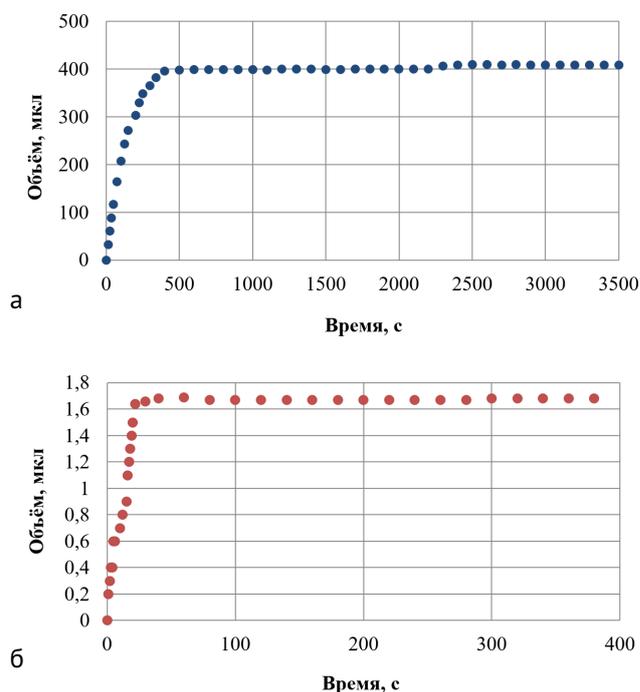


Рис. 11. Зависимость объема протекшей эмульсии (26% нефти, 70% воды) с использованием Западно-Кочевненской нефти с добавлением 4% эмульгатора от времени при концентрации 0,1% хризотила (а) и 5% хризотила (б)

зависимостей эффективной вязкости от скорости деформации сдвига для обратного хода.

По сравнению с эмульсией с содержанием аэросила 0,1%, вязкость эмульсии с 1% аэросила выше более чем в полтора раза, а у эмульсии с 3% аэросила вязкость еще в полтора раза выше. Из графиков (рис. 13) следует, что увеличение концентрации аэросила приводит к увеличению вязкости эмульсии. Сравнение прямого и обратного хода по-

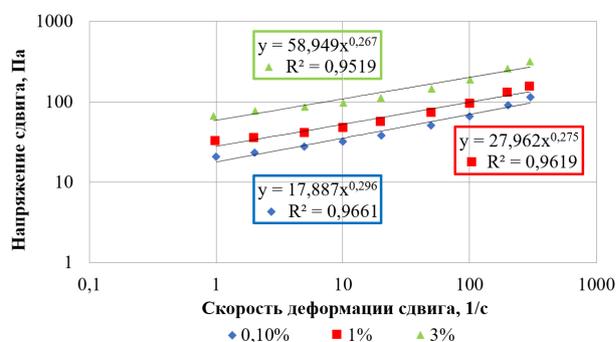


Рис. 12. Зависимость напряжения сдвига от скорости деформации сдвига для эмульсий с концентрацией аэросила 0,1%, 1% и 3%, прямой ход (двойной логарифмический масштаб)

казывает, что с увеличением концентрации аэросила разница обратного хода с прямым ходом становится все больше, при этом сам обратный ход ниже прямого.

2.5. Течение эмульсий с аэросилом в капилляре и ячейке Хеле–Шоу

Гидродинамические эксперименты по течению эмульсии в капилляре и ячейке Хеле–Шоу с различным содержанием аэросила проведены аналогично подразделу 2.1 на той же установке (рис. 2). Для удобства сравнения течения в капилляре при перепаде давления 200 кПа все графики эмульсий с концентраций аэросила 0,1%, 1% и 3%, а также эмульсии без аэросила представлены на одном рисунке (рис. 14).

Согласно полученным графикам (рис. 14) увеличение концентрации аэросила приводит к уменьшению объема протекшей эмульсии до записания и уменьшению времени наступления записания. Объем протекшей эмульсии до записания и время наступления записания на порядок больше, чем у эмульсии с добавлением хризотила (рис. 9).

Гидродинамические эксперименты по течению эмульсии в ячейке Хеле–Шоу с концентрациями 0,1% и 1% аэросила приведены на рис. 15. Согласно рис. 15 записание эмульсии с 0,1% аэросила в щели по истечении рассматриваемого времени так и не наступило, наклон кривой ($y = 2,1x$) не уменьшился. Поэтому принято решение провести эксперимент с более вязкой эмульсией с содержанием 1% хризотила. Начальный участок на рис. 15 связан с заполнением ячейки — движением воды, что видно на первых кадрах рис. 16, далее идет нефть и угол наклона расходной кривой уменьшается.

До наступления записания структура течения, согласно кадрам рис. 16, меняется незначительно. В отличие от эмульсии с содержанием 0,1% хризотила у эмульсии с 1% хризотила (рис. 15) угол наклона кривой меняется уже по прошествии 250 секунд, что свидетельствует о замедлении скорости течения и начале процессов, приводящих к записанию.

3. Заключение

Изучены реологические свойства обратных водонефтяных эмульсий, приготовленных из нефти, минерализованной воды Западно-Кочевненского месторождения и эмульгатора Девон 4в марка А; проведено сравнительное изучение при добавлении хризотила и аэросила различной весовой концентрации. Изучено течение в капиллярах и в модели трещины (ячейка Хеле–Шоу), а также проявление эффекта динамического записания для трех

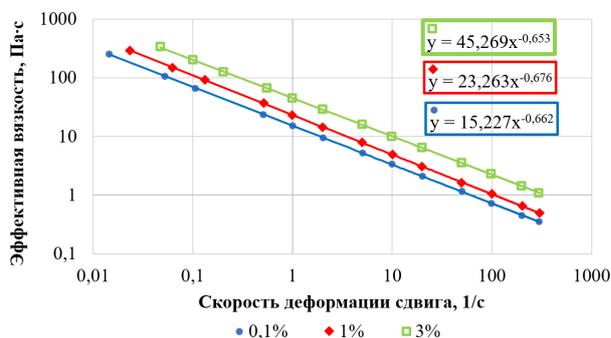


Рис. 13. Зависимость эффективной вязкости от скорости деформации сдвига для эмульсий с содержанием аэросила 0,1%, 1% и 3%, обратный ход (двойной логарифмический масштаб)

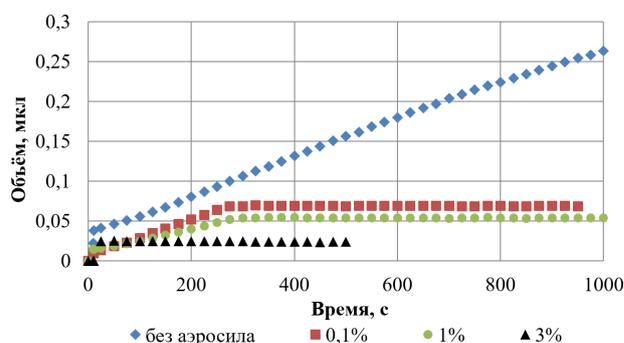


Рис. 14. Зависимость объема протекшей эмульсии (26% нефти и 70% воды) с использованием Западно-Кочевненской нефти с добавлением 4% эмульгатора от времени с различной концентрацией аэросила

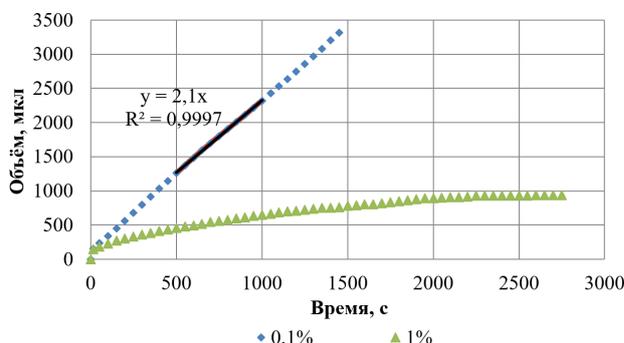


Рис. 15. Зависимость объема протекшей эмульсии (26% нефти 70% воды) с использованием Западно-Кочевненской нефти с добавлением 4% эмульгатора от времени при концентрации 0,1% и 1% аэросила

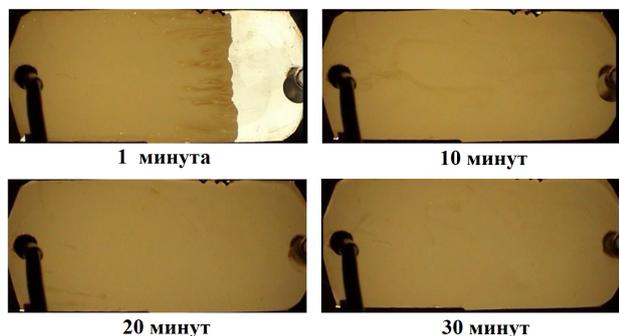


Рис. 16. Микровидеоизображения структуры течения эмульсии с содержанием 1% аэросила в ячейке Хеле–Шоу при перепаде давления 200 кПа

типов эмульсий: инвертной эмульсии, эмульсии с аэросилом и эмульсии с анизотропным включением — хризотилом.

При измерении реологических параметров системой конус–пластина установлено:

1. Реологические кривые с хорошей степенью достоверности описываются степенной функцией, что соответствует модели жидкости Оствальда–де Ваале. Прохождение кривой обратного хода ниже кривой прямого хода, что объясняется меньшей устойчивостью эмульсии с крупными каплями, часть из которых в сдвиговом потоке коалесцирует, эмульсия становится крупнодисперсной и менее вязкой, что характерно для малых концентраций эмульгатора. При больших концентрациях микрокапли практически не коалесцируют и эмульсия более устойчива.
2. Увеличение концентрации эмульгатора от 1% до 4% приводит к уменьшению размеров микрокапель от 5 мкм до 1 мкм и увеличению эффективной вязкости (например, в диапазоне скорости деформации сдвига 0,1–100 они отличаются в 3 раза).
3. Добавление нанопорошков приводит к возрастанию вязкости эмульсии. Изменение концентрации хризотила от 0,1% до 5% увеличивает вязкость более чем в 3 раза, а концентрации аэросила от 0,1% до 3% — в 3 раза.
4. С изотропными наночастицами аэросила эмульсия устойчива, прямой и обратный ход мало отличаются. С хризотилом частицы анизотропные, прямой и обратный ход отличаются существенно, это связано с тем, что по мере вращения конуса в сдвиговом течении частицы хризотила выстраиваются вдоль линий тока, что приводит к снижению реологической кривой.

Изучение эффекта динамического запирания показало:

1. Увеличение содержания изотропных и анизотропных частиц привело, помимо увеличения вязкости, к уменьшению времени наступления динамического запирания.
2. При одинаковом процентном содержании частиц у эмульсий, содержащих хризотил, время наступления запирания и объем протекшей эмульсии до запирания на порядок меньше, чем у эмульсий с содержанием аэросила. Однако при этом вязкость эмульсии с аэросилом даже выше, чем у аналогичной эмульсии с хризотилом. Это можно объяснить тем, что хризотил — анизотропный порошок со специфическим строением.

Полученные в ходе экспериментальных исследований результаты позволяют сделать вывод, что использование обратных водонефтяных эмульсий, содержащих твердые включения, эффективно для глушения скважин в трещиноватых породах. Компоненты, используемые в приготовлении эмульсий, зачастую доступны на месторождениях (реагенты на основе нефти, вода, эмульгаторы), что помогает снизить себестоимость ремонтных работ.

Список литературы

- [1] Петров Н.А., Соловьев А.Я., Султанов В.Г., Кротов С.А., Давыдова И.Н. Эмульсионные растворы в нефтегазовых процессах. М.: Химия, 2008. 440 с.
- [2] Ахметов А.Т., Телин А.Г., Мавлетов М.В., Здольник С.Е. Новые принципы применения обратных водонефтяных эмульсий в потокоотклоняющих технологиях и глушении скважин // Нефтегазовое дело. 2005. № 3. С. 19–26. (DOI: 10.17122/ngdelo-2005-0-119-126)
- [3] Ахметов А.Т., Саметов С.П., Рахимов А.А., Латыпова Д.Р., Ханова М.Д., Докичев В.А. Эффект динамического запирания инвертно эмульсионных растворов на основе эмульгатора-стабилизатора обратных эмульсий СЭТ-1 // Нефтегазовое дело. 2013. Т. 11, № 2. С. 64–70. (DOI: 10.17122/ngdelo-2013-2-64-70)
- [4] Akhmetov A.T., Mavletov M.V., Rakhimov A.A., Sametov S.P., Akhatov I.Sh. Water-hydrocarbon emulsion flow in microchannels // ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers. 2011. С. 181–188. (DOI: 10.1115/IMECE2011-62927)
- [5] Alfir T., Akhmetov, Marat V., Mavletov, Sergey P., Sametov, Artur A., Rakhimov, Azat A., Valiev, Iskander S., Akhatov. Dispersion Flow In Microchannels // Proceedings of ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition. IMECE2012. 2012. Houston. 8 p. (DOI: 10.1115/IMECE2012-86618)
- [6] Рахимов А.А. Проявление неустойчивости при течении инвертных эмульсий в микроканалах // Вестник Башкирского университета. 2013. Т. 18. № 3. С. 668–673. (<http://bulletin-bsu.com/archive/2013/3/7/>)
- [7] Интернет-источник по описанию хризотила: <http://biofile.ru/geo/23503.html> (дата обращения 7 ноября 2018 г.)



Study of the effect of dynamic blocking of emulsions containing solid inclusions

Rakhimov A.A. *, Akhmetov A.T.**, Valiev A.A. *, Asadullin R.R.***

*Mavlutov Institute of Mechanics, UFRS RAS, Ufa

**Ufa State Petroleum Technological University, Ufa

***LLC "Ufa Scientific and Technical Center", Ufa

The paper presents the results of experimental studies of the flow of stabilized water-oil emulsions prepared from oil and formation water from the wells of the West Kochevne field, as well as with the presence of chrysotile and aerosil in cylindrical and flat capillaries (in the crack patterns). The effect of dynamic blocking has been discovered, which consists in the fact that in sections of capillaries and in a model of cracks, with a constant pressure drop, the flow of reverse oil-water emulsions stops with time. An increase in the content of isotropic and anisotropic particles led to an increase in the viscosity of the emulsion and a decrease in the time of onset of dynamic blocking. With the same percentage of particles in emulsions containing chrysotile, the time of onset of blocking and the volume of leaked emulsion before blocking is an order of magnitude less than that of emulsions containing aerosil. However, in this case, the viscosity of the emulsion with aerosil is even higher than that of a similar emulsion with chrysotile.

Keywords: dispersion, emulsion, capillary, Hele–Show cell, dynamic blocking