



УДК 532.546; 533.15

ИЗУЧЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДОНАБУХАЮЩЕГО ПОЛИАКРИЛАМИДА МАРКИ FS 305 ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЙ ВОДОИЗОЛЯЦИОННЫХ РАБОТ НА НЕФТЯНЫХ СКВАЖИНАХ¹

А. Г. Телин, Т. И. Зайнетдинов, М. Э. Хлебникова

Институт механики УНЦ РАН, Уфа

Аннотация. Предложено применение ограничено набухающих полимеров на основе полиакриламида в водоизоляционных работах на нефтяных скважинах. Обсуждается реологическое поведение сложных многофазных систем, сочетающих в себе свойства полимерных растворов, микрогелевых структур и дисперсий. Подробно описываются методика и результаты исследований реологических свойств суспензий суперабсорбента FS 305.

Ключевые слова: Водоизоляция, реология, фильтрация, дисперсность, гель, реометр, релаксация, вязкость, суперабсорбент

1 Задачи исследований

Одним из перспективных направлений развития полимерных технологий в процессах нефтедобычи являются водоизоляционные работы по фонду добывающих скважин. В частности, использование полимеров — производных акриламида позволяет получать системы с широким спектром реологических и фильтрационных характеристик [1, 2, 3].

Связь реологических свойств жидкостей и их фильтрационного поведения в пористой среде очевидна, однако в настоящий момент недостаточно изучена. В этом отношении ограничено набухающие полимеры, в том числе суперабсорбенты, представляют собой особый интерес. Дело в том, что

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 02-01-97904)

они представляют сравнительно новый класс систем, сочетающий в себе свойства жидкостей и дисперсных систем. Набухшая частица полимера, являющегося суперабсорбентом воды, может быть представлена как гель сшитого полимера с вязкоупругими свойствами; дисперсия такого полимера во многих случаях может рассматриваться как суспензия (дисперсная фаза — твердое тело, дисперсионная среда — жидкость). Исходя из вышеизложенного, при рассмотрении процесса фильтрации дисперсий ограничено набухающих полимеров можно выделить ряд ключевых факторов — концентрация, дисперсность, реологическое поведение.

Применительно к водоизоляции на передний план выходят вязкоупругие свойства жидкостей, поскольку изолирующая способность напрямую связана с упругостью. С одной стороны, система для водоизоляции должна проникать в трещины и крупные поры в призабойной зоне пласта (ПЗП); с другой стороны, при депрессии на пласт необходимо, чтобы система была иммобилизована, неподвижна (в противном случае обработка будет нерезультативной или эффект от нее окажется непродолжительным). Очевидно, что даже высокая вязкость жидкости еще не может обеспечить ее неподвижности, поскольку при наличии градиента давления жидкость будет двигаться в поле механических сил, хотя и с малой скоростью.

Жидкости, представляющие собой эластичные гели, могут быть высокоэффективны при условии, что упругие свойства геля обеспечивают его неподвижность при существующих в ПЗП добывающих скважин градиентах давлений. Традиционные объемные гели, однако, отличаются высокой «объемной» вязкостью, из-за чего требуется прилагать значительное количество энергии на закачку; кроме того, значительная часть энергии тратится на диспергирование геля до капиллярных размеров. В этом смысле дисперсные системы с гелевой дисперсной фазой представляются весьма перспективными. Во-первых, можно увеличить «закачиваемость» системы, создавая дисперсию гелевых частиц, размеры которых сопоставимы с размерами трещин или пор. Во-вторых, можно использовать низкоконцентрированные дисперсии, которые будут иметь сравнительно низкую вязкость. В-третьих, малая «объемная» вязкость позволяет использовать более жесткие (сильнее сшитые) гели, что увеличивает эффективность изоляции. Наконец, высокая чувствительность сшитых систем к свойствам растворителя позволяет регулировать дисперсность в процессе обработки ПЗП — например, закачивается мелкодисперсная суспензия ограничено набухающего полимера в углеводородном растворителе; после закачки растворитель отмывается поступающей из пласта водой; полимер набухает, увеличиваясь в размерах, и «запирает» водопроводящие поры и трещины.

2 Методика исследований

Оборудование

Исследования реологических свойств проводились на реометре *Carry-Med CSL²* производства компании *TA Instruments*. Данное оборудование представляет собой аппаратно-программный комплекс, состоящий из измерительного устройства (ротационный вискозиметр) с цифровым интерфейсом и персонального компьютера, снабженного программным обеспечением для управления измерительным устройством и обработки данных экспериментов. Предусмотрено использование воспринимающих элементов типа «конус–плоскость» или «плоскость–плоскость». В нашем случае применялась система «конус–плоскость» (Рис. 1) следующей геометрии: диаметр конуса $2r$ — 60 мм, угол α — 2° , зазор между конусом и плоскостью — 55 мкм.

При такой геометрии градиент скорости сдвига ($\dot{\gamma}$) и напряжение сдвига (σ) выражаются следующим образом [4]:

$$\dot{\gamma} = \frac{\omega}{\alpha}, \quad \sigma = \frac{3f}{2\pi r^3},$$

где ω — угловая скорость (рад/с); α — угол между конусом и плоскостью (см. Рис. 1); f — момент силы (Н·м); r — радиус конуса.

Вращение вала осуществляется с помощью турбины низкого трения, питаемой сжатым воздухом. Для установки зазора между воспринимающими элементами прибор снабжен высокоточным автоматическим микрометром. Предусмотрено термостатирование исследуемого образца.

Реометр позволяет осуществлять определения разнообразных реологических характеристик жидкостей, используя три основных вида испытаний — сдвиговой тест, осцилляторный тест и тест «ползучести». В первом из них определяется зависимость напряжения сдвига (вязкость) — скорость сдвига. При этом имеется возможность осуществлять измерения на заданном диапазоне напряжений сдвига или скоростей сдвига. Измерения можно осуществлять от малых нагрузок к большим и наоборот, а также совместно (петля гистерезиса).

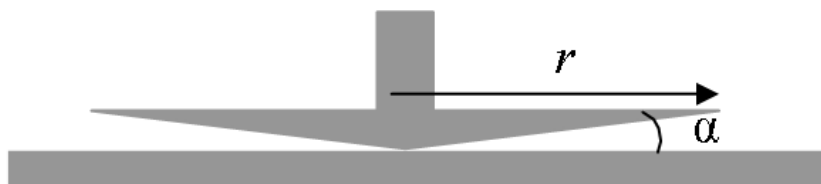


Рис. 1. Воспринимающий элемент типа «конус–плоскость», применяемый для исследования реологических свойств

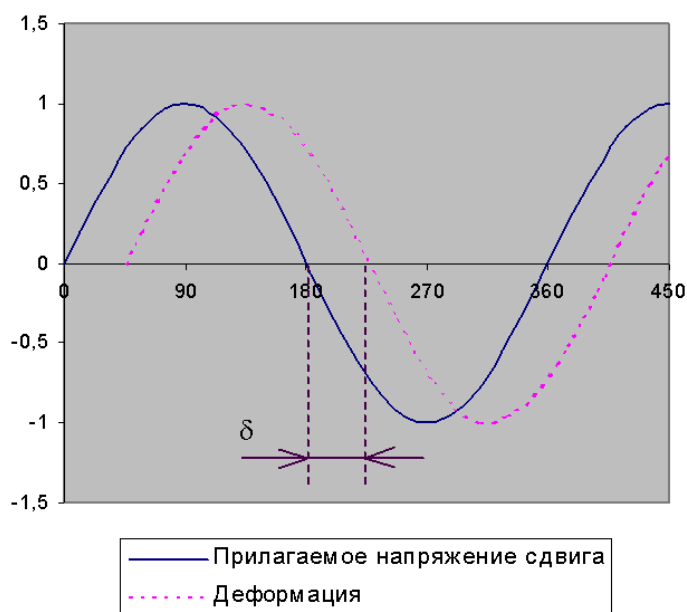


Рис. 2. Регистрируемая деформация образца в зависимости от прилагаемого напряжения сдвига

Результаты двух других тестов позволяют охарактеризовать упругость исследуемых систем. Тест «ползучести» в большей степени подходит для исследования упруговязких систем (тело Фойгта). В настоящей работе применялся только осцилляторный тест, на теоретических основах которого мы остановимся подробнее.

Осцилляторный тест

В данном тесте прикладываемая к образцу нагрузка (напряжение сдвига) переменна и изменяется по синусоиде. Иначе говоря, подвижный воспринимающий элемент прибора (конус) осуществляет вращательные колебания подобно колебаниям маятника. Амплитуда колебаний при этом пропорциональна приложенному напряжению сдвига (для вращательного движения в качестве силовой характеристики часто используют также такой параметр, как момент силы f , Н·м). Регистрируемая при этом деформация образца должна также изменяться по синусоидальному закону, однако с некоторым запаздыванием на фазовый угол δ (Рис. 2). Величина δ дает информацию о характере течения жидкости. Очевидно, что для чисто упругой системы $\delta = 0$, то есть две кривые накладываются (поскольку время релаксации $t = \eta/G \rightarrow 0$). Для чисто вязкой жидкости $\delta = 90^\circ (t = \eta/G \rightarrow \infty)$. Вообще фазовый угол не может превышать 90° , в противном случае окажется, что нагрузка прикладывается в одном

направлении, а система движется в другом. Таким образом, для вязкоупругих жидкостей δ лежит в диапазоне $0 - 90^\circ$.

Достоинством осцилляторного теста является возможность неdestructивного анализа различных структур в образце (например, сшивок в полимерных гелях). Изменение частоты колебаний позволяет получить отклик от структурных элементов разного масштаба, когда их характеристические времена релаксации будут соответствовать скорости изменения напряжения сдвига (которая зависит от частоты). Например, в типичном образце проявляются характеристические времена, связанные с удлинением и вращением межмолекулярных связей, соответствующие частотам порядка МГц и выше; с другой стороны, удлинение и изгиб макромолекул проявляют себя при низких частотах колебаний (Гц). В этом смысле удобно представить осцилляторную реометрию как механический аналог оптической или электромагнитной спектроскопии. В обоих случаях производится сравнение приложенного сигнала и отклика, однако в нашем случае вместо абсорбции наблюдается фазовый сдвиг.

Следует отметить, что отклик системы может отличаться от синусоиды или быть сильно искаженным (подобно шумам). Искажения возникают в результате протекания в образце механических процессов, описываемых нелинейными соотношениями. Искаженный сигнал практически невозможно корректно интерпретировать, поэтому ценность представляют только процессы, протекающие в диапазоне линейной упругости изучаемой системы, когда деформация прямо пропорциональна приложенному напряжению ($\sigma = G\gamma$). Данный факт приводит к необходимости определения режима измерений (частота колебаний, момент силы), при котором выполняется условие линейной вязкоупругости. Экспериментально установлено, что для растворов полиакриламида в области концентраций 0,01–1% приемлемы следующие параметры эксперимента — частота колебаний 1 Гц, момент силы от 5 до 100 мН·м. Диапазон линейной вязкоупругости может рассматриваться в рамках модели Максвелла [5]:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-t/\frac{\eta}{G}), \quad (1)$$

где σ_0 — начальное приложенное напряжение сдвига; G — модуль сдвиговой упругости; η — вязкость; $\eta/G = t_p$ — время релаксации.

Однако в общем случае G и η оказываются не постоянными, а функциями от прилагаемой нагрузки. Поэтому, в данном методе получают зависимости G от момента f .

Известно, что при деформации упругой системы в ней возникают напряжения, направленные по нормали к направлению приложенной силы. Примером может служить деформация куска резины — если его вытягивать, то вследствие возникающих нормальных напряжений его поперечное

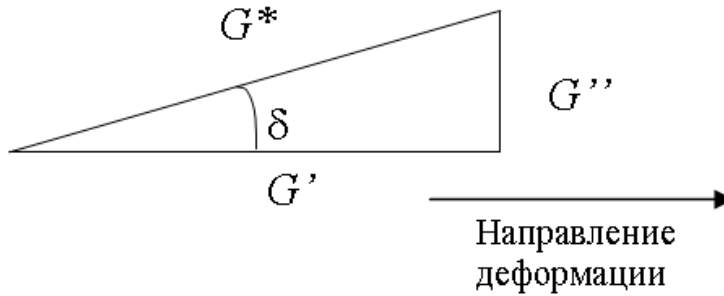


Рис. 3. Связь модуля накопления и модуля потерь с комплексным модулем и фазовым углом

сечение уменьшается. Таким образом, необходимо учитывать направление возникающих в системе напряжений.

В связи с вышеизложенным, модуль сдвиговой упругости рассматривается как комплексное число

$$G^* = G' + iG'',$$

где G^* — комплексный модуль сдвига; G' — модуль накопления; G'' — модуль потерь.

Связь трех модулей можно прояснить с помощью Рис. 3.

Наиболее важной характеристикой в данном случае является модуль накопления G' , связанный с деформацией упругих структурных элементов в образце. Энергия запасается в этих элементах при удлинении под нагрузкой и высвобождается при снятии или снижении нагрузки (релаксация). Вязкие элементы не могут запастись приложенную к ним энергию и она всегда рассеивается при деформации. Таким образом, модуль потерь G'' характеризует диссипацию энергии.

Из Рис. 3 следует, что модуль накопления и модуль потерь связаны с комплексным модулем и фазовым углом δ через тригонометрические функции косинуса и синуса, что позволяет вычислять их по экспериментально определяемым значениям G^* и δ .

Проанализируем изменение δ , G' и G'' при постоянном значении G^* . Увеличение G' приводит к уменьшению G'' и δ ; это означает, что система становится в большей степени эластичной, и в пределе $\delta = 0$, $G^* = G'$ (чистый эластик); напротив, при $\delta \rightarrow 90^\circ$, $G' \rightarrow 0$ система не обладает эластичностью.

Модуль потерь G'' , в свою очередь, связан с динамической вязкостью системы следующим соотношением:

$$\eta' = G''/\omega,$$

где η' — динамическая вязкость; ω' — угловая скорость, рад/с.

Вязкость системы может быть представлена таким же образом, как и модуль сдвиговой упругости:

$$\eta^* = \eta' + i\eta'',$$

где η^* — комплексная вязкость; η' — динамическая вязкость; η'' — внефазовая компонента комплексной вязкости.

В данном случае первый член характеризует вязкую деформацию системы, а второй — упругую.

Модуль накопления G' , очевидно, связан с внефазовой компонентой комплексной вязкости

$$\eta'' = G'/\omega.$$

Итак, на основе осцилляторных тестов удастся получить следующее описание реологических свойств системы: экспериментально определяются комплексный модуль сдвига ($G^* = \tau/\gamma$) и фазовый угол δ . Из этих параметров удастся получить модуль накопления G' , модуль потерь G'' и компоненты комплексной вязкости. Все эти параметры могут быть определены при разной частоте колебаний и приложенной нагрузке.

3 Результаты исследований

В настоящей работе были изучены реологические свойства суспензий суперабсорбента FS 305. Данный продукт представляет собой ограничено набухающий полимер на основе полиакриламида, выпускается в виде мелкодисперсного порошка.

Для исследования реологических свойств дисперсий FS 305 были приготовлены дисперсии суперабсорбента с концентрацией от 1 до 20 г/л на водах с минерализацией 0,1 и 20 г/л (NaCl). Сразу было установлено, что системы с концентрацией FS 305 ниже 2,5 г/л не обладают седиментационной устойчивостью, поэтому инструментальное исследование этих систем не производилось.

Необходимо отметить что, анализируя результаты измерений, надо отчетливо представлять ограничения применимости методов ротационной вискозиметрии для исследований дисперсий ограничено набухающих полимеров. Дело в том, что размеры частиц геля сопоставимы с размером зазора между воспринимающими элементами реометра и при определенных условиях могут оказаться меньше, чем размеры зазора. Если при этом концентрация полимера настолько низка, что частицы геля не контактируют между собой, то реометр практически не «чувствует» их присутствия и измеряет только свойства дисперсионной среды. Если размеры частиц меньше размера зазора, но концентрация полимера достаточно высока, и

полученная дисперсия связнодисперсная, то значительный вклад в измеряемые параметры вносят разного рода взаимодействия между частицами (механический контакт, адгезия и т.д.). В данном случае сложно определить какой вклад вносит взаимодействие частиц, а какой — структура самого геля в эффективную (кажущуюся) вязкость. Здесь может быть полезна аналогия с концентрированными глинистыми суспензиями, в которых при превышении некоторой концентрации твердой фазы значительно изменяются реологические свойства. Однако такой подход применим только тогда, когда частицы можно считать «твердыми» по сравнению с дисперсионной средой при высокой эластичности самого геля.

Возможен и другой случай, когда размеры набухших частиц превышают размеры зазора между воспринимающими элементами измерительного устройства. Частицы оказываются сжатыми между поверхностями воспринимающих элементов и в результате измеряются преимущественно напряжения, возникающие в частицах полимера. При этом надо учитывать, что в предварительно деформированных (сжатых) частицах уже запасена упругая энергия, а значит результаты измерений будут искажены. Кроме того, необходимо учесть, что только часть поверхности конуса и плоскости будет находиться в контакте с крупными частицами, что также исказит результаты.

Подтверждением вышеизложенного служит зависимость, приведенная на Рис. 4. Изменение концентрации полимера FS 305 в минерализованной воде в два раза (с 20 до 10 г/л) приводит к снижению модуля накопления G' на два и более порядка — от 60–100 Па до десятых и даже сотых долей Па. Если учесть, что реологические свойства набухшего полимера, из которого состоят частицы, не могли значительно измениться при разбавлении, объяснить такое падение наблюдаемой эластичности можно только дисперсной природой системы. Очевидно, что при концентрации 10 г/л в воде минерализацией 20 г/л частицы геля мало контактируют между собой, и дисперсия представляет собой свободнодисперсную систему, а прибор «воспринимает» в большей степени дисперсионную среду. При увеличении концентрации до 20 г/л частицы оказываются принудительно сближены, что приводит к увеличению числа контактов и резкому росту механического сопротивления при деформации. По-видимому, частицы суперабсорбента обладают весьма высокой упругостью и механической прочностью за счет сильной сшивки макромолекул полимера.

Характер течения можно также оценить с помощью Рис. 5, на котором представлены зависимости фазового угла от приложенного момента f . Как видно из Рисунка, для дисперсии при 20 г/л фазовый угол составляет около 20° , что говорит о преобладании упругой деформации; напротив, при концентрации 10 г/л угол Δ достигает 70° , что соответствует преобладанию вязкого течения. Резкое увеличение Δ при росте приложенного

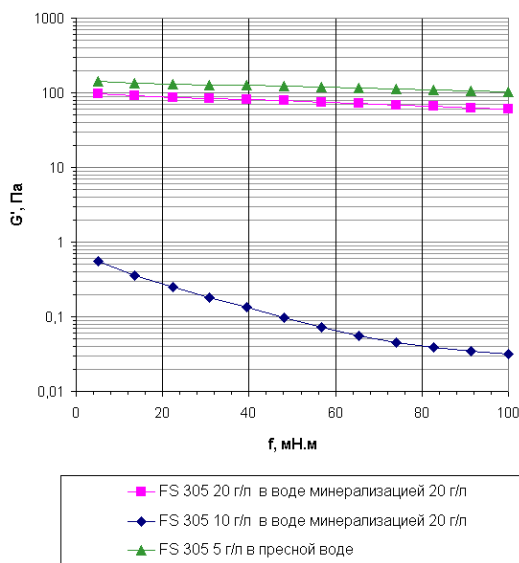


Рис. 4. Зависимость модуля накопления G' от приложенного момента f для дисперсий FS 305 в пресной и минерализованной воде

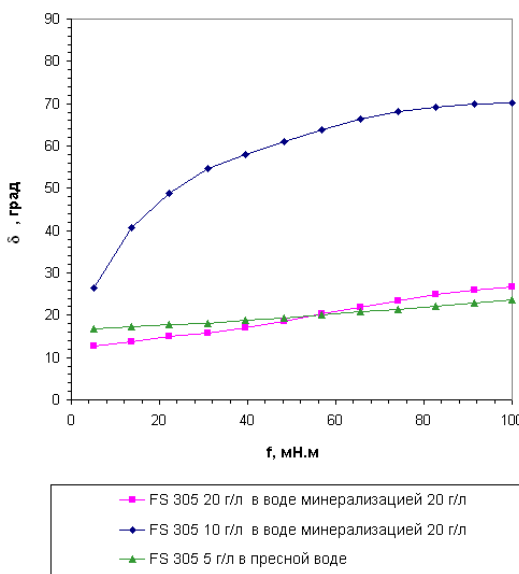


Рис. 5. Зависимость фазового угла δ от приложенного момента f для дисперсий FS 305 в пресной и минерализованной воде

момента для дисперсии 10 г/л можно объяснить наличием слабого взаимодействия между частицами. При малых деформациях в системе имеется структура (естественно, обладающая некоторой прочностью и способностью к упругой деформации), которая легко разрушается при увеличении нагрузки.

Результаты сдвиговых тестов, приведенные на Рис. 6–7, можно объяснить с тех же позиций. Дисперсия концентрацией 10 г/л обладает очень низкой вязкостью, намного меньшей, чем дисперсия концентрацией 20 г/л. При этом более концентрированная дисперсия демонстрирует сильное отклонение от ньютоновского течения (в соответствии с моделью Гершеля–Балкли), тогда как поведение менее концентрированной дисперсии удовлетворительно описывается линейной зависимостью. Оценка динамической вязкости для 10 г/л дисперсии приводит при этом к значению 5 мПа·с, то есть система обладает вязкостью того же порядка, что и дисперсионная среда.

Сравнение результатов, полученных на системах, приготовленных в пресной воде и растворе NaCl концентрацией 20 г/л, показало, что минерализация оказывает очень сильное влияние на реологические свойства дисперсий. Это связано с чувствительностью суперабсорбентов к ионной силе растворителя — абсорбция (степень набухания) достигает максимального значения в дистиллированной воде и быстро снижается при увеличении содержания солей. Чем слабее набухают частицы суперабсорбента, тем меньше их размеры и выше плотность. Следовательно, при равной массовой концентрации дисперсная фаза полимера в соленой воде будет иметь меньшую объемную концентрацию и удельную поверхность. Если рассматривать такие системы, как суспензии, то увеличение минерализации воды будет до некоторой степени эквивалентно одновременному диспергированию и снижению концентрации дисперсной фазы.

Зависимости, приведенные на Рис. 4–7, позволяют убедиться в справедливости сделанных предположений о влиянии минерализации воды на свойства дисперсий. Оказалось, что дисперсия FS 305 концентрацией 20 г/л в минерализованной воде ведет себя практически также, как дисперсия концентрацией 5 г/л — в пресной.

Увеличение плотности частиц при уменьшении степени набухания также понижает седиментационную устойчивость дисперсий. Хотя в соленой воде размеры частиц уменьшаются, такой фактор стабилизации как броуновское движение, не оказывает существенного влияния, поскольку размеры частиц находятся в диапазоне грубой дисперсности (десятки и сотни мкм). В результате дисперсии FS 305 теряют устойчивость в соленой воде при концентрации 5 г/л, тогда как в пресной воде — при концентрации ниже 2,5 г/л.

Была предпринята попытка улучшения седиментационной устойчиво-

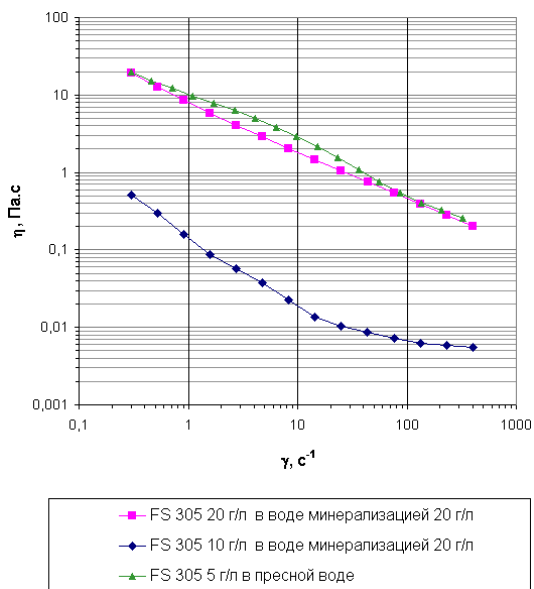


Рис. 6. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига для дисперсий FS 305 в минерализованной воде

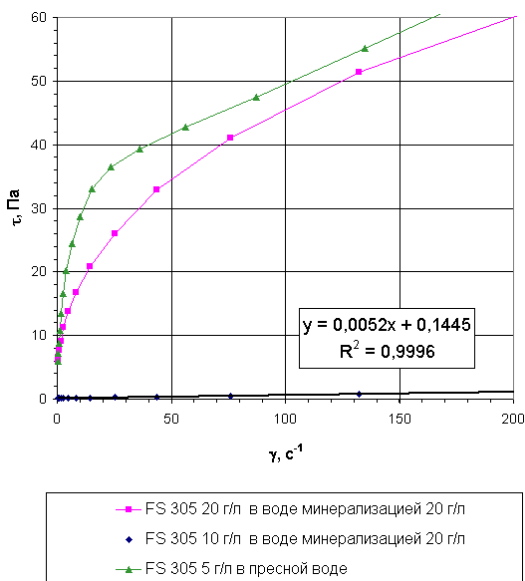


Рис. 7. Зависимость напряжения от скорости сдвига для дисперсий FS 305 в минерализованной воде

сти и реологических свойств дисперсий суперабсорбента FS 305 путем добавки полиакриламида линейного строения (SEDIPUR AF 205 производства BASF). За счет увеличения вязкости дисперсионной среды в этом случае снижается скорость осаждения диспергированных частиц. Одновременно могут улучшаться реологические свойства дисперсии за счет флокулирующего действия полиакриламида.

Результаты исследований систем с добавкой полимера SEDIPUR приведены на Рис. 8–16. На Рис. 8–10 показано влияние концентрации FS 305 на вязкость и упругость дисперсий в минерализованной воде. На Рис. 11–13 показан эффект улучшения реологических свойств дисперсии FS 305 в минерализованной воде за счет добавки SEDIPUR. На Рис. 14–16 приводится сравнение реологических свойств дисперсий в растворах SEDIPUR на пресной и минерализованной воде.

На основе приведенных результатов можно сделать следующие выводы:

1. При низкой концентрации суперабсорбента (5 г/л в минерализованной воде) влияние добавки линейного полиакриламида на реологические свойства практически незаметно. При этом существенно повышается седиментационная устойчивость дисперсии, однако система остается свободно-дисперсной, и прибор измеряет преимущественно вязкость дисперсионной среды.

2. При более высокой концентрации FS 305 (10 г/л в минерализованной воде) добавка линейного полиакриламида позволяет примерно в два раза повысить модуль накопления G' и вязкость дисперсии. Увеличение этих параметров неаддитивно (то есть G' для смесевой системы выше, чем сумма G' раствора SEDIPUR и дисперсии FS 305 по отдельности), что говорит о структурообразовании за счет флокулирующих свойств полиакриламида.

3. При использовании пресной воды в качестве растворителя удается достичь высоких значений модуля накопления и вязкости при значительно меньшей концентрации суперабсорбента. По-видимому, в пресной воде эффект структурирования при добавке линейного полиакриламида проявляется в большей степени, чем в минерализованной воде.

4. В промышленном масштабе рекомендуется готовить дисперсии на воде с минерализацией не более 20 г/л. При этом желательны достаточно высокие дозировки суперабсорбента (0,5–1 % и выше).

Наблюдаемое влияние минерализации на степень набухания суперабсорбента FS 305 и реологические свойства его дисперсий позволяет предложить вариант технологии изоляции водонасыщенных зон в призабойной зоне добывающих скважин без использования углеводородных растворителей. Предлагается закачивать дисперсию FS 305 с добавкой SEDIPUR в воде минерализацией выше пластовой. При этом набухание суперабсорбен-

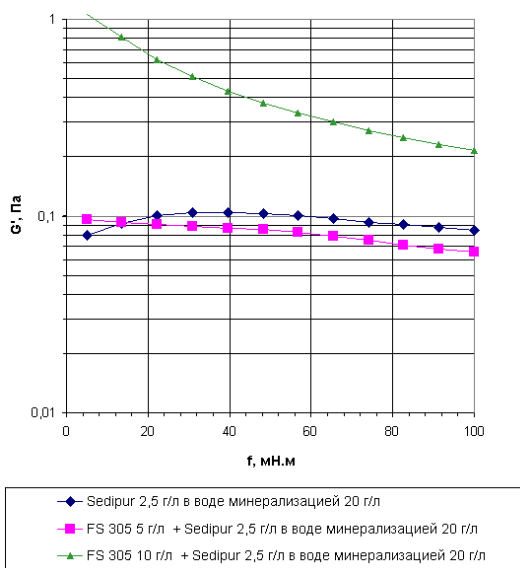


Рис. 8. Зависимость модуля накопления G' от приложенного момента f для растворов SEDIPUR (2,5 г/л) и смеси SEDIPUR (2,5 г/л) с FS 305 (5 и 10 г/л) в минерализованной воде

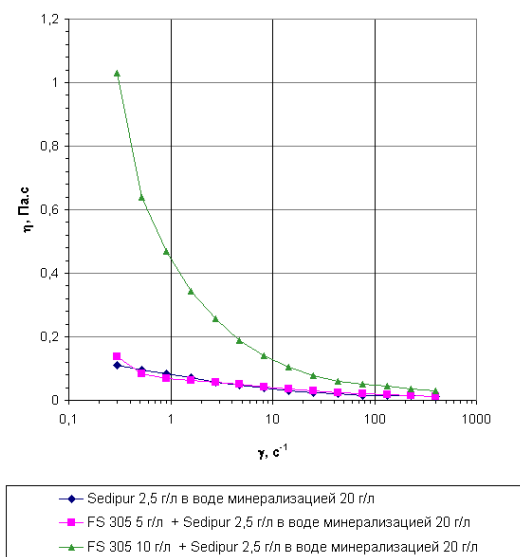


Рис. 9. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига для растворов SEDIPUR (2,5 г/л) и смеси SEDIPUR (2,5 г/л) с FS 305 (5 и 10 г/л) в минерализованной воде

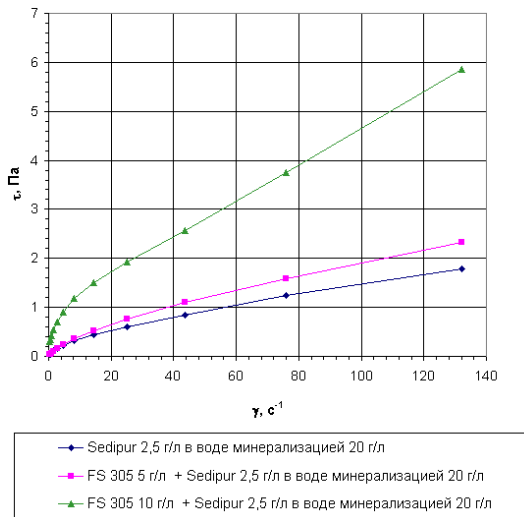


Рис. 10. Зависимость напряжения от скорости сдвига для растворов SEDIPUR (2,5 г/л) и смеси SEDIPUR (2,5 г/л) с FS 305 (5 и 10 г/л) в минерализованной воде

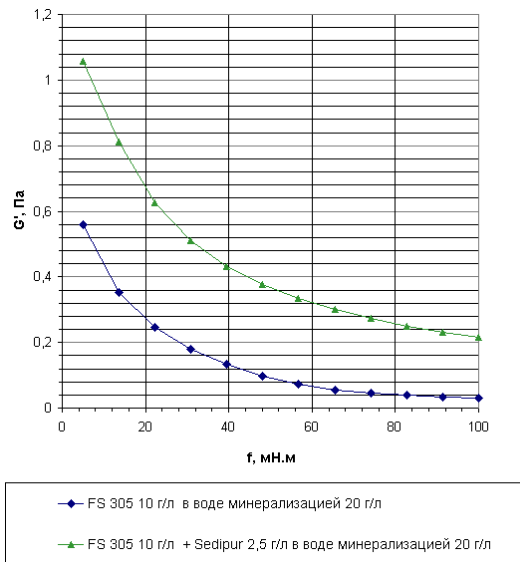


Рис. 11. Зависимость модуля накопления G' от приложенного момента f для дисперсий FS 305 (10 г/л) в растворе SEDIPUR (2,5 г/л) и в минерализованной воде

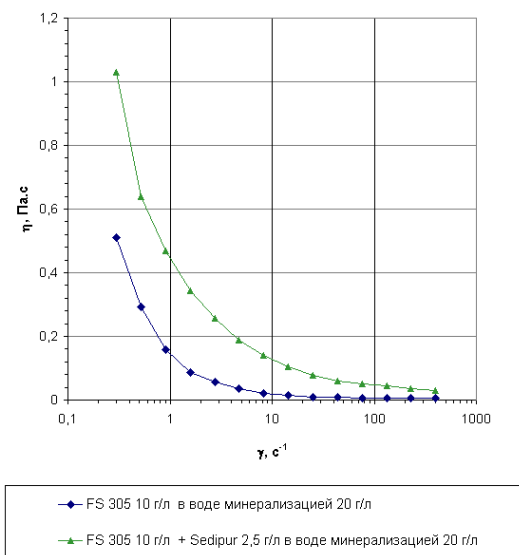


Рис. 12. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига для дисперсий FS 305 (10 г/л) в растворе SEDIPUR (2,5 г/л) и в минерализованной воде

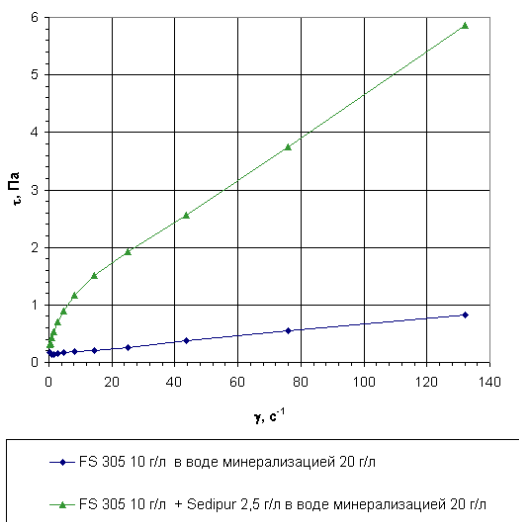


Рис. 13. Зависимость напряжения от скорости сдвига для дисперсий FS 305 (10 г/л) в растворе SEDIPUR (2,5 г/л) и в минерализованной воде

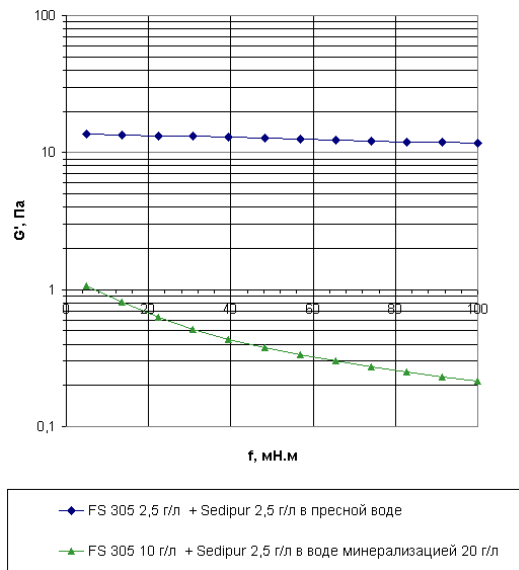


Рис. 14. Зависимость модуля накопления G' от приложенного момента f для дисперсий FS 305 в растворах SEDIPUR (2,5 г/л) в пресной и минерализованной воде

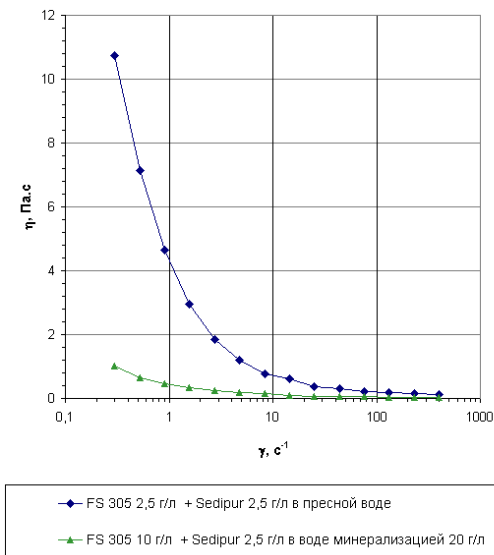


Рис. 15. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига для дисперсий FS 305 в растворах SEDIPUR (2,5 г/л) в пресной и в минерализованной воде

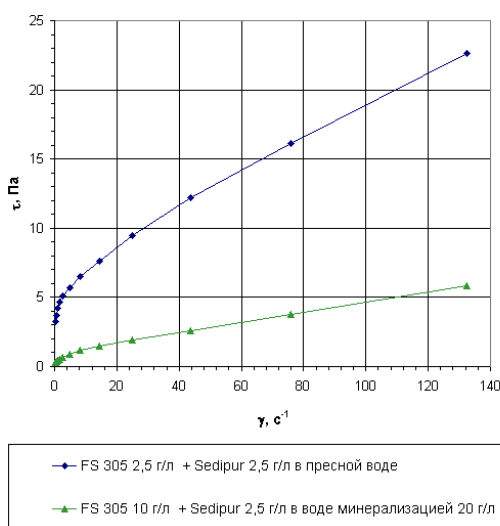


Рис. 16. Зависимость напряжения от скорости сдвига для дисперсий FS 305 в растворах SEDIPUR (2,5 г/л) в пресной и в минерализованной воде

та подавляется растворенными солями, частицы имеют мелкие размеры и проникают в поры породы. Поступающая из пласта вода меньшей минерализации вымывает линейный полимер, минерализация дисперсионной среды понижается, частицы разбухают, увеличиваются в размерах и «запирают» поры и трещины.

Список литературы

- [1] Телин А. Г. Сделать правильный выбор. О приоритетах при подборе химических методов увеличения нефтеотдачи разрабатываемых месторождений // Вестник Инжинирингового Центра ЮКОС. 2001. № 1. С. 5–8.
- [2] Хлебникова М. Э., Сингизова В. Х., Чукашов В. Н., Тазиев М. М., Фахретдинов Р. Н., Телин А. Г. Анализ литературных и патентных источников по технологиям селективной изоляции воды и ликвидации заколонных перетоков // Интервал. 2003. № 9. С. 4–22.
- [3] Курочкин Б. М., Вакула А. Я., Гимазов И. В., Максимов В. Н., Лукошин А. М. Опыт применения водонабухающего полимера (ВНП) типа АК-639 для ликвидации водопритоков в скважинах // Нефтепромышленное дело. 2000. № 7. С. 31–33.
- [4] Шрамм Г. Основы практической реологии. М.: Колос, 2003. 296 с.
- [5] Мирзаджанзаде А. Х., Хасанов М. М., Бахтизин Р. Н. Этюды о моделировании сложных систем в нефтедобыче. Уфа: Гилем, 1999. 464 с.