

Исследование свойств технологической жидкости для гидроразрыва пласта на основе вязкоупругих ПАВ

Research of technological composition for hydrofracturing based on viscoelastic surfactants

A.I. Shipilov¹, N.V. Babkina¹, I.A. Menshikov¹
¹POLYEX JSC, RF, Perm

E-mail: ais@polyex.perm.ru, knv@polyex.perm.ru

Keywords: surfactant, method of hydraulic fracturing, high-conductivity canals, enhanced oil recovery, low-permeability reservoirs

One of the most effective ways to increase oil production in case of low-permeable reservoirs is the method of hydraulic fracturing. Traditional way to give the required rheological properties to fracturing fluids is polymers application (guar derivatives, cellulose). One of the major drawbacks of such systems is the reduction of permeability due to contamination of the destruction products of polymers. Alternatively, eliminates this drawback can be used non-polymer systems based on viscoelastic surfactants.

The article considers the non-polymer reagent Surfogel D. It can be used in the composition of the fracturing fluid without use of polymers. Some breakers were investigated for each temperature. They can effectively manage the time of destruction gel. Solution of Surfogel D in fresh water provides desirable rheology, which is stable at various temperatures and shear rates. Advantage of this product is immediate recovery of viscosity characteristics after action of shear. Residual conductivity of proppant packaging in the case of Surfogel D use exceeds in the average 2.7 times those measured using the standard process of fracturing fluid on guar basis.

Thus, the conducted laboratory studies have shown the application perspectives of the surfactant Surfogel D in the technology of hydraulic fracturing. The latter was also confirmed by the successful field trials of this reagent in Western Siberia, when performing hydraulic fracturing about 17 tons of proppant were injected.

Важнейшим требованием, предъявляемым к технологической жидкости, используемой для проведения гидроразрыва пласта (ГРП), является наличие структурно-реологических свойств, способных обеспечить успешное проведение ГРП. Традиционно для придания необходимых реологических свойств жидкости разрыва используют полимеры (производные гуара, целлюлозы). Несмотря на их широкое применение, для подобных систем свойственны недостатки, связанные со снижением проницаемости как пропантной упаковки трещины, так и матрицы пласта вследствие загрязнения продуктами распада полимеров, технологическими трудностями при подготовке растворов полимеров (их гидратация), сложной (многокомпонентной) рецептурой жидкости ГРП. Последнее обусловлено необходимостью использования сшивателя, деструктора, биоцида и других компонентов, что приводит к громоздкому аппаратному оформлению, а также деструкции полимера при высоких

А.И. Шипилов¹, К.Х.Н.,
 Н.В. Бабкина¹, К.Х.Н.,
 И.А. Меньшиков¹

¹АО «Полиэкс»

Адреса для связи: ais@polyex.perm.ru,
 knv@polyex.perm.ru

Ключевые слова: ПАВ, гидроразрыв пласта (ГРП), высокопроводящие каналы, увеличение добычи нефти, низкопроницаемые коллекторы

DOI: 10.24887/0028-2448-2018-3-30-32

скоростях сдвига (необратимому изменению реологических свойств технологической жидкости) при прохождении насосного оборудования и зон перфорации. Для устранения указанных недостатков разрабатываются новые более эффективные деструкторы и сшиватели, используются комбинированные варианты применения полимеров и др.

В последнее время в качестве альтернативы было предложено использовать специальные мицеллообразующие ПАВ [1]. При определенных условиях их молекулы способны образовывать длинные цилиндрические (червеобразные) мицеллы, схожие с полимерными цепями [2]. При высоких концентрациях подобные структуры образуют трехмерную сетку зацеплений, что придает раствору вязкоупругие свойства. В отличие от полимеров энергия связи молекул ПАВ в данной сетке сравнительно мала и сопоставима с энергией теплового движения молекул, что обуславливает уникальные свойства этих систем, например, способность обратимо восстанавливаться после механического разрушения или термического воздействия. Обычно такие ПАВ имеют молекулярную массу, измеряемую сотнями углеродных единиц (полимер – это миллионы или сотни тысяч у.е.), поэтому автоматически исключается главная проблема

использования жидкости ГРП на полимерной основе – загрязнение коллектора продуктами распада.

Жидкости на основе ПАВ включают только 1–2 компонента, на основе полимеров – до 10–12 добавок. В результате значительно уменьшаются трудозатраты и число единиц используемого на месте оборудования. Однако выбор ПАВ для указанных целей ограничен, а предлагаемые зарубежными компаниями реагенты существенно зависят от температуры, причем вязкоупругие ПАВ российского производства, пригодные для ГРП, отсутствуют.

Перечисленные факторы способствовали разработке вязкоупругого ПАВ, применяемого в технологической жидкости для ГРП в компании АО «Полиэкс». Реагент на основе ПАВ получил торговое название «Сурфогель марки Д» и выпускается двух типов для разных температурных диапазонов: низкотемпературный 20–40 и высокотемпературный 70–100. Оба типа относятся к одному классу органических соединений, но различаются химической структурой и молекулярной массой.

Товарная форма представляет собой сиропообразную текучую жидкость от светло- до темно-коричневого цвета. Сурфогели хорошо смешиваются с пресной водой, образуя менее чем за 1 мин при комнатной температуре гомогенный раствор, который обеспечивает требуемые реологические параметры, стабильно удерживаемые при разных температурах и скоростях сдвига. Вязкость водного раствора ПАВ в зависимости от выбранной концентрации не превышает 50–60 мПа·с при скорости сдвига 100 с^{-1} , что позволяет беспрепятственно прокачивать полученную смесь и дозировать в поток активатор/деструктор и при необходимости другие добавки. При добавлении специального реагента-активатора вязкость раствора сурфогеля быстро увеличивается до требуемых при проведении ГРП значений, очевидно, в результате быстрой трансформации мицелл из сферических в цилиндрические. Вязкость растворов сурфогеля марки Д типа 70–100 в пресной воде приведены в табл. 1, из которой видно, что с увеличением скорости сдвига снижается вязкость раствора при всех исследованных температурах. Необычное поведение наблюдается для сурфогеля марки Д типа 70–100, когда при увеличении температуры возрастает вязкость. Жидкость на основе сурфогеля марки Д является неньютоновской. С использованием прибора OFITE MODEL 900 и встроенного математического алгоритма были измерены мера консистенции K и индекс течения, или показатель неньютоновского поведения жидкости n , при температуре $65 \text{ }^\circ\text{C}$, $K = 29,3$ и $n = 0,13$ для типа 70–100, при температуре $35 \text{ }^\circ\text{C}$, $K = 16,8$, $n = 0,36$ для типа 20–40.

На рис. 1 приведен тест на стабильность сурфогеля типа 70–100 (содержание ПАВ составляет 14,0 %, активатора – 1,52 %), иллюстрирующий увеличение вязко-

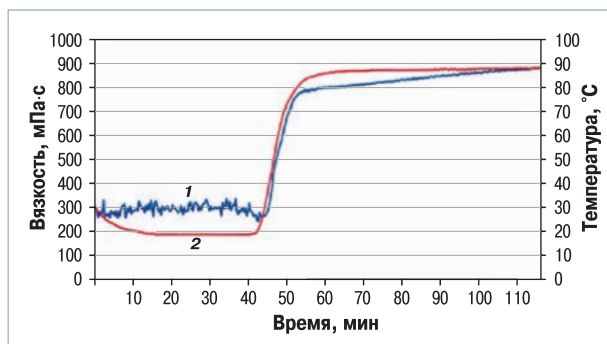


Рис. 1. Изменение вязкости (1) и температуры (2) сурфогеля марки Д типа 70–100

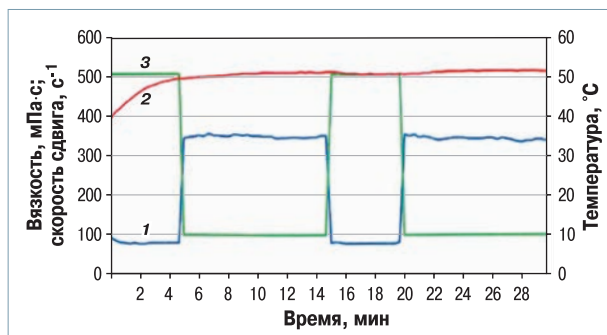


Рис. 2. Изменение вязкости (1), температуры (2) и скорости сдвига (3) жидкости ГРП

сти с ростом температуры и хорошую стабильность системы во времени. Для определения восстановительной способности жидкости ГРП проводился тест на чувствительность к сдвигу (рис. 2).

Вязкость рабочей жидкости при скорости сдвига 511 с^{-1} составляет около 90 мПа·с. Восстановление системы произошло практически сразу после увеличения скорости сдвига до 100 с^{-1} . Среднее значение эффективной вязкости в данном режиме деформаций составляет около 350 мПа·с. Измерения проводились при температуре $52 \text{ }^\circ\text{C}$.

Сурфогель марки Д типа 20–40 в диапазоне температур 20–40 $^\circ\text{C}$ имеет более высокую эффективность при сравнимых концентрациях, чем сурфогель типа 70–100, поэтому для низких температур именно он рекомендуется к применению. Так, при концентрациях ПАВ и активатора, равных соответственно 7,85 и 2,15 %, легко обеспечивается требуемая для ГРП эффективная вязкость 400–500 мПа·с.

Для оценки пескоудерживающих свойств сурфогеля марки Д проводились испытания скорости осаждения проппанта ForeProp 16/20, например, в растворе сурфогеля марки Д типа 70–100 (ПАВ – 8,18 %, активатор – 1,82 %) в пресной воде. Испытание выполнялось при комнатной температуре. В течение 1 ч менее 1/3 общего объема геля освободилось от проппанта осаждением последнего, что свидетельствует о хороших пескоудерживающих свойствах сурфогеля марки Д.

Ранее различными исследователями было установлено, что при контакте органических компонентов нефти с вязкоупругими растворами ПАВ цилиндрические мицеллы разрушаются, вероятно, за счет сольubilизации ими органических компонентов, и длинные цилиндрические мицеллы переходят в сферические, в результате

Таблица 1

Температура, $^\circ\text{C}$	Вязкость сурфогеля марки Д типа 70–100 мПа·с, при скорости сдвига, с^{-1}					
	75	100	170	270	360	511
30	220	165	105	70	56	41
60	330	267	161	105	81	58
90	424	359	245	165	126	90

резко снижается вязкость. Это свойство гарантирует полное разрушение гелей на основе сурфогеля марки Д при контакте с углеводородами, т.е. полностью отсутствует загрязнение продуктами распада. В то же время для эффективного регулирования и увеличения скорости разрушения геля авторами была исследована возможность использования дополнительных брейкеров (регуляторов вязкости). Для каждого типа сурфогеля подобраны брейкеры разной химической природы.

Проведенные испытания показали, что добавка брейкера в первые часы практически не влияет на вязкость геля. Например, для сурфогеля марки Д типа 70–100 через 1 ч 20 мин после использования специально разработанного в компании брейкера снижение вязкости не превысило 3 %. Однако через 24 ч вязкость составила 2,3 мПа·с, т.е. гель разрушился практически полностью (более чем на 99 %). Для сурфогеля марки Д типа 20–40 авторами рекомендуется хорошо известный капсулированный брейкер WBCap-LT, в зависимости от концентрации которого можно эффективно управлять вязкостью жидкости гидроразрыва: полного разрушения можно достичь как через короткий промежуток времени (3 ч), так и через 24 ч после применения брейкера. При этом стабильность системы (вязкость составляет более 400 мПа·с) сохраняется в первые 60 мин или более (в зависимости от концентрации) после введения брейкера. Вязкость жидкости разрыва после деструкции составляет менее 5 мПа·с.

Таким образом, очевидно, что подбором типа и концентрации брейкера можно регулировать время стабильного существования геля без потери необходимых реологических свойств и обеспечить его полный окончательный распад. Уникальное свойство жидкости ГРП на основе сурфогеля марки Д постепенно снижать вязкость в результате трансформации цилиндрических мицелл в сферические под действием нефти и отсутствие полимерных компонентов гарантируют отсутствие остаточного загрязнения проппантной упаковки.

Данные, полностью подтверждающие вышеприведенные оценки и результаты, были получены при изучении остаточной проводимости проппантной пачки после использования жидкости для ГРП на основе 10%-ного раствора сурфогеля марки Д и 3 %-ного брейкера № 1 в водном растворе. Лабораторные физико-химические исследования выполнялись совместно с ООО «РН-Уфанинефть» при температуре 90 °С, давлении смыкания 35 МПа с использованием песчаника штата Огайо и проппанта ForeProp 16/20. Методика определения проводимости проппантной пачки основана на стандарте ISO 13503-5.

Результаты исследований, приведенные в табл. 2, показали, что остаточная проводимость проппантной упаковки при использовании в качестве жидкости ГРП сурфогеля марки Д в среднем в 2,7 раза превышает анало-

Таблица 2

Расход жидкости, мл/мин, для промывки проппантной пачки	Коэффициент восстановления проницаемости, %, при использовании		
	сурфогеля марки Д	стандартной жидкости на гуаровой основе	
	в керосине	в 2%-ном растворе KCl	
5	63,8	68,4	24,2
15	74,6	79,0	26,4
30	86,8	96,1	35,1
50	87,4	97,3	39,3

гичный параметр при использовании стандартной технологической жидкости ГРП на гуаровой основе. Этот результат является следствием отсутствия остатков жидкости ГРП при ее деструкции, что выгодно отличает сурфогель марки Д от стандартных жидкостей на гуаровой основе.

Таким образом, проведенные исследования показали перспективность использования сурфогеля марки Д в качестве основы для приготовления технологической жидкости для ГРП.

Главными преимуществами данной ПАВ-основы являются:

- высокая остаточная проводимость проппантной упаковки, что обусловлено отсутствием загрязнения коллектора продуктами распада;
- легкость приготовления технологической жидкости и, как следствие, более простое аппаратное оформление при проведении ГРП;
- высокая вязкость, которая практически не снижается по истечении времени и при повышенных температурах;
- мгновенное восстановление вязкостных характеристик после сдвига.

В АО «Полиэкс» разработан весь комплект необходимой технической документации на продукты, проводится их сертификация, закончена подготовка к промышленному производству. В 2017 г. были проведены успешные опытно-промышленные испытания на одном из месторождений Западной Сибири. При выполнении ГРП с использованием сурфогеля марки Д в скв. 27153Б/755 было закачено 17 т проппанта и получен приток жидкости более 30 т/сут.

Список литературы

1. *Application of Viscoelastic Fracturing Fluids in Appalachian Basin Reservoirs*. Schlumberger // SPE 98068. – 2005.
2. Смирнова Н.А. Фазовое поведение и формы самоорганизации растворов смесей поверхностно-активных веществ // *Успехи Химии*. – 2005. – № 74 (2). – С. 138–154.

References

1. Boyer Ch.M., Glenn S.A., Claypool Br.R. et al., *Application of viscoelastic fracturing fluids in Appalachian basin reservoirs*, SPE 98068, 2005.
2. Smirnova N.A., *Phase behaviour and self-assembly patterns of surfactant mixtures in solutions* (In Russ.), *Uspekhi khimii = Russian Chemical Reviews*, 2005, no. 74 (2), pp. 138–154.