

Особенности реологического поведения жидкостей ГРП на базе вязкоупругих ПАВ в сравнении с гуаровыми.

Харитонов Олег Геннадиевич, к.т.н., главный специалист по ОКР

Акционерное общество «Полиэкс», г. Пермь, Россия

Аннотация.

В данной статье проведено сравнительное исследование пескоудерживающих свойств жидкостей разрыва на основе ПАВ СУРФОГЕЛЬ® Д и жидкостей разрыва на основе сшитого гуара. Показано, что традиционная характеристика – высокая вязкость жидкости разрыва при 100 с^{-1} не является необходимым условием для удержания ею проппанта. Нужно также учитывать неньютоновские свойства жидкости разрыва – индекс текучести при малых скоростях сдвига. Установлено, что жидкости разрыва на основе ПАВ СУРФОГЕЛЬ® Д, несмотря на более низкую вязкость, имеют перед жидкостями разрыва на основе гуара преимущество за счет более выраженных псевдопластических свойств.

Ключевые слова.

Гидравлический разрыв пласта; жидкость разрыва; пропантоудерживающая способность; вязкость; индекс текучести; скорость оседания проппанта.

Annotation.

This article presents a comparative study of the sand-carrying properties of fracturing fluids based on surfactant SURFOGEL® D and fracturing fluids based on cross-linked guar. It is shown that the traditional characteristic of the fracturing fluid, its high viscosity at 100 s^{-1} , is not a necessary condition for keeping the proppant in the suspended state. It is also necessary to take into account the non-Newtonian properties of the fracturing fluid - its flow index at low shear rates. It was found that fracturing fluids based on surfactant SURFOGEL® D, despite their lower viscosity, have an advantage over guar-based fracturing fluids due to their more pronounced pseudoplastic properties.

Keywords:

Hydraulic fracturing; fracturing fluid; proppant-carrying ability; viscosity; flow index; proppant settling rate.

Введение.

Область применения поверхностно активных веществ (ПАВ) в качестве основы для жидкостей разрыва (ЖР) более узкая, нежели применение гуара.

ПАВы рекомендуется применять для пластов с аномально низкой температурой или проницаемостью.

В практике применения гуар доминирует, соответственно требования к ЖР на основе ПАВ заимствуются из опыта работы с гуаровыми композициями. Однако ЖР на основе ПАВ имеют характерные особенности, отличающие их от гуара, и такой подход требует корректировки.

При выборе ЖР для ГРП требуется обеспечение удерживающей способности по проппанту. Сложилось мнение, что необходимым условием удержания проппанта во взвешенном состоянии является обеспечение вязкости ЖР не ниже 300-400 мПа*с при скорости сдвига: $\dot{\gamma}=100 \text{ с}^{-1}$ [1]. Для разработанной в АО «Полиэкс» ЖР на базе ПАВ СУРФОГЕЛЬ® Д марки СУРФОГЕЛЬ® марки Д (далее СУРФОГЕЛЬ® Д) отмечается ее отличие от традиционных ЖР на сшитой гуаровой основе – более низкая вязкость.

Между тем, прямой тест на оседание проппанта в ЖР на базе СУРФОГЕЛЯ® Д показывает приемлемую скорость оседания в сочетании с низкой вязкостью (100 - 150 мПа*с при 100 с^{-1}). Более того, сравнительные испытания дают обратную картину - при пятикратном преимуществе по вязкости в ЖР на основе сшитого гуара фиксируется большая скорость оседания, чем в ЖР на основе СУРФОГЕЛЯ® Д.

Тест на пескоудерживающую способность важен как для входного контроля ЖР при конкретном ГРП, так и как критерий отбора при разработке новых рецептур ЖР. Используется степенная модель Освальда, общепринятая в практике расчетов ГРП:

$$\tau = k * \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

где: τ – напряжение сдвига, Па; k – коэффициент консистенции, Па·сⁿ; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с⁻¹; n – индекс текучести.

1. Экспериментальное исследование реологических констант.

Для сравнительного исследования реологии была выбрана рецептура пары типичных ЖР:

1) ЖР на основе ПАВ: дист. вода (88,68%), СУРФОГЕЛЬ® Д тип 70-100, состоящий из ПАВ-ОСНОВЫ 70-100 (9,51%) и АКТИВАТОРА марки З (1,81%);

2) ЖР на основе гуара: дист. вода (99,32%), гуар Hydra GEL 8F (0,32%), сшиватель Hydra XW-2 (0,36%).

Реологические кривые для ЖР на основе СУРФОГЕЛЯ® Д и на основе гуара в виде зависимости напряжения от скорости сдвига: $\tau = f(\dot{\gamma})$ снимались на реометре GRACE 5600 в широком диапазоне скоростей сдвига: $\dot{\gamma} = 2-1000 \text{ c}^{-1}$ при температуре 25°C. Значения напряжения сдвига и вязкости для этих рецептур в зависимости от скорости сдвига приведены на Рис.1 и Рис.2.

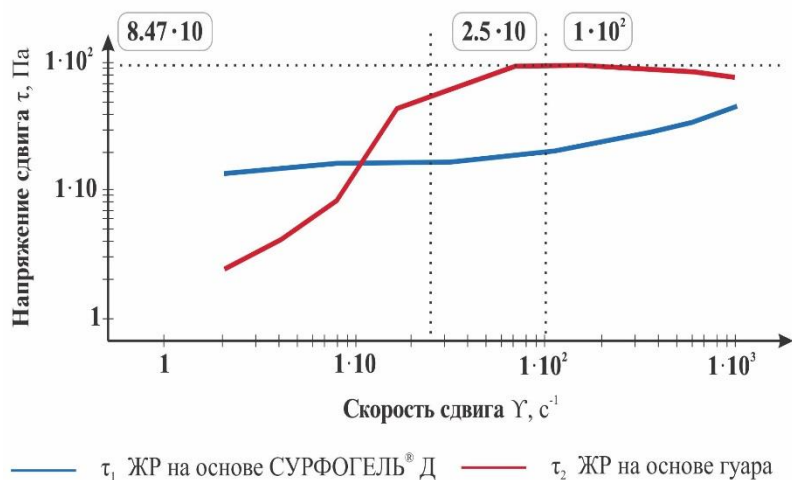


Рис.1 Зависимость напряжения сдвига τ , Па от скорости сдвига $\dot{\gamma}$, c^{-1}

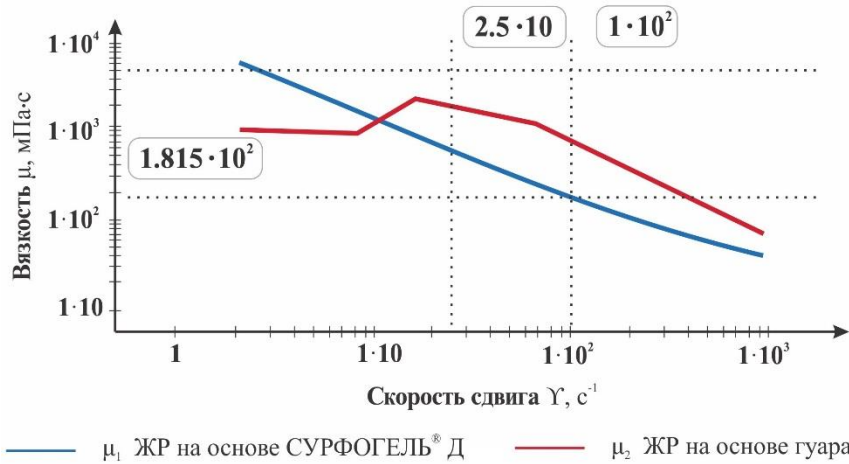


Рис.2 Зависимость вязкости μ , мПа·с от скорости сдвига $\dot{\gamma}$, с⁻¹

По данным, приведенным на этих рисунках были вычислены значения индекса текучести n и коэффициента консистенции k для каждого соседнего интервала скоростей сдвига. Принцип расчета непосредственно следует из формулы (1):

$$n = 1 + \frac{\ln \frac{\mu_1}{\mu_2}}{\ln \frac{\dot{\gamma}_1}{\dot{\gamma}_2}}; \quad k = \mu_2 * \dot{\gamma}_2^{1-n} \quad (2)$$

где: n – индекс текучести; μ_1, μ_2 – вязкости жидкостей в соседних интервалах измерения, Па·с; $\dot{\gamma}_1, \dot{\gamma}_2$ – скорости сдвига в соседних интервалах измерения, с⁻¹; k – коэффициент консистенции, Па·с ^{n} .

В пределах каждого интервала предполагается постоянство n и k . Графики зависимости констант n и k от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ для ЖР на основе СУРФОГЕЛЯ® Д и на основе гуара приведены на Рис.3 и Рис.4:

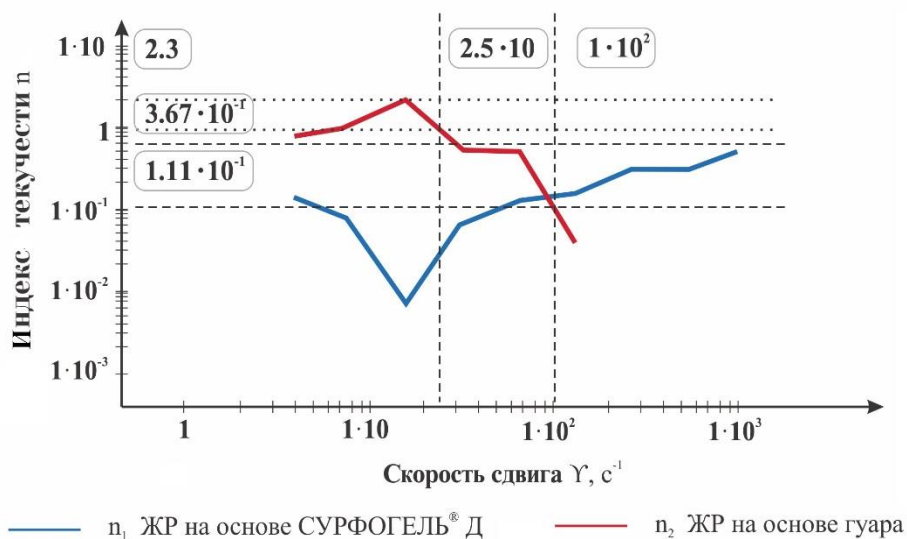


Рис.3 Зависимость индекса текучести n от скорости сдвига $\dot{\gamma}$, c^{-1}

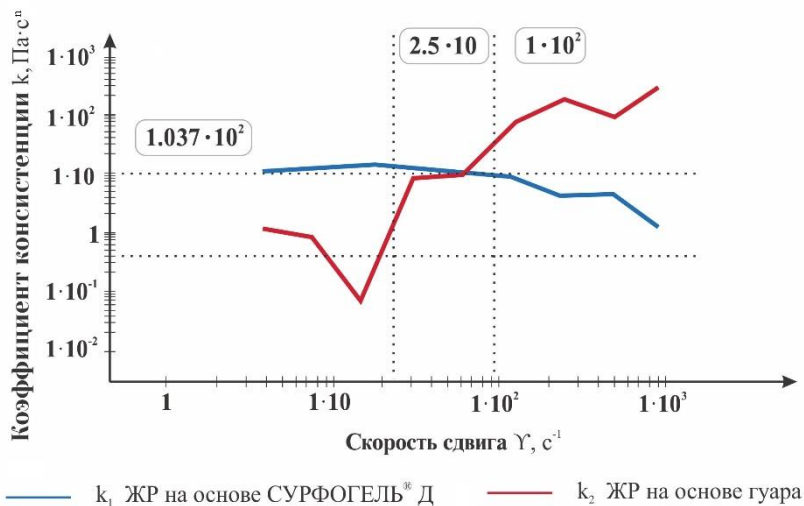


Рис.4 Зависимость коэффициента консистенции k , $\text{Па}\cdot\text{c}^n$ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$, c^{-1}

Данные на Рис.3 и Рис.4 получены расчетным путем, по формулам (2). Реологические константы n и k при прямом измерении на реометре Grace M5600, вычисляются по тем же зависимостям (2), но ведутся в узком интервале: $\dot{\gamma} = 25 - 100 \text{ c}^{-1}$, на Рис.1-4 он обозначен двумя вертикальными маркерами. Характерно, что данные зоны усредненно делят всю область изменения скоростей сдвига на три специфические области, крайне важные для изучения:

$\dot{\gamma} > 100 \text{ с}^{-1}$ - зона, характерная для течения ЖР в НКТ; $25 < \dot{\gamma} < 100 \text{ с}^{-1}$ - зона, характерная для течения ЖР в щели ГРП; $\dot{\gamma} < 10 \text{ с}^{-1}$ - зона характерная для осаждения проппанта в покоящейся ЖР (измерение пескоудерживающей способности).

Сравнивая поведение экспериментальных кривых приходим к выводу, что поведение ЖР на гуаре и на СУРФОГЕЛЕ® Д различаются.

ЖР на основе СУРФОГЕЛЯ® Д во всей области изменений скорости сдвига $2 < \dot{\gamma} < 1000 \text{ с}^{-1}$ имеет единую природу поведения - выражено псевдопластическую. На всем исследуемом интервале скоростей сдвига $n < 1$.

Для ЖР на основе гуара в этом же интервале реализуются три совершенно отличных друг от друга режима течения, последовательно сменяющих друг друга по мере увеличения скорости сдвига:

а. Область малых скоростей сдвига $\dot{\gamma} < 25 \text{ с}^{-1}$ - дилатантный характер течения, $n > 1$. Максимальное значение индекса текучести для ЖР на основе гуара в этом интервале составляет 2.3. То есть с увеличением скорости сдвига вязкость не падает, а возрастает, ЖР «густеет».

Дилатантное поведение является большой редкостью и не характерно для полимерных растворов, которым является ЖР на основе гуара. Тем не менее, явление экспериментально нами установлено дважды на двух рецептурах гуаровых ЖР, и случайная ошибка исключена. Это же явление перехода из псевдопластического состояния в дилатантное для поперечно сшитых полимерных ЖР при тех же скоростях сдвига установлено и подробно исследовано фирмой Schlumberger [2]. Физический механизм этого явления неясен, но в любом случае, наличие дилатантного участка для ЖР на сшитом гуаре установлено рядом исследователей независимо друг от друга, и его необходимо учитывать.

б. Область средних скоростей сдвига $25 < \dot{\gamma} < 100 \text{ с}^{-1}$ - псевдопластический характер течения. Это зона, характерная для течения ЖР в щели ГРП. Основное отличие гуаровой ЖР при течении на этом участке скоростей сдвига - меньшая нелинейность. Усредненное значение для области $2 < \dot{\gamma} < 100 \text{ с}^{-1}$: $n=0.667$. Индекс текучести ЖР с СУРФОГЕЛЕМ® Д существенно ниже: $n=0.111$. Усредненный коэффициент консистенции для обоих составов имеет практически одинаковое значение: $k_1 = 10.86 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$ и $k_2 = 10.37 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$.

в. Область больших скоростей сдвига (течение в НКТ): $\dot{\gamma} > 100 \text{ с}^{-1}$. Течение в области больших скоростей сдвига, в отличие от зон "а" и "б", турбулентное, а не ламинарное, и не является целью исследования в данной статье.

2. Сравнительная оценка скорости оседания проппанта.

Скорость оседания одиночной частицы проппанта $V_{\text{пр}}$ в ньютоновской ЖР рассчитывается по традиционной формуле Стокса [3]:

$$V_{\text{пр}} = \frac{(\rho - \rho_f) * g * d^2}{18 * \mu} \quad (3)$$

где: $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ - ускорение свободного падения; ρ, ρ_f - плотность частицы проппанта и ЖР, кг/м^3 ; d - диаметр частицы проппанта, м.

Если в формуле (3) значение вязкости выразить через скорость сдвига в степенном законе (1): $\mu = \frac{k}{\dot{\gamma}^{1-n}}$, а саму скорость сдвига при оседании заменить на ее приближенную оценку [3,4]: $\dot{\gamma} = \frac{v_{\text{пр}}}{d}$, получим широко известную скорость оседания одиночной частицы проппанта в степенной ЖР, [3-5]:

$$V_{\text{пр}} = \left(\frac{(\rho - \rho_f) * g * d^{n+1}}{18 * k} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

В реальности, согласно многочисленным исследованиям ЖР [4], при $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ эффективная вязкость стремится к некоторой конечной величине $\mu \rightarrow \mu_0$ и кривые

на Рис.2 выходят на горизонтальный участок, примыкающий к оси ординат. Соответственно, ЖР при оседании проппанта допустимо считать ньютоновской и оценивать скорость оседания проппанта в покое нужно по формуле Стокса (3).

Единственно, в качестве μ_0 надо использовать эффективную вязкость, померенную при скорости сдвига: $\dot{\gamma} = \frac{v_{пр}}{d}$, а не при $\dot{\gamma} = 100 \text{ с}^{-1}$.

Проведем конкретные расчеты для исследуемых в п.1 рецептур ЖР. Замерялась скорость осаждения единичного зерна проппанта 16/20 меш. Диаметр зерна $d=1 \text{ мм}$, кажущаяся плотность зерна проппанта $\rho=2984 \text{ кг/м}^3$.

Таблица 1. Сравнительный расчет скоростей оседания частиц проппанта в ЖР

Скорость оседания частицы проппанта, мм/с					
ЖР на СУРФОГЕЛЕ® Д			ЖР на гуаре		
Степенная $v_{пр1}$, формула (3)	Ньютоновская $v_{пр1}$, формула (4)	Факт	Степенная $v_{пр2}$, формула (3)	Ньютоновская $v_{пр2}$, формула (4)	Факт
$3,99 \cdot 10^{-10}$	0,161	0,042	0,034	1,01	1,1

Расчет по «степенной» формуле (3) дает нереалистично заниженные значения скорости оседания, для ЖР на гуаре в 2 порядка, на СУРФОГЕЛЕ® Д - в 8. Более близкое совпадение расчетов по формуле Стокса (4) для гуаровой ЖР объясняется близостью измеренной вязкости при 2 с^{-1} к фактической при 1 с^{-1} . Для ЖР на СУРФОГЕЛЕ® Д вязкость измерялась при тех же 2 с^{-1} , вязкость при фактических 0.04 с^{-1} значительно выше, благодаря большей псевдопластичности.

Выводы:

1. Ограничение вязкости ЖР до уровня не менее $0.3-0.4 \text{ Па} \cdot \text{с}$ при $\dot{\gamma} = 100 \text{ с}^{-1}$ как критерий пригодности ЖР к удержанию проппанта - неприменим для ЖР с выраженной псевдопластичностью: $n < 0.7$.

2. Расчет скорости оседания проппанта в покоящейся ЖР должен вестись по формуле Стокса (3), но с эффективной вязкостью μ_0 , замеряемой при

скоростях сдвига $0.01-0.1 \text{ с}^{-1}$. Рекомендуемая в литературе [3-5] корреляция формулы Стокса под степенной закон (5), приводит к нереалистичным, заниженным на несколько порядков, результатам расчета, из-за завышения вязкости в области малых (околонулевых) скоростей сдвига.

3. Наличие дилатантного участка в области малых скоростей сдвига у ЖР на гуаровой основе ухудшает их пескоудерживающую способность. Независимо к этому же выводу пришли авторы работы [2], специально посвященной теме аномальной дилатантности ЖР.

Ссылки на литературные источники:

1. Барковский Н.Н., Кондратьев С.А., Амиров А.М., Чабина Т.В., Шмаков М.В. Комплексный подход к лабораторному тестированию жидкостей разрыва // Нефтепромысловое дело. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2018. - №9. - С. 33-40.

2. Denis Vernigora, Stella Sypchenko, Andrey Fedorov, and Olesya Olennikova, New Fracturing Fluid Viscosity Model to Cure Power Law Mistakes, SPE-202064-MS, Schlumberger.

3. А. В. Базилевский, Д. А. Коротеев, А. Н. Рожков, А. А. Скобелева, Седиментация частиц в сдвиговых потоках вязкоупругих жидкостей, МЖГ, №4, 2010 г.

4. Michael J. Economides, Kenneth G. Nolte. Reservoir Stimulation, 3-d Edition.

5. Осипцов А.А. Модели механики многофазных сред для технологии гидроразрыва пласта. Автореф. дисс. д.ф.м.н., М., 2017.