

# ООО «Химпром»: Альтернативные системы ГРП. Синтетический полимер Hydra GEL X для вскрытия среднетемпературных пластов



К.А. АРИСТОВА,  
инженер-химик



Р.О. КОЖЕВНИКОВ,  
начальник отдела по  
инновациям и разработкам



М.Г. КУНСТ, руководитель  
отдела продвижения  
химических реагентов для  
гидроразрыва пласта



М.Т. МАШАРОВ, начальник  
лаборатории НИР

## Аннотация

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) является одним из наиболее эффективных и распространенных методов интенсификации добычи пластовых флюидов. Жидкости, способные транспортировать проппант с наименьшим загрязнением пласта, – одно из самых актуальных направлений технологического развития ГРП [5]. Долгое время высоковязкие гели на основе гуара являлись основными типами жидкости для транспортировки проппанта при проведении ГРП в России [4].

Обладая отличной несущей способностью, сшитый полимерный гель на основе природных полисахаридов (гуаровая камедь и ее производные) имеет значительный недостаток – приводит к ухудшению фильтрационных свойств порового пространства пласта ввиду его закупоривания остатками не разрушенного до конца полимерного геля, что вызывает снижение дебита скважины. Помимо этого, высокая вязкость сшитых полимерных систем, необходимая для удержания проппанта в объеме, усложняет процесс транспортировки проппанта глубоко в пласты с низкой проницаемостью и повышает энергетические затраты при закачке жидкости.

Тенденция к повышению эффективности извлечения нефти послужила толчком к развитию технологий применения синтетических полимеров для проведения операций ГРП и МГРП. В сравнении с традиционными системами гидроразрыва на основе гуаровой камеди синтетические гели имеют широкий потенциал к повышению эффекта извлечения нефти и снижению операционных затрат.

Синтетические гели при невысоких значениях вязкости обладают высокими пескоудерживающими характеристиками, а их применение позволяет получить более высокую остаточную проводимость и чистоту трещины. Использование синтетического геля упрощает процедуру проведения операций ГРП путем снижения количества химических компонентов в рецептуре и количества единиц оборудования. Кроме этого, синтетические полимеры обладают меньшим сопротивлением при закачке, что существенно сокращает затраты энергии на прокачку жидкости разрыва. Это свойство позволяет производить закачку синтетического геля двумя методами: низкорасходный ГРП – 3,6–4,5 м<sup>3</sup>/мин – и высокорасходный ГРП по технологии Slick Water с расходом более 12 м<sup>3</sup>/мин [3].

Несмотря на многочисленные преимущества использования синтетического геля, главное опасение, сдерживающее его массовое применение, заключается в слабой изученности песконесущих свойств и способности качественно разрушаться под воздействием деструкторов.

В статье приведены исследования ООО «Химпром» по разработке синтетической жидкости ГРП на основе полиакриламидов, проведен комплекс реологических исследований, включающий в себя построение графиков вязкости, а также оценку термической стабильности системы. Итогом работы стала разработка жидкости ГРП для вскрытия среднетемпературных пластов в условиях пресных источников воды на основе продуктов российского производства: гелеобразователя Hydra GEL SW и деструктора Hydra BREAK.

## Введение

Специалистами научно-исследовательского центра ООО «Химпром» разработана альтернативная система жидкости ГРП на основе синтетических гелеобразователей серии Hydra GEL SW и деструктора Hydra BREAK.

Гелеобразователь Hydra GEL SW является высокомолекулярным акриловым сополимером. Деструктор Hydra BREAK представляет собой окислитель на основе смеси неорганических кислот, оптимизированный для использования с традиционными шитыми гуаровыми и синтетическими гелями.

В качестве объекта исследования для разработки синтетической системы выбрана классическая система ГРП для вскрытия пластов с температурой 50 °С на основе шитого гуарового геля с загрузкой 3,0 кг/м<sup>3</sup> и вязкостью, превышающей 700 сП при 100 с<sup>-1</sup>, а также алюмосиликатный проппант фракции 16/20 с максимальной концентрацией 400 кг/м<sup>3</sup>. В статье приведены результаты тестирования основных технологических свойств разработанной системы жидкости ГРП в сравнении с классической жидкостью на основе гуаровой камеди: исследование скорости гидратации и реологических характеристик синтетического геля, исследование статического осаждения проппанта, а также испытание разрушения системы в присутствии деструктора.

На данный момент линейка синтетических полимеров ООО «Химпром» представляет собой ряд базовых продуктов для различных технологических условий:

- Hydra GEL SW марка А – сухой синтетический полимер для пресных и слабоминерализованных систем;
- Hydra GEL SW марка С – сухой катионный синтетический полимер для сильноминерализованных систем;
- Hydra GEL SW Liquid марка А – эмульсионный анионный полимер для пресных и слабоминерализованных систем;
- Hydra GEL SW Liquid марка С – эмульсионный катионный полимер для сильноминерализованных систем.

В зависимости от требований заказчика возможна доработка имеющихся синтетических систем ООО «Химпром» для использования в широком диапазоне загрузок, температур и минерализации.

## Описание экспериментов. Полученные результаты

К основным характеристикам жидкости ГРП можно отнести:

1. Скорость гидратации – для оценки способа приготовления системы и необходимого оборудования;
2. Стабильность системы при проведении работ – для исключения температурной и механической деструкции полимерной системы;

3. Пескоудерживающие свойства, влияющие на время оседания проппанта, – с целью исключения возникновения СТОПов при проведении работ;
4. Разрушение системы вод воздействием деструкторов – с целью снижения эффективной вязкости системы и выноса остатков разрушенного геля.

Все эти параметры влияют на технологические свойства жидкости разрыва. От них зависит качество и успех выполнения операций ГРП.

## Исследование скорости гидратации синтетического полимера

Скорость гидратации – одно из важнейших свойств гелеобразователей при производстве гидроразрыва пласта. От этого параметра зависит качество исполнения работ, схема обвязки, количество применяемого оборудования, а также способ введения полимера в технологическую линию [2]. С целью определения скорости набора вязкости и времени достижения полной гидратации был выполнен ряд экспериментов. Для приготовления полимерной жидкости использовалась дистиллированная вода с температурой 25 °С и синтетический гелеобразователь Hydra GEL SW в концентрации 4 кг/м<sup>3</sup>. В стакан блендера Уоринга добавили 800 мл дистиллированной воды и выставили скорость перемешивания на уровне 2000 об/мин. Далее быстро и равномерно ввели навеску полимера в количестве 4 г (0,5% об.), исключая образование комков. Затем отобрали шприцем необходимый для измерения объем раствора в количестве 150 мл и измерили вязкость при температуре 20 °С, скорости сдвига 100 с<sup>-1</sup> на вискозиметре OFITE 900 по истечении 30, 150, 300, 600, 900 секунд.

В таблице 1 приведены значения вязкости синтетического полимера Hydra GEL SW в зависимости от времени гидратации.

**Таблица 1 – Оценка скорости гидратации Hydra GEL SW**

	Вязкость, мПа•с (скорость сдвига 100 с <sup>-1</sup> )
t, с	Hydra GEL SW
30	68,5
150	110,6
300	110,5
600	110,2
900	110,2

В результате проведенного испытания удалось установить, что гидратация полимера Hydra GEL SW в концентрации 4 кг/м<sup>3</sup> осуществляется менее чем за 150 секунд. Результаты данного эксперимента позволяют сделать предварительные выводы об отсутствии необходимости применения дополнительного

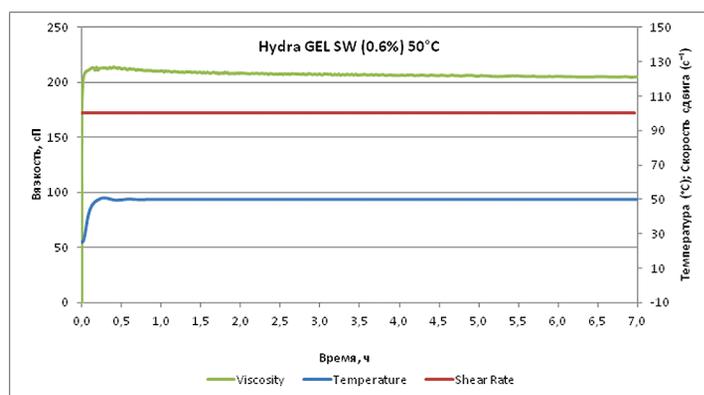
оборудования для гидратации синтетического геля во время проведения полевых работ.

### Определение стабильности системы

Исследование эффективной вязкости при определенном значении температуры позволяет определить границы температурной деструкции для исключения рисков оседания проппанта в связи со снижением вязкостных характеристик синтетического полимера при проведении ГРП.

В данном исследовании было проведено тестирование вязкостных характеристик системы при температуре 50 °С в течение 7 часов с целью определения стабильности системы во времени при скорости сдвига 100 с<sup>-1</sup>.

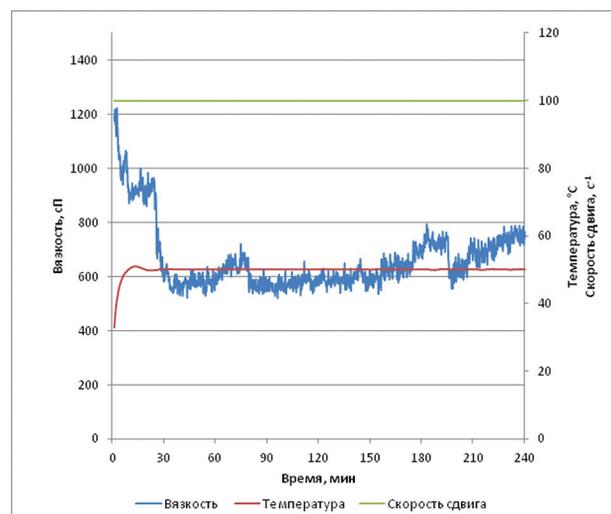
Для приготовления полимерной жидкости использовалась дистиллированная вода с температурой 25 °С и синтетический гелеобразователь Hydra GEL SW в концентрации 6 кг/м<sup>3</sup>. Для проведения исследования в стакан блендера добавили 300 мл дистиллированной воды. Далее равномерно ввели навеску полимера Hydra GEL SW в количестве 1,8 г (0,6% об.) при скорости перемешивания 2000 об/мин, исключая образование комков, и перемешали полученный полимерный раствор в течение 10 минут. Затем шприцем отобрали пробу получившегося раствора в количестве 52 мл и внесли в ячейку вискозиметра OFITE 1100 в конфигурации боб-ротатор R1/B5. Стабильность полимерного раствора во времени измеряли при температуре 50 °С, скорости сдвига 100 с<sup>-1</sup> и давлении 400 psi.



**Рисунок 1 – Стабильность синтетической системы Hydra GEL SW 6 кг/м<sup>3</sup> при 50 °С**

Вязкость полимерного раствора Hydra GEL SW в концентрации 6 кг/м<sup>3</sup>, измеренная на OFITE 1100 в конфигурации боб-ротатор R1/B5 при температуре 50 °С, в начале измерения составила 213 сП. По истечении 7 часов вязкость снизилась до 205 сП без применения деструкторов, что составляет 3,8% в абсолютном значении. Проведенный тест показал, что полимер в заданном промежутке температуры и времени обладает высокой стабильностью и не подвержен термической деструкции.

Аналогичные испытания провели для



**Рисунок 2 – Стабильность классической системы на основе гуарового гелеобразователя Hydra GEL 8 в концентрации 3,0 кг/м<sup>3</sup>, замедленного сшивателя Hydra CX-1 в концентрации 2,0 л/м<sup>3</sup> и быстрого сшивателя Hydra XW-2 в концентрации 1,5 л/м<sup>3</sup>**

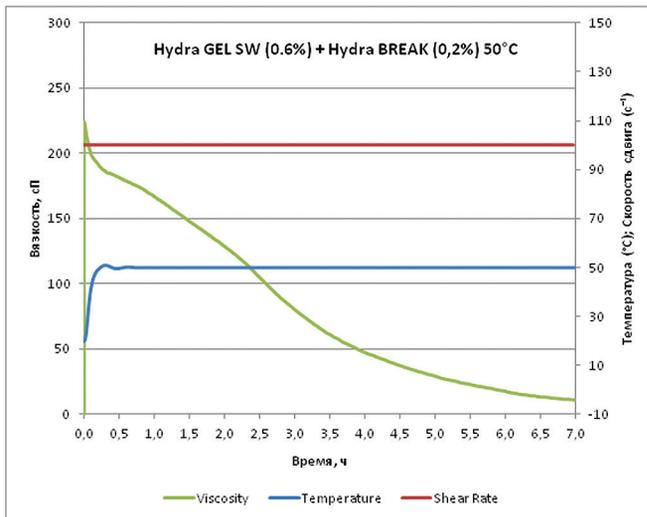
традиционной системы на основе гуарового гелеобразователя Hydra GEL 8 в концентрации 3,0 кг/м<sup>3</sup>, замедленного сшивателя Hydra CX-1 в концентрации 2,0 л/м<sup>3</sup> и быстрого сшивателя Hydra XW-2 в концентрации 1,5 л/м<sup>3</sup>.

Вязкость полимерной системы на основе сшитой гуаровой камеди, измеренная на OFITE 1100 в конфигурации боб-ротатор R1/B5 при температуре 50 °С, составила 900 сП. По истечении четырех часов вязкость снизилась до 750 сП без применения деструкторов, что свидетельствует о незначительной термической деструкции полимерной системы на основе сшитой гуаровой камеди. Кроме этого, система на основе сшитой гуаровой камеди обладает более высоким значением эффективной вязкости, необходимой для удержания проппанта, при заданных условиях исследования.

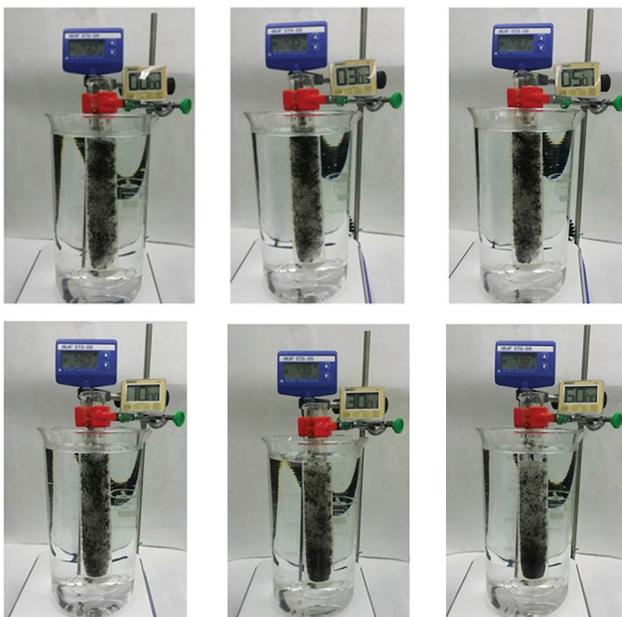
### Определение деструкции системы

Деструкция – одно из главных качеств жидкости разрыва, эффект от которого выражается в увеличении остаточной проводимости пласта и повышении нефтеотдачи скважины. Данное тестирование проведено с целью определения разрушения системы под действием деструктора в течение заданного промежутка времени [1]. Для приготовления полимерной жидкости использовалась дистиллированная вода с температурой 25 °С и синтетический гелеобразователь Hydra GEL SW в концентрации 6 кг/м<sup>3</sup>. Для определения деструкции системы в стакан блендера Уоринга добавили 300 мл дистиллированной воды, выставили скорость перемешивания на уровне 2000 об/мин и равномерно внесли навеску полимера Hydra GEL SW в количестве 1,8 г (0,6% об.), исключая образование комков. Раствор после внесения

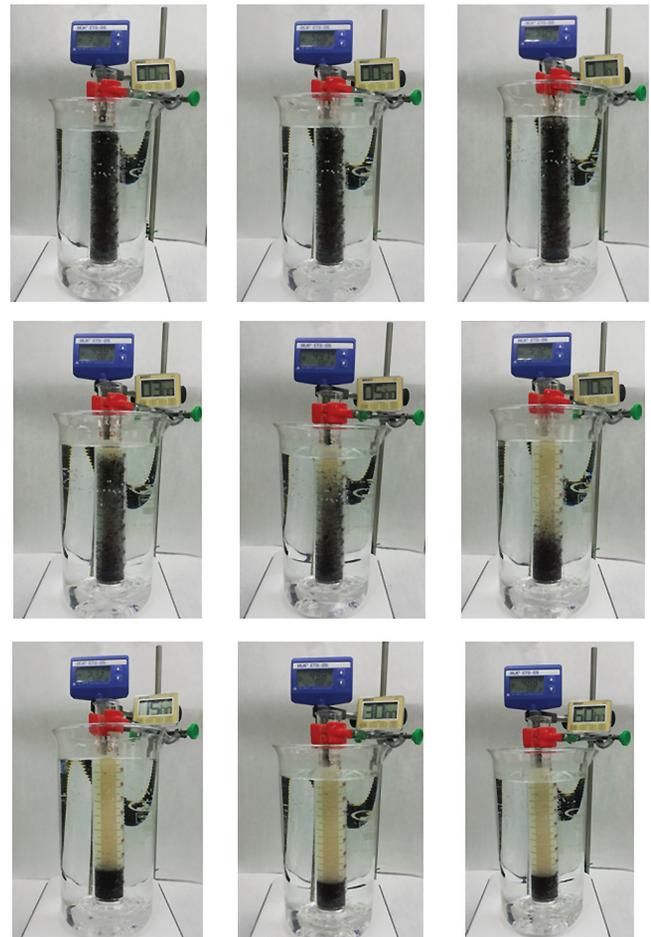
полимера перемешивали в течение 10 минут. Затем шприцем отобрали пробу получившегося раствора в количестве 52 мл, из которой ½ часть в количестве 26 мл поместили в ячейку вискозиметра OFITE 1100 в конфигурации боб-ротатор R1/B5 и добавили деструктор. Далее в ячейку вискозиметра внесли оставшуюся часть полимерного раствора в количестве 26 мл и измерили стабильность раствора при температуре 50 °С, скорости сдвига 100 с<sup>-1</sup> и давлении 400 psi.



**Рисунок 3 – Деструкция синтетической системы Hydra GEL SW (0,6%) + Hydra BREAK (0,2%) при 50 °С**



**Рисунки 4–9 – Процесс оседания алюмосиликатного проппанта фракции 16/20 с концентрацией 400 кг/м³ при температуре 25 °С в жидкости ГРП на основе синтетического полимера Hydra GEL X в концентрации 6 кг/м³**



**Рисунки 10–18 – Процесс оседания алюмосиликатного проппанта 16/20 в концентрации 400 кг/м³ при температуре 25 °С в жидкости ГРП на основе гуарового гелеобразователя Hydra GEL 8 в концентрации 3,0 кг/м³, замедленного сшивателя Hydra CX-1 в концентрации 2,0 л/м³ и быстрого сшивателя Hydra XW-2 в концентрации 1,5 л/м³**

После проведенного испытания было установлено, что вязкость полимерного раствора Hydra GEL SW в концентрации 6 кг/м³, измеренная на вискозиметре OFITE 1100 в конфигурации боб-ротатор R1/B5 при температуре 50 °С, снижается с 200 до 6 сП в течение 7 часов. Стоит отметить, что при изменении концентрации деструктора Hydra BREAK можно увеличить или уменьшить время деструкции системы в зависимости от параметров проведения операций ГРП.

#### **Исследование статического осаждения проппанта**

Исследование осаждения проппанта дает представление о вязкоупругих свойствах синтетического геля. Трудоемкое измерение транспорта проппанта в потоке на первом этапе исследований было упрощено путем проведения лабораторных тестов в статических условиях. Данное исследование отражает скорость осаждения проппанта в условиях малого сдвига.

Для приготовления полимерной жидкости

использовалась дистиллированная вода с температурой 25 °С и синтетический гелеобразователь Hydra GEL SW в концентрации 6 кг/м<sup>3</sup>. Для определения оседания проппанта в условиях малого сдвига в стакан блендера Уоринга добавили 200 мл дистиллированной воды и выставили скорость перемешивания на уровне 2000 об/мин. Далее быстро и равномерно ввели навеску полимера Hydra GEL SW в количестве 1,2 г (0,6% об), исключая образование комков. Полученный полимерный раствор перемешали в течение 10 минут. Затем шприцем отобрали 100 мл раствора для исследований на вискозиметре OFITE 1100 в конфигурации боб-ротор R1/B5, а к оставшимся 100 мл раствора добавили 40 г алюмосиликатного проппанта фракции 16/20.

Для равномерного распределения проппанта полимерный раствор перемешали на блендере в течение 5 минут, перелили раствор в мерный цилиндр, запустили секундомер и провели фотофиксацию оседания проппанта через 0, 0,5, 1,5, 10, 15, 30, 60 минут.

Оседание алюмосиликатного проппанта фракции 16/20 в традиционной системе на основе гуаровой камеди в концентрации 3,0 кг/м<sup>3</sup> и системы замедленного и быстрого сшивателя в концентрации 2,0 л/м<sup>3</sup> и 1,5 л/м<sup>3</sup> соответственно в статических условиях при малой скорости сдвига происходит за 60 минут. В свою очередь, в растворе полимера Hydra GEL SW в концентрации 6 кг/м<sup>3</sup> при тех же условиях оседания алюмосиликатного проппанта фракции 16/20 на протяжении 60 минут не наблюдалось, что свидетельствует о высоких пескоудерживающих характеристиках системы.

### Вывод

Специалистами научно-исследовательского центра ООО «Химпром» разработана альтернативная жидкость ГРП на основе синтетического гелеобразователя Hydra GEL SW и деструктора Hydra BREAK для вскрытия среднетемпературных пластов при использовании пресных источников воды. Проведенные исследования показали, что разработанная система обладает следующими преимуществами:

- Способна удерживать в объеме проппант на уровне, соизмеримом со сшитыми гуаровыми системами, при относительно невысокой эффективной вязкости жидкости разрыва;
- Легко и контролируемо разрушается до низких значений вязкости, что положительно влияет на степень загрязнения коллектора и эффективность извлечения нефти;
- Обладает мгновенной гидратацией, что позволяет использовать ее на лету с непосредственным введением в поток – по технологии on the fly;
- Обладает низкими значениями эффективной вязкости рабочего раствора полимера, что существенно снижает давление на закачку

и положительно влияет на остаточную проводимость трещины;

- Упрощает процедуру проведения операций ГРП путем снижения количества химических компонентов в рецептуре и количества единиц оборудования в обвязке линии ГРП.

В условиях возрастающих требований к чистоте трещин и возрастающего объема работ разработанная синтетическая система является перспективным направлением для промышленного применения в нефтедобывающей отрасли. Благодаря использованию синтетических гелевых систем можно преодолеть недостатки классической жидкости ГРП на основе гуаровой камеди: уменьшить загрязнение пласта, увеличить чистоту трещины и повысить эффективность извлечения нефти. Стоит отметить, что разработанная система следует по курсу импортозамещения, реализации российских разработок и развития отечественного производства. Все это в дальнейшем позволит расширить области применения технологий на основе синтетических полимеров и внедрить стандарты тестирования в отрасли.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Магадова Л., Силин М., Глуценко В. Нефтепромысловая химия. Технологические аспекты и материалы для гидроразрыва пласта: учеб. пособие для вузов. – М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2012. – 423 с.
2. Рябоконе С., Нечаев А., Чагай Е. Жидкости-песконосители для гидроразрыва пласта. – М.: ВНИИОЭНГ, 1987. – Вып. 14 (143). – 52 с.
3. Абдраков Д., Джулдугулов Е., Круглов Р., Павлова С., Верещагин С., Чупраков Д., Иванов В. Транспорт проппанта вязкими понизителями трения при относительно небольших расходах закачки: моделирование и полевой опыт. – 2020. – [Электронный ресурс]. – Режим быстрого доступа: <https://onepetro.org/speshf/proceedings-abstract/20SHF/220SHF/D0215005R003/452881>
4. Учьев Р.П., Пруцаков А.С., Чебыкин Н.В., Павлова С.Р., Вальнев Д.А., Логинов А.В., Данилевич Е.В., Сыпченко С.И., Пасхалов М.А., Борисенко А.А., Оленникова О.В., Верещагин С.А., Мавлеткулов У.Р. Новое слово в Российском ГРП – низковязкие жидкости на основе синтетических полимеров. Опыт применения на объектах «Газпромнефть-Хантос». – 2020. – [Электронный ресурс]. – Режим быстрого доступа: <https://onepetro.org/SPERPTC/proceedings-abstract/20RPTC/3-20RPTC/D0335014R003/450296>
5. Чураков А.В., Пичугин М.Н., Файзуллин И.Г., Гайнетдинов Р.Р., Макаревич С.Б., Михайлов Д.Ю., Виллиамс Б., Ху Т. Безгуаровые синтетические гели ГРП – успешная концепция выбора. – 2020. – [Электронный ресурс]. – Режим быстрого доступа: <https://onepetro.org/SPERPTC/proceedings-abstract/20RPTC/3-20RPTC/D0335010R005/450136>

## Преимущества альтернативных полимерных систем ГРП:

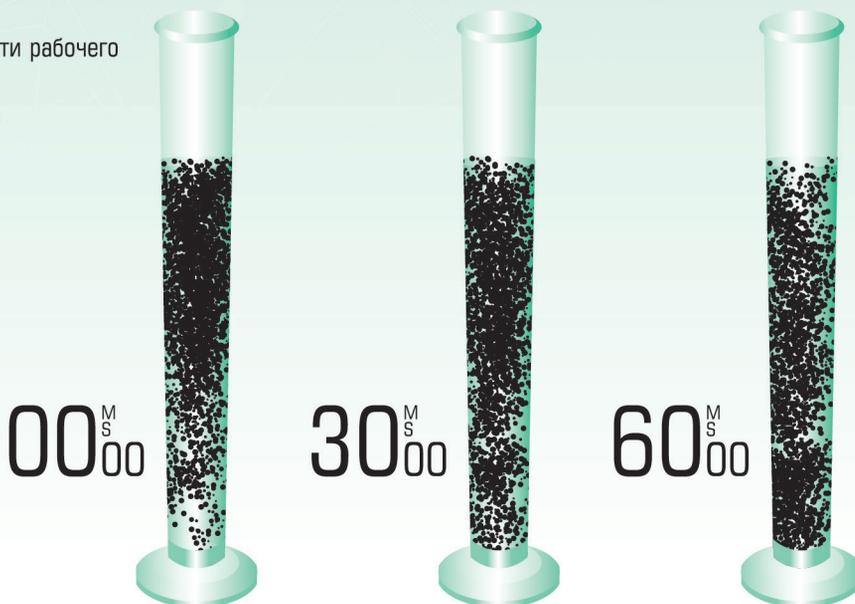
- высокая удерживающая способность проппанта при низкой эффективной вязкости рабочего раствора полимера;
- низкое давление при прокачке полимера (обладает свойствами понизителя трения);
- различные торговые формы полимеров: сухие и жидкие, для пресных и минерализованных систем;
- легко и контролируемо разрушается до низких значений вязкости;
- высокая остаточная проводимость по сравнению с традиционной сшитой гуаровой системой;
- температурная стабильность до 120°C;
- обладает низкими значениями эффективной вязкости рабочего раствора полимера;
- возможность применения по технологии «on the fly».

## Условия проведения испытаний

Hydra GEL SW	6,0 кг/м <sup>3</sup>
Проппант	
алюмосиликатный	16/20–400 кг/м <sup>3</sup>
Температура	25°C

## Задачи, которые решают альтернативные полимерные системы ГРП:

- уменьшение загрязнения пласта;
- увеличение чистоты трещины;
- повышение эффективности извлечения нефти;
- упрощение проведения процедуры операций ГРП за счёт снижения количества необходимого оборудования в обвязке линии.



Оценка песконесущих свойств синтетической системы Hydra GEL SW (6 кг/м<sup>3</sup>)

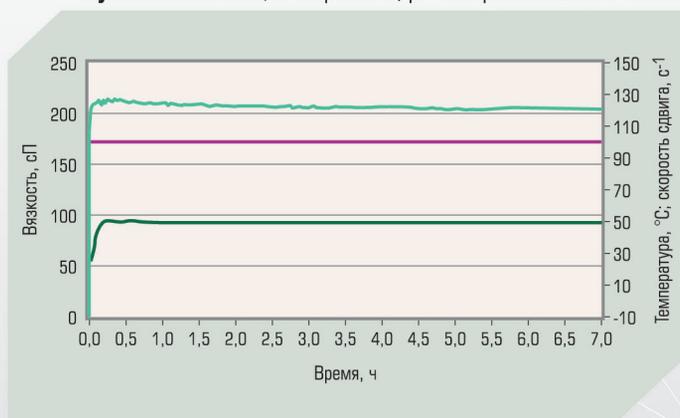
## Условия проведения испытаний

Hydra GEL SW	6,0 кг/м <sup>3</sup>
Геометрия	R1/B5 (OFITE 1100)
Скорость сдвига	100 с <sup>-1</sup> –117,0 оборотов
Температура	50°C
Давление	400 psi

## Условия проведения испытаний

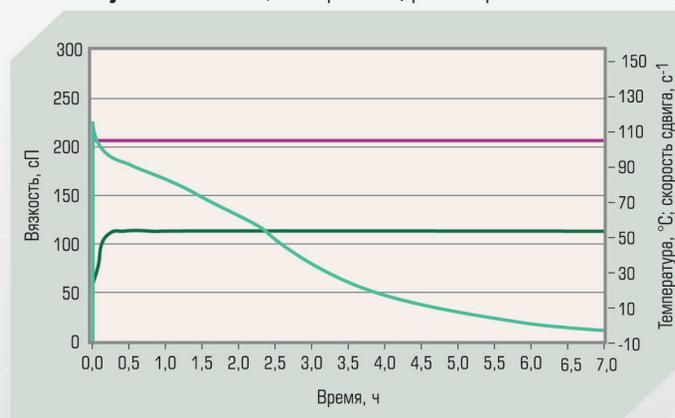
Hydra GEL SW	6,0 кг/м <sup>3</sup>
Hydra BREAK	2,0 кг/м <sup>3</sup>
Геометрия	R1/B5 (OFITE 1100)
Скорость сдвига	100 с <sup>-1</sup> –117,0 оборотов
Температура	50°C
Давление	400 psi

Стабильность синтетической системы  
**Hydra GEL SW** (6 кг/м<sup>3</sup>) при 50°C, p=400 psi в течение 7 часов



— Вязкость  
— Температура  
— Скорость сдвига

Деструкция синтетической системы **Hydra GEL SW** (6 кг/м<sup>3</sup>) —  
**Hydra BREAK** (2 кг/м<sup>3</sup>) при 50°C, p=400 psi в течение 7 часов



— Вязкость  
— Температура  
— Скорость сдвига

