



Какой проппант выгоднее применять: 16/30 или 16/20?



А.В. МОЖЖЕРИН,
к.т.н., генеральный директор
info@aobko.ru

АО «Боровичский комбинат огнеупоров»



А.Ю. КОРЖАВИН,
генеральный директор
tabko@aobko.ru

ООО «Торговый Дом БКО»

A. MOZHZHERIN, «Borovich refractories» JSC, **A. KORZHAVIN,** ООО «Torgovi Dom BKO» LLC



АО «БКО»
Россия, 174411,
Новгородская обл.,
г. Боровичи,
ул. Международная, д. 1

Тел.: +7 (816-64) 9-25-00, 9-20-65
Факс 9-21-95

e-mail: info@aobko.ru
www.aobko.ru

Рассмотрены основные свойства проппантов фракций 16/20 и 16/30 в свете получения максимального эффекта при применении. Испытаниями алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых проппантов показана ошибочность существующего представления, что проппант фракции 16/20 обеспечивает большее увеличение дебета по сравнению с проппантом фракции 16/30. Для доказательства проведены сравнительные испытания проппантов на долговременную проводимость как при стационарных, так и при циклических нагрузках. При давлении 4000 p.s.i. проводимости обоих типов проппантов становятся равными в пределах погрешности измерения, а при давлении более 6000 p.s.i. проводимость алюмосиликатных проппантов фракции 16/30 превышает проводимость проппантов фракции 16/20 обоих типов. Выявлены условия, при которых алюмосиликатные проппанты фракции 16/30 имеют более высокую долговременную проводимость, чем пропанты фракции 16/20: давление закрытия более 6000 p.s.i. (48,2 МПа), наличие нестационарных циклических нагрузок. В этих условиях использование при осуществлении ГРП алюмосиликатных проппантов фракции 16/30 позволит получить более высокий дополнительный дебет, чем при использовании как алюмосиликатных, так и магнезиально-кварцевых проппантов фракции 16/20. Тем самым эффективность использования проппантов фракции 16/30 в указанных условиях будет выше.

Ключевые слова: гидроразрыв пласта (ГРП), алюмосиликатные проппанты, магнезиально-кварцевые пропанты, долговременная проводимость, стационарные нагрузки, циклические нагрузки, давление закрытия трещины

WHICH PROPPANT ARE MORE PROFITABLE TO APPLY: 16/30 OR 16/20?

The article presents arguments based on experimentally obtained data showing that under certain conditions the use of proppants fraction 16/30 allows to increase debit, comparable and even exceeding than using the fraction 16/20.

Keywords: hydraulic fracturing, fracturing proppant aluminosilicate, magnesian-quartz proppant long-term conductivity, stationary loads, cyclic loads, pressure closing cracks

В настоящее время российскими нефтяниками для закрепления трещин ГРП применяются проппанты четырех фракций, из которых две основные: 16/20, и 12/18, и две вспомогательные: 16/30 и 20/40. Выбор нужного размера зерен проппанта определяется целым комплексом факторов. Чем крупнее гранулы, тем большей проницаемостью обладает упаковка проппанта в трещине. Однако использование проппанта крупной фракции сопряжено с дополнительными проблемами при его переносе вдоль трещины. Прочность проппантаснижается с увеличением размеров гранул. Кроме того, в слабосцементированных коллекторах предпочтительным оказывается использование проппанта более мелкой фракции, так как за счет выноса из пласта мелкодисперсных частиц упаковка крупнозернистого проппанта постепенно засоряется и ее проницаемость снижается [1].

С размером фракции связан показатель проектирования ГРП – размер пер-

форационного отверстия. Размер проппанта ГРП должен быть в шесть раз меньше диаметра входного отверстия в обсадной трубе. Если отверстие оказывается недостаточным для прохождения проппанта, происходит закупорка перфораций, поступление проппанта в пласт прекращается, и наблюдается остановка закачки [2].

Проппанты фракций 16/20 и 16/30 имеют одинаковый максимальный размер зерна, поэтому для их применения не требуется изменения размера перфорации, то есть по этому признаку они сопоставимы. У потребителей проппантов имеется устойчивое мнение, что фракция 16/20 обеспечивает большее увеличение дебета, чем 16/30, основанное на геометрическом факторе: крупные гранулы позволяют получить большую проницаемость упаковки проппанта в трещине. Такое мнение основано на непозволительном упрощении реальной ситуации.



Табл. 1. Свойства испытуемых пропантов по ГОСТ Р 51761-2013

Наименование Показателя	Значение показателей для пропантов		
	Алюмосиликатный BORPROP®		Магнезиально-кварцевый 16/20
	16/20	16/30	
Насыпная плотность, г/см³	1,65	1,69	1,55
Сопротивление раздавливанию, % разрушенных гранул при давлении 68,9 МПа (10 kpsi)	19,6	12,5	20,1
Содержание основной фракции, %	95,1	96,5	95,5
Гранулометрический состав, остатки на ситах %:			
12	0	0	0
16	1,3	3,5	1,7
18	53,1	37,3	50,1
20	42,0	40,8	45,4
25	3,3	10,5	2,5
30	0,2	7,9	0,2
40	0,1	0	0,1
Поддон	0	0	0
Сферичность	0,8	0,8	0,8
Округлость	0,8	0,9	0,8

Пропанты фракций 16/20 и 16/30 имеют одинаковый максимальный размер зерна, поэтому для их применения не требуется изменения размера перфорации, то есть по этому признаку они сопоставимы. У потребителей пропантов имеется устойчивое мнение, что фракция 16/20 обеспечивает большее увеличение дебета, чем 16/30, основанное на геометрическом факторе: крупные гранулы позволяют получить большую проницаемость упаковки пропанта в трещине. Такое мнение основано на непозволительном упрощении реальной ситуации.

Как показано в статье [3], сравнение пропантов необходимо производить не по характеристикам ГОСТ Р 51761-2013, а по показателям проводимости (проницаемости) пропантной пачки. Эти показатели наиболее реально отражают эффект от использования пропантов в ГРП. Сравнение проводимости (проницаемости) различных по составу и исполнению пропантов позволяет выделить наиболее подходящий для тех или иных условий эксплуатации. В статье приводятся аргументы, основанные на экспериментально полученных данных, показывающие, что при определенных условиях ис-

пользование пропантов фракции 16/30 позволяет получить увеличение дебета, сравнимое и даже превышающее, чем при использовании фракции 16/20.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДУЕМЫХ ПРОПАНТОВ

Исследования проведены на образцах алюмосиликатных пропантов фракций 16/20, 16/30 и магнезиально-кварцевых пропантов фракции 16/20. Как видно по результатам тестирования по ГОСТ Р 51761-2013 (табл. 1), основные свойства обоих типов пропантов, такие как прочность (сопротивление раздавливанию), содержание основной фракции, сферичность и округлость сопоставимы.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Сравнение пропантов производили путем измерения проводимости пропантной пачки. Измерение проводимости производили по методике ISO 13503-5:2006 на установке, разработанной и изготовленной компанией CorelabInstruments.

Условия проведения измерений проводимости: пластины песчаника из штата Огайо, концентрация пропанта 2 фунта на квадратный фут, температура 121 °С.

Для измерения остаточной проводимости пропантов при циклических нагрузках была использована методика, применяемая лабораторией Stim-Lab [4]. Измерения проводили при режиме циклического нагружения 6kpsi – 3kpsi – 6kpsi (табл. 2), соответствующие наиболее распространенному уровню давления закрытия для трещин ГРП в России.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение проводимости. Результаты измерений проводимости пропантной пачки приведены на рис. 1.

По полученным результатам выявлены следующие закономерности. С увеличением давления закрытия трещины долговременная проводимость

Табл. 2. Режим циклического нагружения

Режим 6kpsi – 3kpsi – 6kpsi
Время выдержки при каждом давлении:
2000 psi – 25 часов
4000 psi – 25 часов
6000 psi – 50 часов
3000 psi – 0 часов – 1 цикл
6000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 2 цикл
6000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 3 цикл
6000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 4 цикл
6000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 5 цикл
6000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 6 цикл
6000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 7 цикл
6000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 8 цикл
6000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 9 цикл
6000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 10 цикл
6000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 11 цикл
6000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 12 цикл
6000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 13 цикл
6000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 14 цикл
6000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 15 цикл
6000 psi – 5 часов
Общее время проведения испытаний – 175 часов

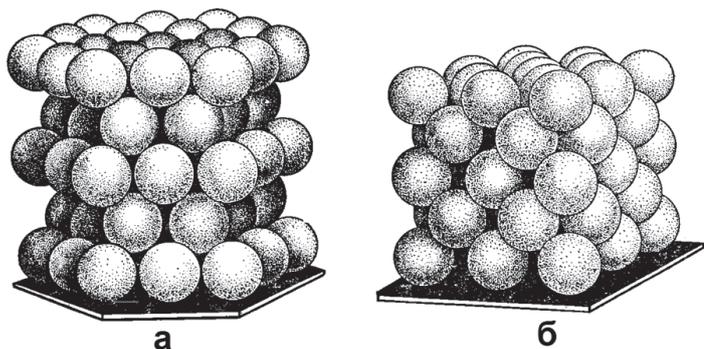


Рис. 2. Плотнейшие упаковки шаров: гексагональная (а), кубическая (б)

пропантой пачки уменьшается. Особенности кроются как в общем изменении проводимости при увеличении давления от 1000 до 10 000 p.s.i.:

- Для алюмосиликатных пропантов фракции 16/20 – 28 643 мД/фут (от 31 520 мД/фут до 2877 мД/фут),
- Для магнезиально-кварцевых пропантов фракции 16/20 – 30 164 мД/фут (от 31 636 мД/фут до 1472 мД/фут),
- Для алюмосиликатных пропантов фракции 16/30 – 21 493 мД/фут (от 25 244 мД/фут до 3751 мД/фут), так и в скорости уменьшения проводимости с ростом давления:
- Для алюмосиликатных пропантов фракции 16/20 – в среднем 3182 мД/фут на каждые 1000 p.s.i.,
- Для магнезиально-кварцевых пропантов фракции 16/20 – 3351 мД/фут на каждые 1000 p.s.i.,
- Для алюмосиликатных пропантов фракции 16/30 – 2388 мД/фут на каждые 1000 p.s.i.

Полифракционный состав алюмосиликатного пропанта 16/30 способствует образованию более плотной упаковки частиц в пачке, за счет чего при малых давлениях (до 4000 p.s.i) долговременная проводимость меньше, чем у остальных пропантов. Но

В процессе эксплуатации скважины происходит закупоривание (кольматация) призабойной зоны намывами мелких (чаще всего глинистых) частиц, выносимых движением жидкости из продуктивных или водоносных слоев. Для очистки фильтрационных каналов призабойной зоны и увеличения притока применяются различные методы, приводящие к нестационарным, циклически меняющимся по величине нагрузкам на пропантную пачку.

этот же полифракционный состав, за счет увеличения числа контактов между частицами, позволяет снизить давление единичных контактов и предотвратить разрушение частиц пропанта при высоких давлениях. (Для монофракционных частиц характерна кубическая укладка с координационным числом 8, для полифракционных – гексагональная укладка с координационным числом 12. С изменением типа упаковки частиц изменяется число частиц, окружающих каждую частицу, а соответственно, и число точечных контактов между ними – рис. 2).

По этой причине, проводимость пропанта фракции 16/30 при давлениях 4000 p.s.i. сначала сравнивается с проводимостью магнезиально-кварцевых пропантов фракции 16/20, а при давлении более 6000 p.s.i. уже превышает по проводимости и алюмосиликатный пропант фракции 16/20.

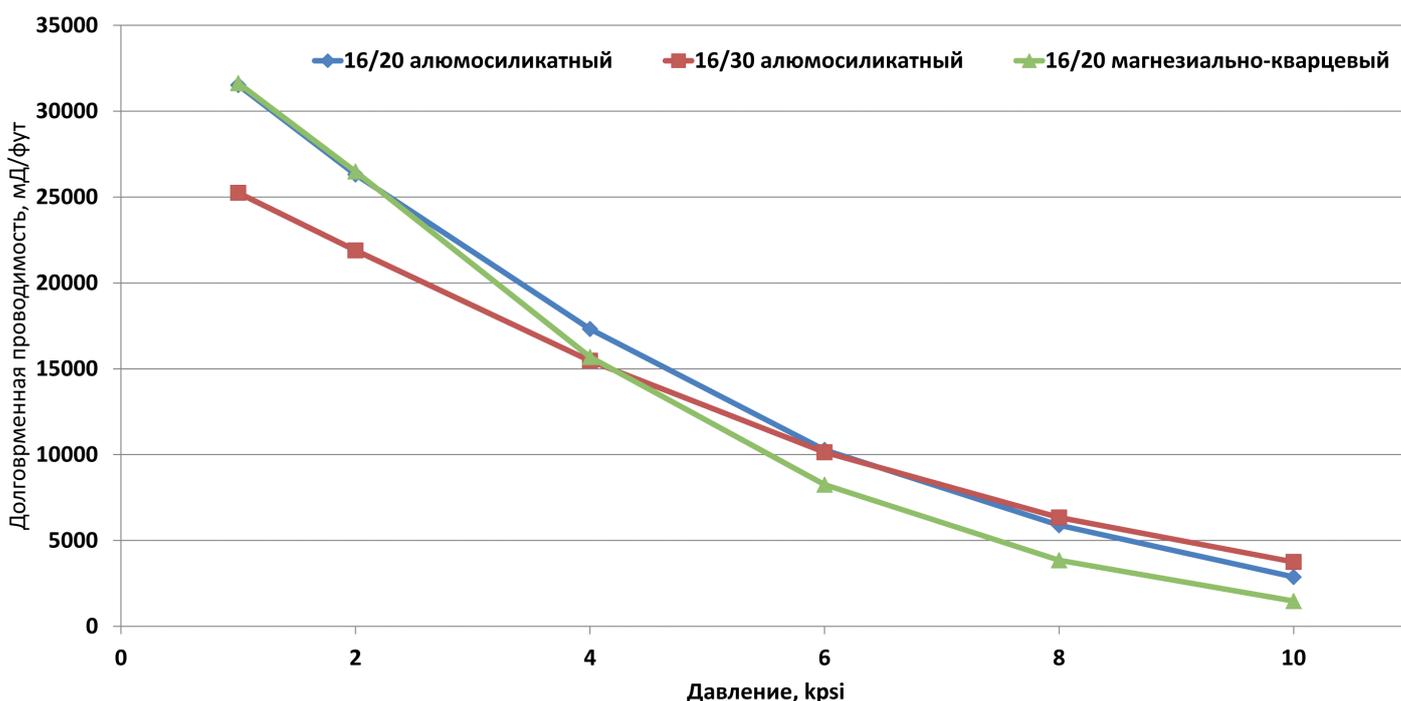


Рис. 1. Графики изменения долговременной проводимости пропантов от давления закрытия

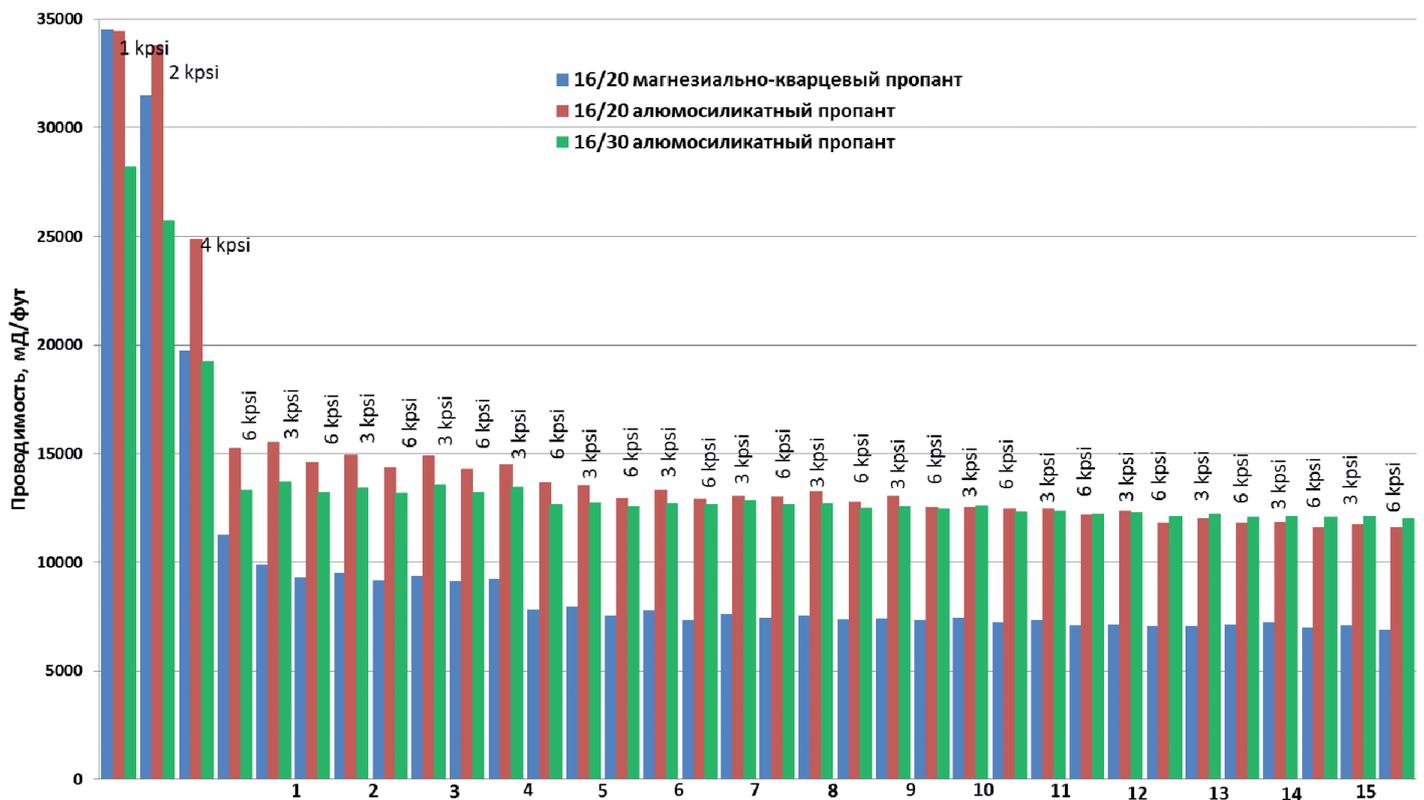


Рис. 3. Результаты измерения остаточной проводимости проппантов в режиме циклического нагружения 6kpsi–3kpsi–6kpsi (15 циклов)

Таким образом, алюмосиликатный проппант фракции 16/30 по эффективности применения превосходит проппанты фракции 16/20 при следующих условиях:

- Магнезиально-кварцевый проппант – при давлении выше 4000 p.s.i.;
- Алюмосиликатный проппант – при давлении выше 6000 p.s.i.;

При давлении 10 000 p.s.i. относительное превосходство алюмосиликатного проппанта фракции 16/30 составляет:

- Над магнезиально-кварцевым проппантом фр.16/20 – в 2,5 раза;
- Над алюмосиликатным проппантом фр.16/20 – в 1,3 раза;

СРАВНЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

В процессе эксплуатации скважины происходит закупоривание (кольматация) призабойной зоны намытыми мелкими (чаще всего глинистыми) частицами, выносимыми движением жидкости из продуктивных или водоносных слоев. Для очистки фильтрационных каналов призабойной зоны и увеличения притока применяются различные методы, приводящие к нестационарным, циклически меняющимся по величине нагрузкам на проппантную пачку. Поэтому изучение устойчивости проппантов к воздействию циклических нагрузок имеет практический интерес.

Определение устойчивости проппантов к воздействию циклических нагрузок производили измерением проводимости в условиях многократного циклического изменения давления на проппантную пачку. Измере-

За счет накопления множественных внутренних напряжений, вызванных полиминеральным составом керамики, имеющим яркие проявления полиморфизма, механическая прочность гранул в условиях длительного воздействия статических и динамических нагрузок значительно снижается, а разрушение гранул на мелкие частицы приобретает обвальный характер, аналогичный разрушению песков.

ния проводили при режиме циклического нагружения 6kpsi – 3kpsi – 6kpsi – 15 циклов. Результаты испытаний приведены на графике рис. 3.

При циклических нагрузках с увеличением количества циклов наблюдается снижение остаточной проводимости. Причем в этом процессе можно отметить некоторую общую взаимосвязь с изменением проводимости при увеличении давления:

- Скорость уменьшения проводимости магнезиально-кварцевых проппантов фракции 16/20 с увеличением количества циклов – максимальная (в среднем 291 мД/фут за 1 цикл), для них же наблюдается максимальное снижение проводимости по окончании испытания (38 %).

- Минимальная скорость уменьшения проводимости с увеличением количества циклов (в среднем 130 мД/фут за 1 цикл) – у алюмосиликатных проппантов фрак-

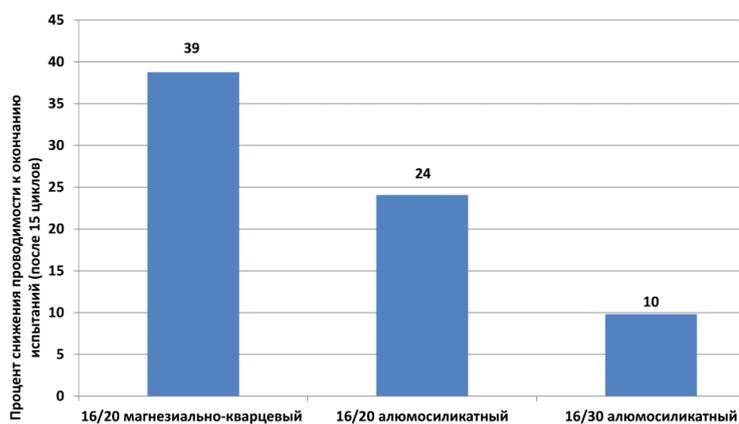


Рис. 4. Сравнение уменьшения проводимости пропантов (в %) по окончании испытания на циклические нагрузки (после 15 циклов)

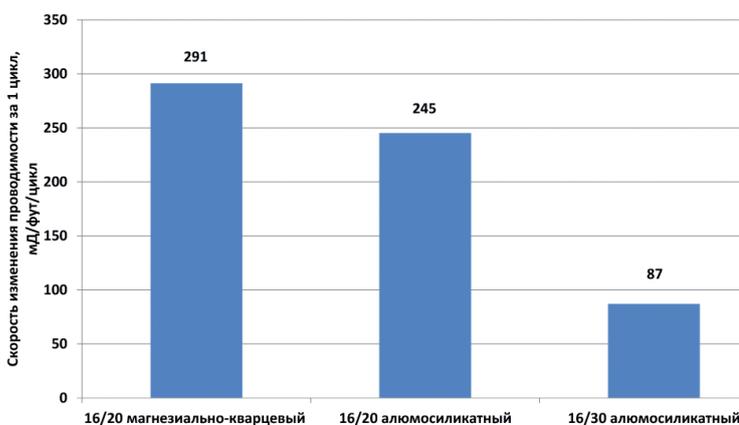


Рис. 5. Сравнение скорости изменения проводимости пропантов пачки за 1 цикл

ции 16/30, у которых наблюдается минимальное снижение проводимости по окончании испытания (9 %).

- Скорость уменьшения проводимости алюмосиликатных пропантов фракции 16/20 с увеличением количества циклов (в среднем 367 мД/фут за 1 цикл) меньше, чем у магнезиально-кварцевых пропантов, но больше, чем у алюмосиликатных пропантов фракции 16/30, а максимальное снижение проводимости по окончании испытания (24 %) (рис. 4, 5).

К окончанию испытаний проводимость алюмосиликатных пропантов фракции 16/30 превышает проводимость алюмосиликатных пропантов фракции 16/20 на 3 %, а магнезиально-кварцевых пропантов фракции 16/20 на 37 %.

Проведенные испытания явились дополнительным подтверждением того, что пониженная долговременная проводимость магнезиально-кварцевых пропантов и значительно более высокая скорость падения остаточной проводимости при длительных и циклических нагрузках обусловлены особенностями их состава и способа производства. За счет накопления множественных внутренних напряжений, вызванных полиминеральным составом керамики, имеющим яркие проявления полиморфизма, механическая прочность гранул в условиях длительного воздействия статических и динамических нагрузок значительно снижается, а разрушение гранул на мелкие частицы приобретает обвальный характер, аналогичный разрушению песков [5]. Поэтому, несмотря на керамический способ производства, магнезиально-силикатные пропанты следует отнести к продукту, за-

нимающему промежуточное положение между керамическими пропантами и песком, и называть их правильнее не керамическими пропантами, а модифицированным песком, тем более что содержание основного компонента SiO_2 в них около 70 %.

Низкая скорость разрушения алюмосиликатного пропанта фракции 16/30 при циклических нагрузках обусловлена их расширенным гранулометрическим составом, за счет которого снижается нагрузка на каждую из гранул и предотвращается их преждевременное разрушение.

Выводы

Проведенными испытаниями показана ошибочность существующего представления, что пропант фракции 16/20 обеспечивает большее увеличение дебета по сравнению с пропантом фракции 16/30.

При давлении 4000 p.s.i. проводимости всех испытанных пропантов становятся равными в пределах погрешности измерения, а при давлении более 6000 p.s.i. проводимость пропантов фракции 16/30 превышает проводимость пропантов фракции 16/20 обоих типов.

Выявлены условия, при которых алюмосиликатные пропанты фракции 16/30 имеют более высокую долговременную проводимость, чем пропанты фракции 16/20:

- Давление закрытия более 6000 p.s.i. (48,2 МПа);
- Наличие нестационарных циклических нагрузок.

В этих условиях использование при осуществлении ГРП алюмосиликатных пропантов фракции 16/30 позволит получить более высокий дополнительный дебет, чем при использовании как алюмосиликатных, так и магнезиально-кварцевых пропантов фракции 16/20. Тем самым эффективность использования пропантов фракции 16/30 в указанных условиях будет выше.

Литература

1. Kuzkin V.A., Krivtsov A.M., Linkov A.M. Computer simulation of effective viscosity of fluid-proppant mixture used in hydraulic fracturing // arXiv:1310.2720 [physics.flu-dyn], 2013.
2. Грамотный подход к перфорационным работам [Электронный ресурс]. URL: http://www.nftn.ru/blog/gramotnyj_podkhod_k_perforacionnym_rabotam/2016-07-16-1830 (дата обращения: 20.05.2017).
3. Можжерин А.В., Коржавин А.Ю. Краш-тест или проводимость? Оценка качества алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых пропантов / Нефтегазовая вертикаль. 2016. № 17. С. 76 – 78.
4. Отчет лаборатории StimLab SL 7944, май 2008.
5. Исследования остаточной проводимости алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых пропантов при циклических нагрузках / А.В. Можжерин и др. // Бурение и нефть. 2017. № 5. С. 42 – 45.

Literature

1. Kuzkin V.A., Krivtsov A.M., Linkov A.M. Computer simulation of effective viscosity of fluid-proppant mixture used in hydraulic fracturing // arXiv:1310.2720 [physics.flu-dyn], 2013.
2. A sound approach to perforating works [Electronic resource]. URL: http://www.nftn.ru/blog/gramotnyj_podkhod_k_perforacionnym_rabotam/2016-07-16-1830 (accessed: 20.05.2017).
3. Mozherin V.A., Korzhavin A.Ju. Crash test or conductivity? Assessment of the quality of aluminosilicate and magnesium-quartz proppants / Neftgazovaya vertical. 2016. № 17. Pp. 76 – 78.
4. The lab report StimLab SL 7944, May 2008.
5. Studies of the residual conductivity of aluminosilicate and magnesium-quartz proppants under cyclic loads / A.V. Mozherin, etc. // Drilling and oil. 2017. № 5. Pp. 42 – 45.