

# Преимущества применения измерения долговременной проводимости перед краш-тестом при оценке пропанта

А.В. МОЖЖЕРИЦ, к. т. н., А.В. САКУЛИН, к. т. н., Ф.Р. ИКСАНОВ, к. т. н., АО «Боровичский комбинат огнеупоров»;  
А.Ю. КОРЖАВИН, ООО «Торговый дом БКО»

## Аннотация

Тестирование двух типов пропантов, предлагаемых российскими производителями, показали преимущество алюмосиликатных пропантов перед магнезиальносиликатными по таким важнейшим характеристикам, как долговременная проводимость и проницаемость при сопоставимых результатах краш-теста. Выявлено, что при давлении свыше 4 kpsi проводимость алюмосиликатных пропантов фракции 16/30 сопротивлением раздавливанию 16% превышает проводимость магнезиально-кварцевых пропантов фракции 16/20 с сопротивлением раздавливанию 12%. Установлено негативное влияние состава магнезиальносиликатных пропантов на формирование дефектной структуры с пониженной прочностью при долговременных и циклических нагрузках, приводящее к обвалному разрушению гранул, характерному для песков.

## Ключевые слова

Гидроразрыв пласта, пропанты алюмосиликатные, пропанты магнезиально-кварцевые, краш-тест, проводимость, проницаемость.

Гидроразрыв пласта (ГРП) является на сегодня наиболее результативным геолого-техническим мероприятием, обеспечивающим кратное увеличение добычи и повышение эффективности разработки низкопроницаемых коллекторов. Увеличение применения ГРП повлекло за собой рост потребления расходных материалов, включая и пропанты.

В России производят два типа пропантов: алюмосиликатные и магнезиально-кварцевые. Они различаются по химико-минеральному составу керамической основы, видам используемого минерального сырья, способу его переработки.

Алюмосиликатные пропанты изготавливают из природных глинистых минералов и бокситов, что обеспечивает постоянство их минералогического состава, физико-химических и специальных технических характеристик.

Магнезиально-кварцевые пропанты было бы точнее назвать магнезиальносиликатными. Их изготавливают из магнезиальносиликатных природных минералов и техногенных отходов с добавлением кварцевого песка.

Для закрепления трещин ГРП в России и странах СНГ применяются пропанты четырех фракций, из которых две основные: 16/20 и 12/18, и две вспомогательные: 16/30 и 20/40. Выбор

нужного размера зерен пропанта определяется целым комплексом факторов.

Чем крупнее гранулы, тем большей проницаемостью обладает упаковка пропанта в трещине, но использование пропанта крупной фракции сопряжено с дополнительными проблемами при его переносе вдоль трещины. К тому же прочность пропанта снижается с увеличением размеров гранул, и, кроме того, в слабосцементированных коллекторах предпочтительным оказывается использование пропанта более мелкой фракции, так как за счет выноса из пласта мелкодисперсных частиц упаковка крупнозернистого пропанта постепенно засоряется и ее проницаемость снижается [1].

С размером фракции связан и еще один показатель проектирования ГРП – размер перфорационного отверстия. Размер пропанта ГРП должен быть в шесть раз меньше диаметра входного отверстия в обсадной трубе. Если отверстие оказывается недостаточным для прохождения пропанта, происходит закупорка перфораций, поступление пропанта в пласт прекращается и наблюдается остановка закачки [2, 3].

Как показано в статье [4], 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 настоящей статье приводятся аргументы, основанные на экспериментально полученных данных, показывающие, что использование алюмосиликатных пропантов всех рабочих фракций с более низкими показателями сопротивления раздавливанию будет значительно выгодным, чем магнезиально-кварцевых с высокими показателями сопротивления

раздавливанию, а при определенных условиях использование пропантов фракции 16/30 позволяет получить увеличение дебита, сравнимое и даже превышающее, чем при использовании фракции 16/20.

#### ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДУЕМЫХ ПРОПАНТОВ

Исследования проведены на образцах алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых пропантов четырех фракций 12/18, 16/20, 16/30, 20/40. В таблице 1 приведены результаты тестирования по ГОСТ Р 51761-2013 (алюмосиликатные пропанты) и ГОСТ Р 54571-2011 (магнезиально-кварцевые). Методы испытаний пропантов по обоим стандартам одинаковы.

**Таблица 1 – Свойства испытываемых пропантов**

Наименование показателя	Фракция 12/18			Фракция 16/20			Фракция 16/30			Фракция 20/40		
	МК 20	АС 30	АС 24	МК 12	АС 27	АС 21	МК 10	АС 16	АС 25	МК 7	АС 8	АС 10
<b>Гранулометрический состав, %</b>												
- остаток на сите № 8 (2,360 мм)	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
- остаток на сите № 12 (1,700 мм)	0,02	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-
- остаток на сите № 14 (1,400 мм)	20,93	0,1	0,3	0	0	0	-	-	-	-	-	-
- остаток на сите № 16 (1,180 мм)	52,92	44,1	45,2	0,5	1,6	1,1	1,17	0,1	0	-	-	-
- остаток на сите № 18 (1,000 мм)	24,96	55,1	53,7	31,9	33,8	33,6	58,95	0,4	0,4	-	-	-
- остаток на сите № 20 (0,850 мм)	0,62	0,7	0,8	65,1	59,1	59,8	38,52	27,7	28,2	0,2	0	0
- остаток на сите № 25 (0,710 мм)							1,29	51,3	47,5	1,2	0	0,2
- остаток на сите № 30 (0,600 мм)	0,29	0	0	2,4	5,3	5,4	0,07	16,8	20,1	86,5	27,7	20,3
- остаток на сите № 35 (0,500 мм)										12	49,2	42
- остаток на сите № 40 (0,425 мм)							0	3,7	3,6	0,1	19,5	26,9
проход через сито № 30 (0,600 мм)	0,09	0	0	0,1	0,2	0,1	0	0	0	0	-	-
проход через сито № 40 (0,425 мм)	-	-	-	0	0	0	0	0	0,2	0	3,4	8,8
проход через сито № 50 (0,300 мм)							0	0	0	0	0,2	1,8
<b>Массовая доля гранул основной фракции, %</b>	98,81	99,3	99,2	99,4	98,2	98,8	98,83	96,2	96,2	99,8	99,7	98
<b>Сопротивление раздавливанию (массовая доля разрушенных гранул), %, при значении давления 68,9 МПа (10 000 psi)</b>	20,5	30,1	23,8	12,7	27,6	21,3	10,8	16,2	25,4	3,5	6,4	10,3
<b>Насыпная плотность, г/см<sup>3</sup></b>	1,56	1,62	1,7	1,65	1,68	1,70	1,65	1,7	1,68	1,62	1,71	1,68
<b>Сферичность</b>	0,9	0,968	0,961	0,961	0,954	0,955	0,962	0,941	0,894	0,967	0,921	0,864
<b>Округлость</b>	0,89	0,907	0,896	0,897	0,888	0,89	0,877	0,878	0,898	0,921	0,888	0,872

Следует отметить, что по данным испытаний все образцы магнезиально-кварцевых пропантов с большим запасом выдержали требования стандарта API RP 60-95 по показателю сопротивление раздавливанию:

- фракция 12/18 – 20,5% при норме не более 25%;
- фракция 16/20 – 12,7% при норме не более 25%;
- фракция 16/30 – 12,7% при норме не более 25%;
- фракция 20/40 – 3,5% при норме не более 10%.

В то же время лишь половина образцов алюмосиликатных пропантов выдержали требования вышеупомянутого стандарта:

- фракция 12/18 – 23,8% и 30,1% при норме не более 25%;
- фракция 16/20 – 21,3% и 27,6% при норме не более 25%;
- фракция 16/30 – 16,2% и 25,4% при норме не более 25%;
- фракция 20/40 – 6,4% и 10,3% при норме не более 10%.

В остальном образцы пропантов обоих типов соответствовали требованиям обоих российских и американского стандартов.

#### ИЗМЕРЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ПРОПАНТОВ



**Рисунок 1 – Установка по определению проводимости и проницаемости пропантов**

Измерение проводимости производили по методике ISO 13503-5:2006 на установке, разработанной и изготовленной компанией Corelab Instruments (рис. 1).

Условия проведения измерений проводимости: пластины песчаника из штата Огайо, концентрация пропанта 2 фунта на квадратный фут, температура 121 °C (250 °F).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерений проводимости пропантной пачки приведены на диаграммах рис. 2–5.

Несмотря на более предпочтительные

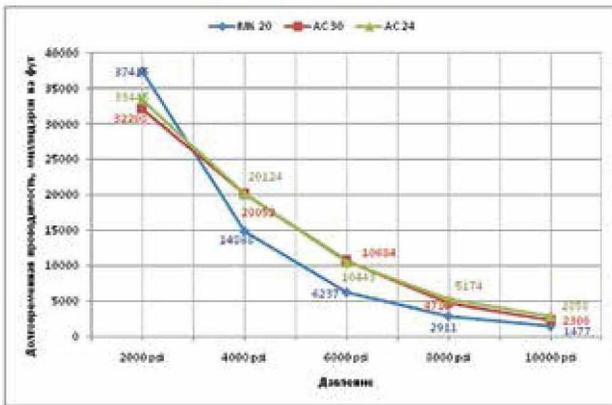
показатели сопротивления раздавливанию у магнезиально-кварцевых пропантов, алюмосиликатные пропанты всех рабочих фракций, даже при показателях, выходящих за рамки требований API PR 60-95, показывают более высокую проводимость по сравнению с алюмосиликатными при давлении свыше 4000 p.s.i., а для крупных фракций (12/18, 16/20) уже при давлении свыше 2000 p.s.i.

С увеличением давления закрытия долговременная проводимость пропантной пачки уменьшается, но при всех уровнях давления, начиная от 4 kpsi и выше, долговременная проводимость алюмосиликатных пропантов выше, чем у магнезиально-кварцевых пропантов, хотя их сопротивление раздавливанию при давлении 10 kpsi ниже.

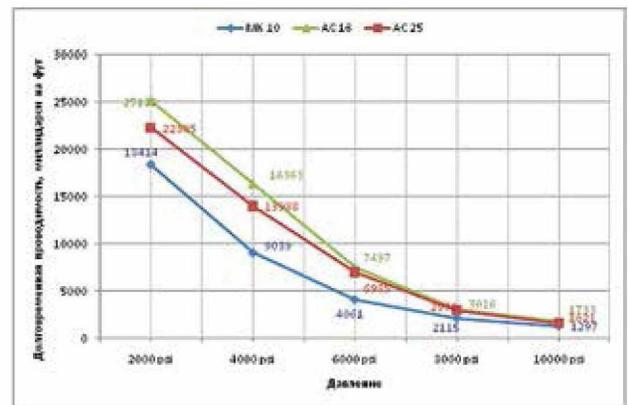
**Для пропантов фракции 12/18** (диаграмма на рис. 2) проводимость магнезиально-кварцевых пропантов при давлении 2 kpsi самая высокая. При давлении 4 kpsi проводимость алюмосиликатных пропантов AC 16 фракции 16/30 превышает проводимость магнезиально-кварцевых пропантов МК 12 фракции 16/20, а при давлении 6 psi проводимость алюмосиликатных пропантов AC 25 фракции 16/30 практически сравнивается с проводимостью магнезиально-кварцевых пропантов МК 12 фракции 16/20. При давлении выше 6 kpsi проводимость любых алюмосиликатных пропантов фракции 16/30 выше, чем магнезиально-кварцевых пропантов фракции 16/20.

**Для пропантов фракции 16/20** (диаграмма на рис. 3) проводимость при давлении 2 kpsi практически одинаковая. Но с повышением давления превышение проводимости алюмосиликатных пропантов становится ощутимым. При давлении 4 kpsi превышение составляет от 15% (для AC 27) до 25% (для AC 21), а при давлении 10 kpsi превышение проводимости алюмосиликатных увеличивается до 34% (для AC 27) и 80% (для AC 21).

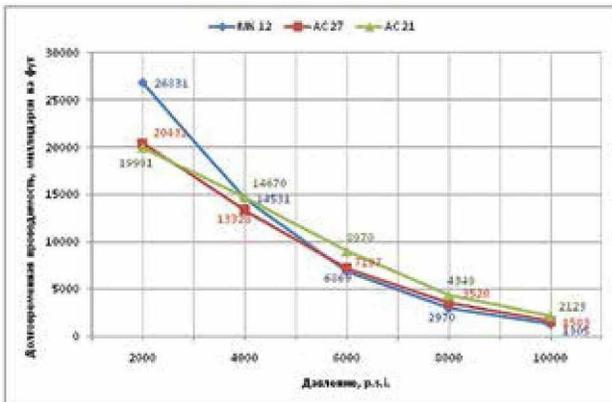
**Для пропантов фракции 16/30** (диаграмма на рис. 4) исходная проводимость при давлении 2 kpsi уже различная: самая высокая у алюмосиликатных пропантов AC 25, на 14% ниже у алюмосиликатных пропантов AC 16, самая низкая – у магнезиально-кварцевых пропантов МК 10. С повышением давления проводимость обоих алюмосиликатных пропантов превышает проводимость магнезиально-кварцевых. Начиная с давления 8 kpsi, проводимость более прочных алюмосиликатных пропантов AC 16 практически сравнивается с проводимостью менее прочных алюмосиликатных пропантов AC 25. Превышение проводимости алюмосиликатных пропантов AC 16 и AC 25 над магнезиально-кварцевыми МК 10 составляет: при давлении 4 kpsi 54% для AC 25



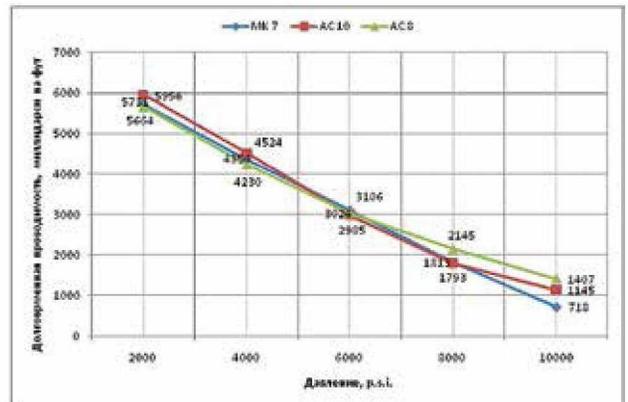
**Рисунок 2 – Диаграммы изменения проводимости испытанных образцов пропантов фракции 12/18. Условные обозначения: МК 20 – магнезиально-кварцевый пропант с сопротивлением раздавливанию 20%, AC 24 – алюмосиликатный пропант с сопротивлением раздавливанию 24%, AC 30 – алюмосиликатный пропант с сопротивлением раздавливанию 30%**



**Рисунок 4 – Диаграммы изменения проводимости испытанных образцов пропантов фракции 16/30. Условные обозначения: МК 10 – магнезиально-кварцевый пропант с сопротивлением раздавливанию 10%, AC 16 – алюмосиликатный пропант с сопротивлением раздавливанию 16%, AC 25 – алюмосиликатный пропант с сопротивлением раздавливанию 25%**



**Рисунок 3 – Диаграммы изменения проводимости испытанных образцов пропантов фракции 16/20. Условные обозначения: МК 12 – магнезиально-кварцевый пропант с сопротивлением раздавливанию 12%, AC 27 – алюмосиликатный пропант с сопротивлением раздавливанию 27%, AC 21 – алюмосиликатный пропант с сопротивлением раздавливанию 21%**



**Рисунок 5 – Диаграммы изменения проводимости испытанных образцов пропантов фракции 20/40. Условные обозначения: МК 7 – магнезиально-кварцевый пропант с сопротивлением раздавливанию 7%, AC 8 – алюмосиликатный пропант с сопротивлением раздавливанию 8%, AC 10 – алюмосиликатный пропант с сопротивлением раздавливанию 10%**

и 81% для AC 16, при давлении 6 kpsi 72% для AC 25 и 84% для AC 16, при давлении 8 kpsi 40% для AC 25 и 42% для AC 16, при давлении 10 kpsi соответственно 25% и 33%.

Для пропантов фракции 20/40 (диаграмма на рис. 5) исходная проводимость при давлении 2 kpsi, как и в случае с пропантами фракции 16/30, тоже различная, однако различие незначительное: самая высокая у алюмосиликатных пропантов AC 10, на 4% ниже у магнезиально-кварцевых пропантов, на 5% ниже – у алюмосиликатных пропантов AC 8. Такое положение сохраняется при

повышении давления до 6 kpsi, при давлении 8 kpsi по проводимости алюмосиликатный пропант AC 8 опережает остальные на 20%, а при давлении 10 kpsi явное преимущество показывают алюмосиликатные пропанты: проводимость алюмосиликатных AC 8 выше, чем у магнезиально-кварцевых на 96%, а у AC 10 – на 60%.

Результаты испытаний показали, что одних только данных краш-теста, изначально разработанного для оценки качества песков, недостаточно для сравнительной оценки

керамических пропантов различной минералогии: алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых.

Наиболее полно о качестве пропантов дают представления только испытания на долговременную проводимость и проницаемость.

Подтвержден тезис о закономерности выявленной ранее зависимости [4]: снижение долговременной проводимости магнезиально-кварцевых пропантов при повышенных нагрузках обусловлено их повышенной интенсивностью разрушения по сравнению с алюмосиликатными. Алюмосиликатные пропанты всех рабочих фракций, несмотря на более низкие показатели сопротивления раздавливанию, а зачастую и выходящие за рамки требований API PR 60-95 по этому показателю, показывают более высокую проводимость по сравнению с алюмосиликатными при давлении свыше 4000 p.s.i., а для крупных фракций (12/18, 16/20, 16/30) уже при давлении свыше 2000 p.s.i.

Проведенные испытания явились дополнительным подтверждением, что пониженная долговременная проводимость магнезиально-кварцевых пропантов и значительно более высокая скорость падения остаточной проводимости при длительных 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 [4]. Поэтому, несмотря на керамический способ производства, магнезиально-кварцевые пропанты следует отнести к продукту, занимающему промежуточное положение между керамическими пропантами и песком, и называть их правильнее не керамическими пропантами, а модифицированным песком, тем более что содержание основного компонента  $\text{SiO}_2$  в них около 70%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенными испытаниями показано:

1. Результаты испытаний пропантов на сопротивление раздавливанию не могут служить основанием для определения преимущества одного вида пропантов над другим. Самые объективные данные по этому вопросу можно получить только по

результатам испытаний на долговременную проводимость (проницаемость).

- Несмотря на более предпочтительные показатели сопротивления раздавливанию у магнезиально-кварцевых пропантов, алюмосиликатные пропанты всех рабочих фракций, даже при показателях, выходящих за рамки требований API PR 60-95, показывают более высокую проводимость по сравнению с алюмосиликатными при давлении свыше 4000 p.s.i., а для крупных фракций (12/18, 16/20) уже при давлении свыше 2000 p.s.i.
2. Не оправдывается тезис о повышенной проводимости любых пропантов фракции 16/20 в сравнении с пропантами фракции 16/30. При давлении 4 kpsi проводимость алюмосиликатных пропантов AC 16 фракции 16/30 превышает проводимость магнезиально-кварцевых пропантов МК 12 фракции 16/20, а при давлении 6 psi проводимость алюмосиликатных пропантов AC 25 фракции 16/30 практически сравнивается с проводимостью магнезиально-кварцевых пропантов МК 12 фракции 16/20. При давлении выше 6 kpsi проводимость любых алюмосиликатных пропантов фракции 16/30 выше, чем магнезиально-кварцевых пропантов фракции 16/20.
  3. Снижение проводимости магнезиально-кварцевых пропантов при долговременной нагрузке обусловлено их повышенной интенсивностью разрушения по сравнению с алюмосиликатными. Повышенная разрушаемость магнезиально-кварцевых пропантов обусловлена накоплением множественных внутренних напряжений, вызванных полиминеральным составом керамики. Проявления полиморфизма снижают механическую прочность гранул в условиях длительного воздействия статических и динамических нагрузок, а разрушение гранул на мелкие частицы приобретает обвальный характер, аналогичный разрушению песков. ●

### ЛИТЕРАТУРА

1. Скурихин В.В., Мигаль В.П. Выбор пропанта: критерии отбора // Нефтяное хозяйство. – 2008. – № 1. – С. 90–93
2. 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
3. Грамотный подход к перфорационным работам / http://www.nftn.ru/blog/gramotnyj\_podkhod\_k\_perforacionnym\_rabotam/2016-07-16-1830
4. Можжерин А.В., Коржавин А.Ю. Краш-тест или проводимость? Оценка качества алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых пропантов // Нефтегазовая вертикаль. – 2016. – № 17. – С. 76–78.