



# Исследования остаточной проводимости алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых пропантов при циклических нагрузках

**А.В. МОЖЖЕРИН,**  
к.т.н., генеральный директор

**А.В. САКУЛИН,**  
к.т.н., главный инженер

**В.В. СКУРИХИН,**  
к.т.н., ведущий инженер-технолог технического отдела  
[info@aobko.ru](mailto:info@aobko.ru)

АО «Боровичский комбинат огнеупоров»

**А.Ю. КОРЖАВИН,**  
генеральный директор

ООО «Торговый Дом БКО»

**A. MOZZHERIN,**  
**A. SAKULIN, V. SKURIKHIN,**  
«Borovichi refractories plant»  
JSC

**A. KORZHAVIN,**  
«Trading house BKO» LLC

*Исследовано изменение остаточной проводимости пропантной пачки в условиях воздействия нестационарных циклически изменяющихся нагрузок. Результаты испытаний выявили практически двухкратное преимущество алюмосиликатных пропантов перед магнезиально-кварцевыми по долговременной проводимости в условиях воздействия как стационарных, так и циклически изменяющихся нагрузок, что обеспечивают им столь же кратную повышенную суммарную накопленную дополнительную добычу углеводородов на длительный период. Магнезиально-кварцевые пропанты, вследствие их обвального разрушения на мелкие фрагменты, не рекомендованы к использованию в условиях воздействия циклических нагрузок.*

**Ключевые слова:** АО «Боровичский комбинат огнеупоров», пропант, проводимость, циклические нагрузки, углеводороды

## STUDIES OF THE RESIDUAL CONDUCTIVITY OF ALUMINO-SILICATE AND MAGNESIAN-QUARTZ PROPPANTS UNDER CYCLIC LOADS

The study the variation of the residual conductivity of the proppants bundles in the conditions of influence of non-stationary cyclical loads. The test results showed two-fold advantage of alumino-silicate proppants in front of magnesian-quartz at the long-term conductivity in terms of exposure to both static and cyclical loads that provide them as a multiple of the increased accumulated total additional production of hydrocarbons for a longer period. Magnesian-quartz proppants, due to their avalanche of destruction into small pieces, not recommended for use in conditions of exposure to cyclic loads.

**Keywords:** «Borovichi refractories plant» JSC, proppant, conductivity, and cyclic loading of hydrocarbons

**В** процессе эксплуатации скважины, на которой выполнен ГРП, пропантная пачка может испытывать различного рода нестационарные нагрузки. Однако особое внимание следует обратить на повторные переменные, или циклические, нагрузки. С этой точки зрения представляет интерес изучение влияния циклических нагрузок на изменение проводимости (проницаемости) пропантной пачки с наполнением различными типами пропантов, производимых в России: алюмосиликатными и магнезиально-кварцевыми. Эти пропанты различаются по химико-минеральному составу керамической основы, видам используемого минерального сырья, способу его переработки [1].

АО «БКО» производит алюмосиликатные пропанты на производственной площадке в России с 1998 г. (г. Боровичи, Новгородская область). В 2016 г. выпущено 275 000 т пропантов, в 2017-м прогнозируется выпуск 300 000 т, в 2018 г.

вводятся дополнительные мощности для увеличения выпуска алюмосиликатных пропантов до 400 000 т. Алюмосиликатные пропанты производятся из природных бокситов российских месторождений с высоким содержанием оксида алюминия, что позволяет их классифицировать как среднепрочный пропант.

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДУЕМЫХ ПРОПАНТОВ

Исследования проведены на образцах алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых пропантах фракции 16/20. Для более корректного анализа были подобраны пропанты с максимально близкими характеристиками. Как видно из результатов 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

Для измерения остаточной проводимости пропантов при циклических нагрузках была использована методика, применяемая лабораторией Stim-Lab [2]. Измерение проводимости осуществляли по методике ISO 13503-5:2006 на установке, разработанной и изготовленной компанией Corelab Instruments.

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

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

Условия проведения измерений проводимости: пластины песчаника из штата Огайо, концентрация пропанта 2 фунта на квадратный фут, температура 121 °С. Измерения проводили при режиме циклического нагружения 6 kpsi – 3 kpsi – 6 kpsi (табл. 2), соответствующем наиболее распространенному уровню давления закрытия для трещин ГРП в России.

По окончании испытаний на установке проводимости/проницаемости, ячейки с пропантами были разобраны и в процессе разборки сделаны фото процесса разборки, пропантов при увеличении 1,5 крат на пластинах песчаника и пропантов после сушки при температуре 50 °С в сушильном шкафу. После сушки был выполнен ситовой анализ гранул до и после измерения проводимости при циклических нагрузках для оценки степени разрушения гранул (по количеству разрушенных) после циклического воздействия высокого давления.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерений проводимости пропантной пачки при циклическом нагружении приведены на диаграмме (рис. 1) – 15 циклов в режиме 6 kpsi–3 kpsi–6kpsi).

По полученным результатам выявлены следующие закономерности.

С увеличением давления закрытия долговременная проводимость пропантой пачки уменьшается, но при всех уровнях давления, начиная от 2 kpsi и выше,

АО «БКО» производит алюмосиликатные пропанты на производственной площадке в России с 1998 г. (г. Боровичи, Новгородская область). В 2016 г. выпущено 275 000 т пропантов, в 2017-м прогнозируется выпуск 300 000 т, в 2018 г. вводятся дополнительные мощности для увеличения выпуска алюмосиликатных пропантов до 400 000 т. Алюмосиликатные пропанты производятся из природных бокситов российских месторождений с высоким содержанием оксида алюминия, что позволяет их классифицировать как среднепрочный пропант.

долговременная проводимость алюмосиликатных пропантов выше, чем у магнезиально-кварцевых пропантов, хотя их прочность (сопротивление раздавливанию при давлении 10 kpsi) практически одинакова. При давлении 6 kpsi превышение составляет 1,56 раза, а после 15 циклов переменных нагрузок увеличивается до 1,74 раза. Эта же тенденция отмечалась в статье [1], что подтверждает тезис о закономерности выявленной ранее зависимости: снижение проводимости обусловлено повышенной интенсивностью разрушения магнезиально-кварцевых пропантов при долговременной нагрузке по сравнению с алюмосиликатными.

При циклических нагрузках с увеличением количества циклов наблюдается снижение остаточной проводимости (рис. 2), причем в этом процессе можно выделить два периода: период с высокой скоростью падения проводимости (с 1 по 5 цикл) и период с малой

Табл. 2. Режим циклического нагружения (время выдержки при каждом давлении)

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



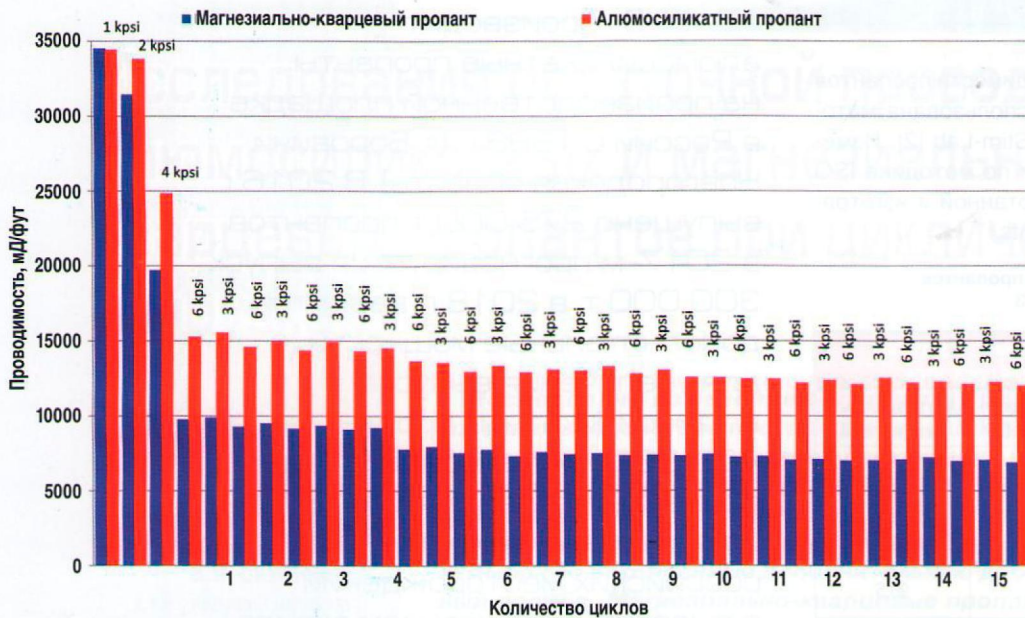


Рис. 1. Результаты измерения остаточной проводимости пропантов в режиме циклического нагружения 6kpsi–3kpsi– 6kpsi (15 циклов)

скоростью падения проводимости (с 5 по конечный цикл). При испытании в режиме 6kpsi–3kpsi– 6kpsi в первый период скоростью падения проводимости алюмосиликатных пропантов в среднем 418 миллидарси на фут за 1 цикл, магнезиально-силикатных – 450 миллидарси на фут за 1 цикл, во второй период скорость падения проводимостикратно снижается: у алюмосиликатных пропантов в среднем до 103 миллидарси на фут за 1 цикл, магнезиально-силикатных – до 87 миллидарси на фут за 1 цикл. В целом, падение проводимости у магнезиально-кварцевых пропантов при любом из режимов циклического нагружения в 1,4 раза превышает аналогичный показатель алюмосиликатных пропантов.

Для подтверждения гипотезы о том, что причиной снижения проводимости магнезиально-кварцевых пропантов является повышенная интенсивность разрушения при циклических нагрузках по сравнению с алюмосиликатными, был выполнен ситовой анализ обоих типов пропантов после испытания в сравнении с исходными (табл. 3). После проведения испытаний на проводимость при циклических нагрузках на пропантах магнезиально-кварцевого состава отмечено разрушение гранул значительно в большей степени и перераспределение размеров гранул пропантов в сторону мелких фракций, чем на пропантах алюмосиликатного состава.

Табл. 3. Ситовой анализ пропантов до и после испытаний на циклическую проводимость в режиме 6kpsi–3kpsi– 6kpsi (15 циклов)

Проба	Остатки на ситах, %							Содержание основной фракции, %
	16	18	20	25	30	40	под	
<b>Магнезиально-кварцевый пропант</b>								
До	1,7	50,1	45,4	2,9	0,2	0,1	0	95,5
После	1,0	26,7	35,2	8,8	5,7	10,2	12,4	61,9
Δ	-0,7	-23,4	-10,2	+5,9	+5,5	+10,1	+12,4	-33,6
<b>Алюмосиликатный пропант</b>								
До	1,3	53,1	42,0	3,3	0,2	0,1	0	95,1
После	1,1	47,3	30,8	5,7	3,1	5,4	6,6	78,1
Δ	-0,2	-5,8	-11,2	+2,4	+2,9	+5,3	+6,6	-16,0

Уменьшение долговременной проводимости пропантной пачки всегда является следствием увеличения доли разрушившихся гранул. Продукты разрушения не выносятся из пачки, а заполняют пространство (поры) между гранулами, снижая размер пор. Это хорошо видно на фото пропантов после окончания испытания на измерение остаточной проводимости при циклических нагрузках. Здесь следует обратить внимание на степень увеличения тонких фракций. По данным ситового анализа и на фотографиях видно, что если алюмосиликатные пропанты (рис. 3: Б, Г, Е, З, К) разрушаются на две-три практически равные по объему частицы, то для магнезиально-силикатных пропантов присуще разрушение на множество мелких частиц (рис. 3: А, В, Д, Ж, И), больше характерное для песков.

Известно, что нагрузки, циклически изменяющиеся во времени по величине или по величине и по знаку, могут привести к разрушению конструкции при напряжениях, существенно меньших, чем предел текучести (или предел прочности). Такое разрушение принято называть «усталостным». Материал «устает» под действием многократных периодических нагрузок. Циклические нагрузки ускоряют процесс разрушения магнезиально-кварцевых пропантов, делая их не пригодными к применению в данных условиях

Проведенные испытания явились 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 обвалный характер, аналогичный разрушению песков. Поэтому, несмотря на керамический способ производства,



магнезиально-силикатные 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 %.

Известно, что нагрузки, циклически изменяющиеся во времени по величине или по величине и по знаку, могут привести к разрушению конструкции при напряжениях, существенно меньших, чем предел текучести (или предел прочности). Такое разрушение принято называть «усталостным». Материал «устает» под действием многократных периодических нагрузок. Циклические нагрузки ускоряют процесс разрушения магнезиально-кварцевых пропантов, делая их не пригодными к применению в данных условиях.

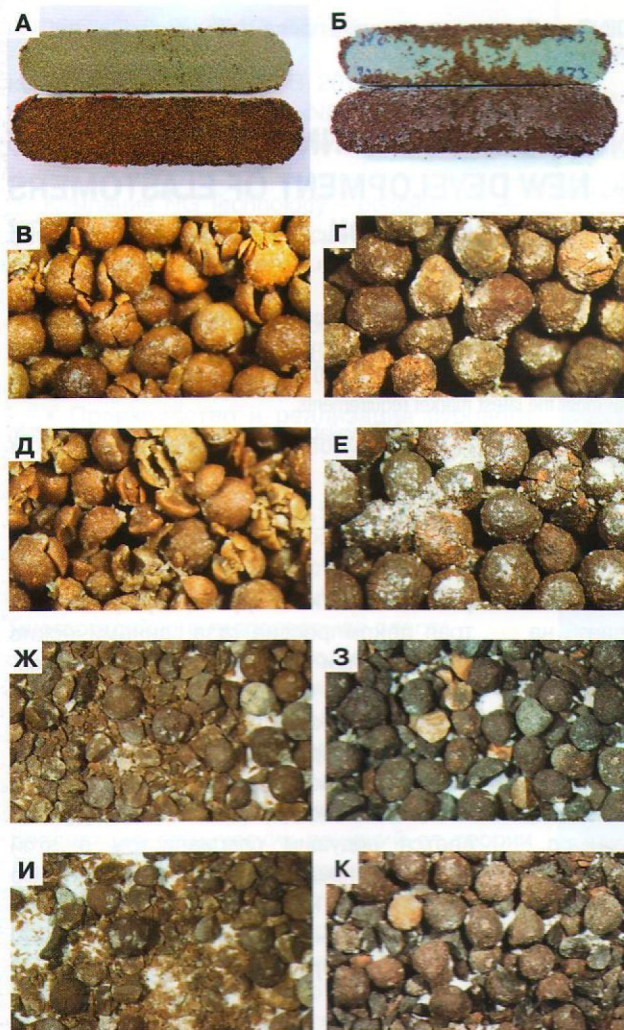


Рис. 3. Внешний вид пропантов после испытания на измерение остаточной проводимости при циклических нагрузках в режиме 6000 – 3000 – 6000 psi

А – фото магнезиально-кварцевых пропантов на пластинах песчанника сразу после испытания; Б – фото алюмосиликатных пропантов BORPROP на пластинах песчанника сразу после испытания; В, Д – фото магнезиально-кварцевых пропантов после сушки при увеличении 1,5х; Е, Ф – фото алюмосиликатных пропантов после сушки при увеличении 1,5х; Ж, И – фото разрушенных гранул магнезиально-кварцевых пропантов; З, К – фото разрушенных гранул алюмосиликатных пропантов



Рис. 2. Обработка результатов измерения остаточной проводимости пропантов в режиме циклического нагружения 6kpsi–3kpsi–6kpsi (15 циклов)

Проведенными испытаниями явились 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.

Проведенные испытания подтвердили необходимость проведения испытаний на долговременную проводимость/проницаемость при оценке преимуществ/недостатков пропантов того или иного типа. Результаты испытаний подтвердили двухкратное преимущество по этому показателю алюмосиликатных пропантов перед магнезиально-кварцевыми, что обеспечивают им столь же кратную повышенную суммарную накопленную дополнительную добычу углеводородов на длительный временной период.

На основании полученных результатов можно сделать заключение, что применение магнезиально-кварцевых пропантов при давлениях закрытия более 5000 psi нецелесообразно, по причине обвальной неконтролируемой потери проводимости и проницаемости из-за ускоренного разрушения гранул.

#### Литература

1. Можжерин А.В., Коржавин А.Ю. Краш-тест или проводимость? Оценка качества алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых пропантов // Нефтегазовая вертикаль. 2016. № 17. С. 76 – 78.
2. Отчет лаборатории StimLab SL 7944, май 2008.

#### Literature

1. Mozzherin A.V., Korzhavin A.Ju. Crash test or conductivity? Assessment of the quality of aluminosilicate and magnesian-quartz proppants // Neftegazovaya vertical. 2016. No. 17. Pp. 76 – 78.
2. The lab report StimLab SL 7944, May 2008.