



Влияние циклических нагрузок на остаточную проводимость алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых пропантов



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

АО «Боровичский комбинат огнеупоров»



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

ООО «Торговый Дом БКО»

A. MOZHZHERIN, «Borovichi Refractories Plant» JSC,
A. KORZHAVIN, «Trade House BRP» 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

Исследовано изменение остаточной проводимости пропантной пачки в условиях воздействия нестационарных циклически изменяющихся нагрузок. Выявлены закономерности изменения проводимости при различных уровнях давления, абсолютного изменения давления одного цикла и количества циклов. Установлено практически двукратное преимущество алюмосиликатных пропантов перед магнезиально-кварцевыми по долговременной проводимости в условиях воздействия как стационарных, так и циклически изменяющихся нагрузок, что обеспечивает 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: гидроразрыв пласта, циклические нагрузки на пласт, пропанты, алюмосиликатные и магнезиально-кварцевые

INFLUENCE OF CYCLIC LOADS ON THE RESIDUAL CONDUCTIVITY OF ALUMOSILICATE AND MAGNEZIC-QUARTZ PROTOPANTS

The change in the residual conductivity of a proppant pack under the influence of unsteady cyclically varying loads is investigated. The regularities of the change in conductivity at different pressure levels, the absolute change in the pressure of one cycle, and the number of cycles are revealed. Almost double the advantage of aluminosilicate proppants in front of magnezian-quartz by long-term conductivity under the influence of both stationary and cyclically varying loads has been established, which provides them with the same multiple accumulated additional hydrocarbon production for a long period. Magnezian-quartz proppants, due to their collapse to small fragments, are not recommended for use under conditions of cyclic loads.

Keywords: hydraulic fracturing of the reservoir, cyclic loads on the formation, aluminosilicate and magnezian-quartz proppants



Рис. 1. Установка по определению проводимости и проницаемости пропантов

УДК 622.234.573: 666.363.4: 666.651.2:546.46:623.284

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, производимыми в России: алюмосиликатными и магнезиально-кварцевыми. Эти пропанты различаются по химико-минеральному составу керамической основы, видам используемого минерального сырья, способам его переработки [1]. Первичные данные измерений остаточной про-

Табл. 2. Режим циклического нагружения

Режим 6 kpsi – 3 kpsi – 6 kpsi	Режим 8 kpsi – 4 kpsi – 8 kpsi
Время выдержки при каждом давлении:	
2000 psi – 25 часов	2000 psi – 25 часов
4000 psi – 25 часов	4000 psi – 25 часов
6000 psi – 50 часов	6000 psi – 50 часов
	8000 psi – 50 часов
3000 psi – 0 часов – 1-й цикл	4000 psi – 0 часов – 1-й цикл
6000 psi – 5 часов	8000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 2-й цикл	4000 psi – 0 часов – 2-й цикл
6000 psi – 5 часов	8000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 3-й цикл	4000 psi – 0 часов – 3-й цикл
6000 psi – 5 часов	8000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 4-й цикл	4000 psi – 0 часов – 4-й цикл
6000 psi – 5 часов	8000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 5-й цикл	4000 psi – 0 часов – 5-й цикл
6000 psi – 5 часов	8000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 6-й цикл	4000 psi – 0 часов – 6-й цикл
6000 psi – 5 часов	8000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 7-й цикл	4000 psi – 0 часов – 7-й цикл
6000 psi – 5 часов	8000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 8-й цикл	4000 psi – 0 часов – 8-й цикл
6000 psi – 5 часов	8000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 9-й цикл	4000 psi – 0 часов – 9-й цикл
6000 psi – 5 часов	8000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 10-й цикл	4000 psi – 0 часов – 10-й цикл
6000 psi – 5 часов	8000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 11-й цикл	4000 psi – 0 часов – 11-й цикл
6000 psi – 5 часов	8000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 12-й цикл	4000 psi – 0 часов – 12-й цикл
6000 psi – 5 часов	8000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 13-й цикл	4000 psi – 0 часов – 13-й цикл
6000 psi – 5 часов	8000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 14-й цикл	4000 psi – 0 часов – 14-й цикл
6000 psi – 5 часов	8000 psi – 5 часов
3000 psi – 0 часов – 15-й цикл	4000 psi – 0 часов – 15-й цикл
Общее время проведения испытаний	
175 часов	225 часов

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

Наименование показателя	Значение показателей для пропантов	
	Алюмосиликатный BORPROP®	Магнезиально-силикатный
Насыпная плотность, г/см ³	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
Гранулометрический состав, остатки на ситах, %:		
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

димости пропантов при режиме циклического нагружения 6 kpsi – 3 kpsi – 6 kpsi были опубликованы [2], после чего от специалистов Санкт-Петербургского ООО «Газпромнефть НТЦ» были получены ряд ценных замечаний и предложений по углубленному изучению проблемы. Результаты первичных и дополнительных испытаний рассмотрены в настоящей статье.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДУЕМЫХ ПРОПАНТОВ

Исследования проведены на образцах алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых пропантов 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

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

НАША СПРАВКА АО «БКО» производит алюмосиликатные пропанты на производственной площадке в России с 1998 г. (г. Боровичи, Новгородская область). В 2016 г. выпущено 275 000 тонн пропантов, в 2017 г. – 310 000 тонн, в 2018 г. вводятся дополнительные мощности для увеличения выпуска алюмосиликатных пропантов до 400 000 тонн. Алюмосиликатные пропанты производятся из природных бокситов российских месторождений с высоким содержанием оксида.

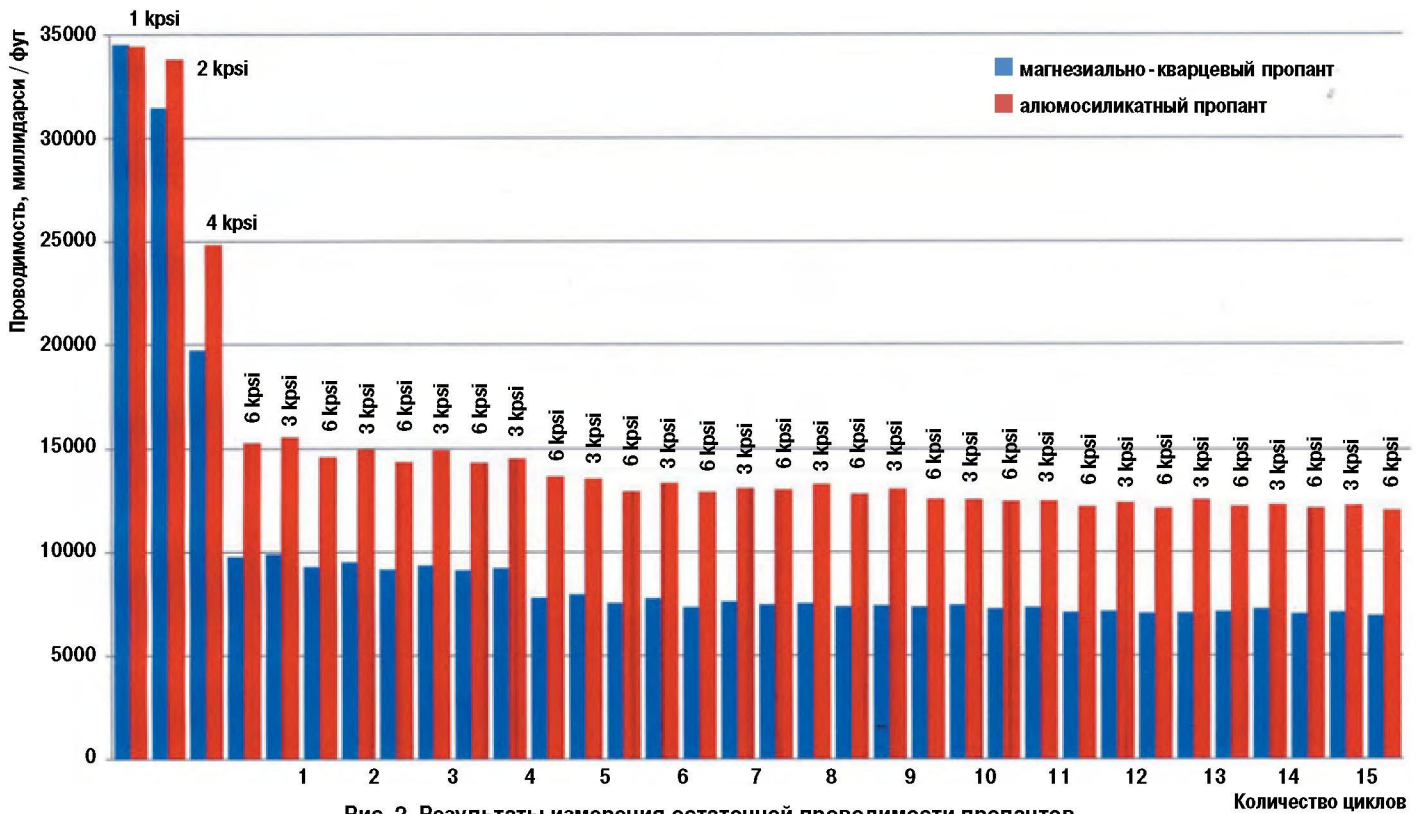


Рис. 2. Результаты измерения остаточной проводимости пропантов в режиме циклического нагружения 6 kpsi – 3 kpsi – 6 kpsi (15 циклов)

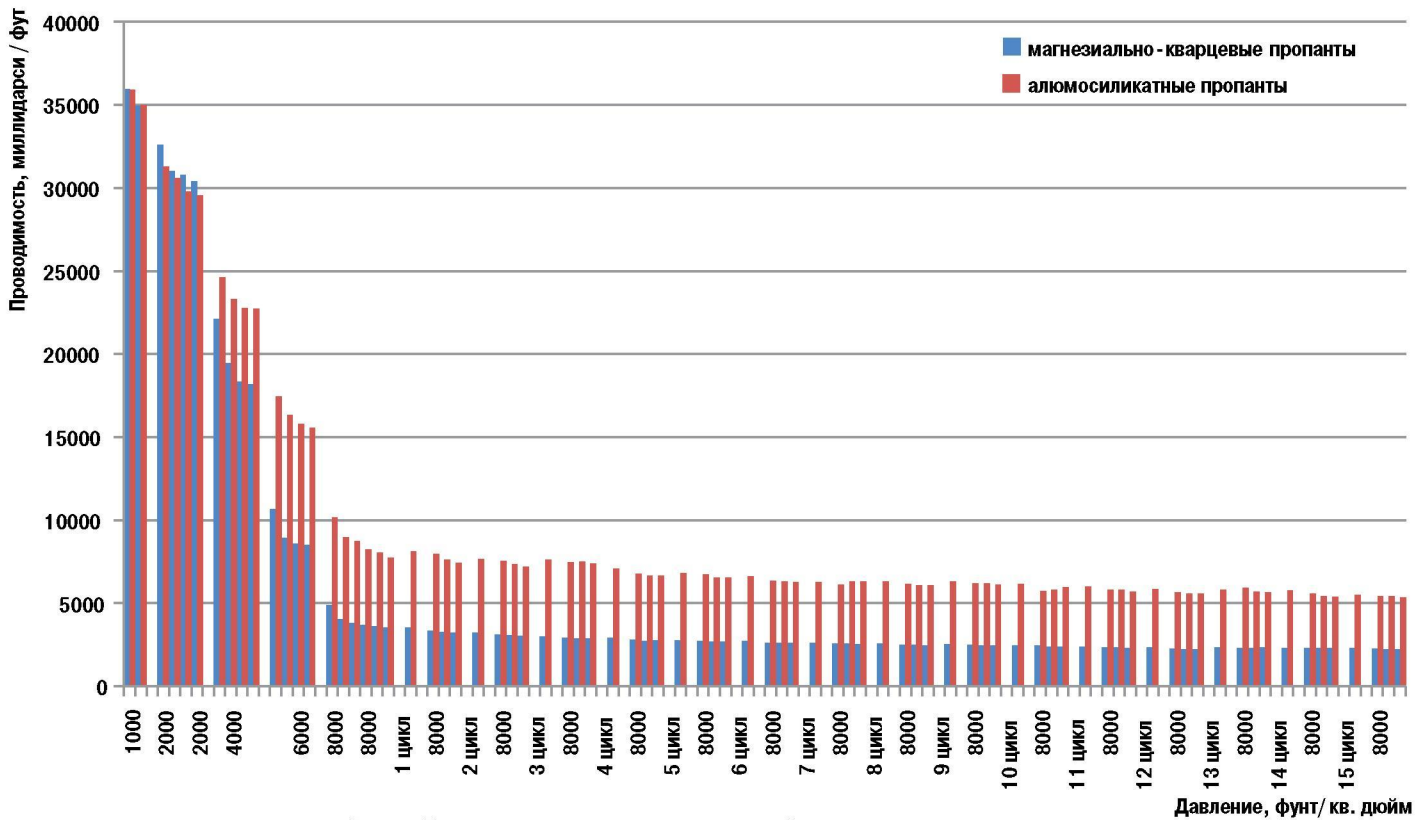


Рис. 3. Результаты измерения остаточной проводимости пропантов в режиме циклического нагружения 8 kpsi – 4 kpsi – 8 kpsi (15 циклов)

Условия проведения измерений проводимости: пластины песчаника из штата Огайо, концентрация пропантанта 2 – фунта на квадратный фут, температура – 121 °С. Измерения проводили при режиме циклического нагружения 6 kpsi – 3 kpsi – 6 kpsi и 8 kpsi – 4 kpsi – 8 kpsi (табл. 2),

соответствующие наиболее распространенному уровню давления закрытия для трещин ГРП в России.

Дополнительно были выполнены измерения проводимости в режиме циклического нагружения 6 kpsi – 3 kpsi – 6 kpsi при количестве циклов, рав-



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, производимыми в России: алюмосиликатными и магнезиально-кварцевыми.

ном 92, для выявления закономерности изменения проводимости/проницаемости при количестве испытаний, приближающемся к бесконечности.

По окончании испытаний на установке проводимости/проницаемости ячейки с пропантами были разобраны, сделаны фото процесса разборки, пропанты после испытания 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 в режиме 6 kpsi – 3 kpsi – 6 kpsi (15 циклов) приведены на диаграмме рис. 2, в режиме 8 kpsi – 4 kpsi – 8 kpsi (15 циклов) – на диаграмме рис. 3.

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, 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, при давлении 8 kpsi превышение составляет 2,2 раза, а после 15 циклов переменных нагрузок увеличивается до 2,4 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.

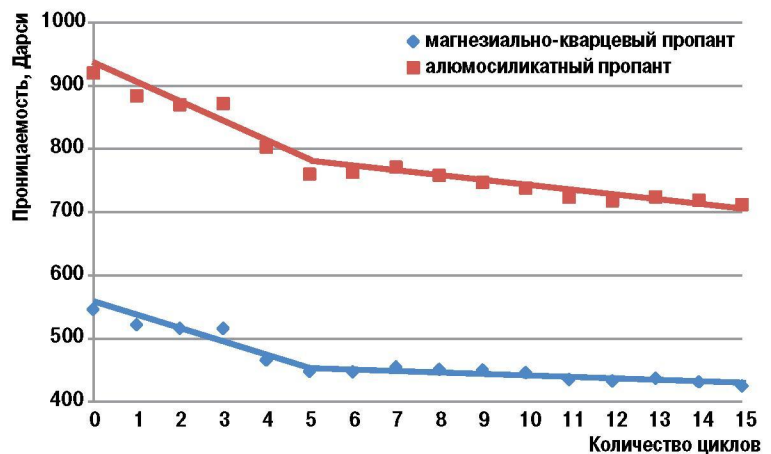


Рис. 4. Обработка результатов измерения остаточной проводимости пропантов в режиме циклического нагружения 6 kpsi – 3 kpsi – 6 kpsi (15 циклов)

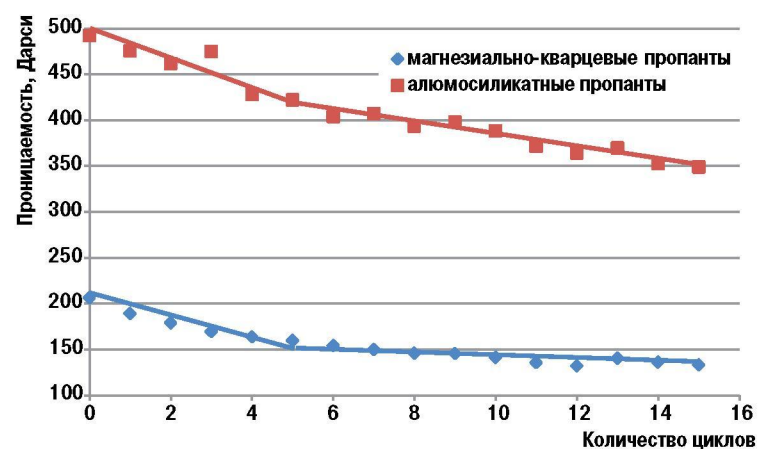


Рис. 5. Обработка результатов измерения остаточной проводимости пропантов в режиме циклического нагружения 8 kpsi – 4 kpsi – 8 kpsi (15 циклов)

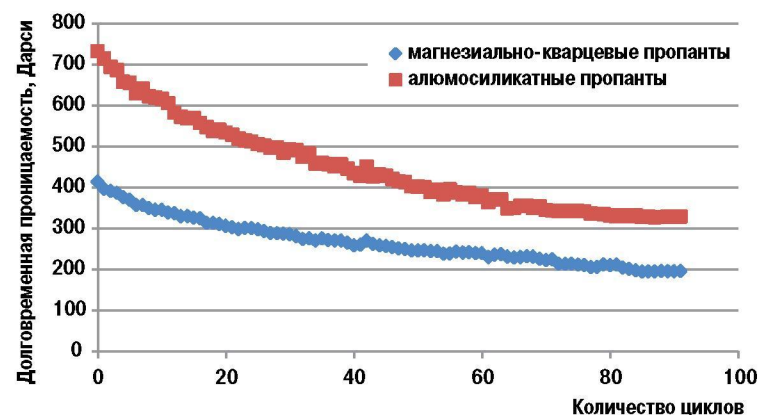


Рис. 6. Изменение проницаемости пропантов в режиме циклического нагружения 8 kpsi – 4 kpsi – 8 kpsi (92 цикла)

Рассмотрим результаты изменения проницаемости при циклических нагрузках за первые 15 циклов (графики на рис. 4 и 5): с увеличением количества циклов наблюдается снижение остаточной проводимости, причем в этом процессе можно выделить два периода: период с высокой скоростью падения проводимости (с 1-го по 5-й цикл) и период с малой скоростью падения проводимости (с 5-го по конечный цикл).

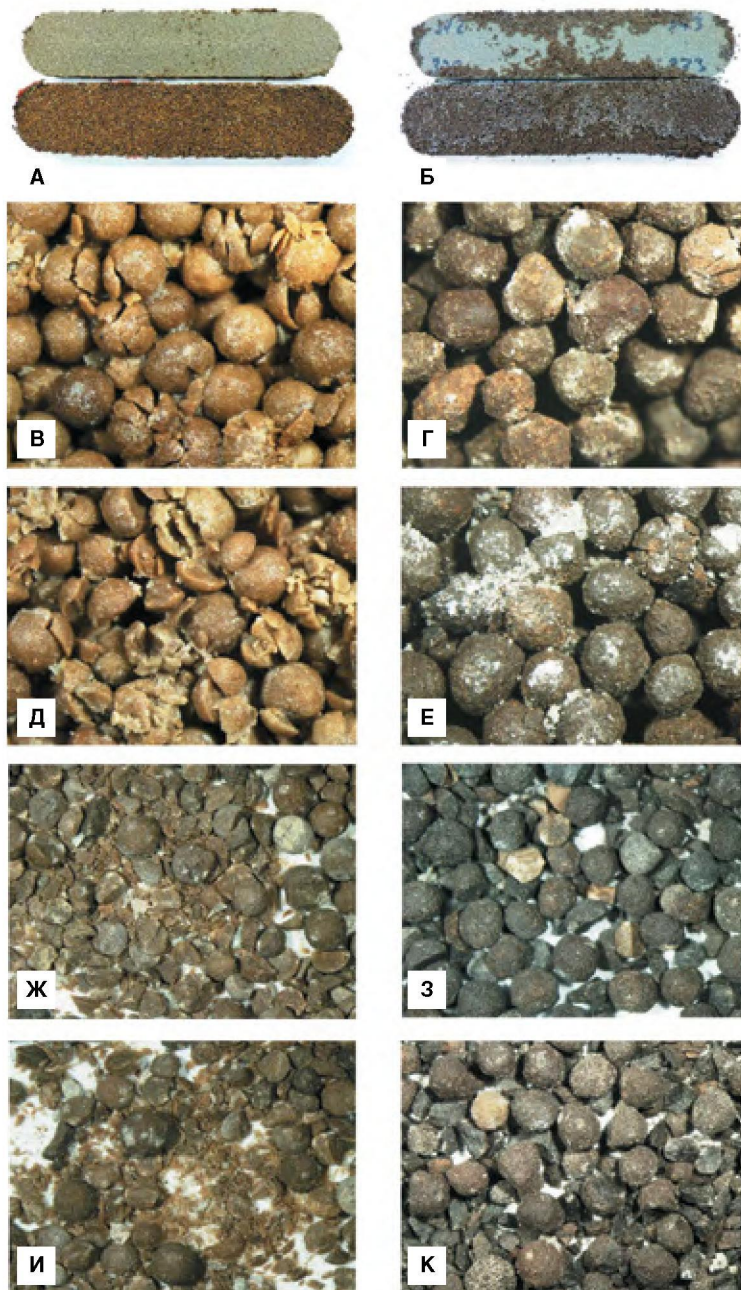


Рис. 7. Внешний вид пропантов после испытания на измерение остаточной проводимости при циклических нагрузках в режиме 6000 – 3000 – 6000 psi

Условные обозначения:

А – фото магнизиально-кварцевых пропантов на пластинах песчаника сразу после испытания; Б – фото алюмосиликатных пропантов BORPROP® на пластинах песчаника сразу после испытания; В, Д – фото магнизиально-кварцевых пропантов после сушки при увеличении 1,5x; Г, Е – фото алюмосиликатных пропантов после сушки при увеличении 1,5x; Ж, И – фото разрушенных гранул магнизиально-кварцевых пропантов; К – фото разрушенных гранул алюмосиликатных пропантов.

При испытании в режиме 6 kpsi – 3 kpsi – 6 kpsi в первый период скоростью падения проницаемости алюмосиликатных пропантов в среднем 16 дарси за 1 цикл, магнизиально-силикатных – 9 дарси за 1 цикл, во второй период скорость падения проницаемостикратно снижается: у алюмосиликатных пропантов в среднем, до 8 дарси за 1 цикл, магнизиально-силикатных – до 4 дарси за 1 цикл. В целом падение проницаемости у магнизиально-кварцевых пропан-

Проведенные испытания явились подтверждением того, что пониженная долговременная проводимость магнизиально-кварцевых пропантов и значительно более высокая скорость падения остаточной проводимости при длительных и циклических нагрузках обусловлены особенностями их состава и способа производства.

тов при любом из режимов циклического нагружения в 1,7 раза превышает аналогичный показатель алюмосиликатных пропантов.

При испытании в режиме 8 kpsi – 4 kpsi – 8 kpsi в первый период скоростью падения проницаемости алюмосиликатных пропантов в среднем, 12 дарси за 1 цикл, магнизиально-силикатных – 8 дарси за 1 цикл; во второй период скорость падения проницаемостикратно снижается: у алюмосиликатных пропантов в среднем, до 7 дарси за 1 цикл, магнизиально-силикатных – до 3 дарси за 1 цикл. В целом падение проницаемости у магнизиально-кварцевых пропантов при любом из режимов циклического нагружения в 2,4 раза превышает аналогичный показатель алюмосиликатных пропантов.

Измерения проницаемости пропантов в режиме циклического нагружения 6 kpsi–3 kpsi–6 kpsi при количестве циклов, равном 92 (количестве испытаний, приближающемся к бесконечности – рис. 6), выявили следующую закономерность: независимо от типа пропанта по мере увеличения количества циклов скорость снижения проницаемости уменьшается, а график изменения проницаемости представляет собой асимптотическую кривую с горизонтальной асимптотой, соответствующей предельному значению проводимости при заданном режиме испытаний.

Таким образом, при увеличении количества циклов нагружения во время проведения испытаний пропант, вне зависимости от типа, разрушается не полностью, а до определенной степени.

Очевидно, что предельное значение проводимости пропантов при бесконечном увеличении циклов нагружения зависит от:

- Условий проведения испытаний: максимального и минимального давления цикла,
- Типа пропанта, с которым связаны его механические характеристики, такие как долговременная прочность (способность противостоять длительным и переменным нагрузкам).

Испытаниями установлено, что алюмосиликатные пропанты достигают предельного значения проводимости 330 Дарси уже через 77 циклов, а магнизиально-кварцевые пропанты – 195 Дарси только через 85 циклов. В целом, предельное значение проводимости алюмосиликатных пропантов в 1,7 раза выше, чем магнизиально-кварцевых. Т.е. чем прочнее пропанты, тем быстрее достигается равновесное состояние при данных условиях испытаний.



Испытания показали, что стандартные методы испытаний пропантов по ISO 13503-2:2006, ГОСТ Р 51761-2013, ГОСТ Р 54571-2011 не полностью отражают их служебные (эксплуатационные) характеристики. Более объективно его можно оценить по измерению показателей проводимости/проницаемости как при стационарных, так и при циклически изменяющихся нагрузках.

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.

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. 7 Б, Г, Е, З, К) разрушаются на две-три практические равные по объему частицы, то для магнезиально-силикатных пропантов присуще разрушение на множество мелких частиц (рис. 7 А, В, Д, Ж, И), больше характерное для песков.

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-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 SiO₂ 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 разру-

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

Проба	Остатки на ситах, %							Содержание основной фракции, %
	16	18	20	25	30	40	под	
Магнезиально-кварцевый пропант								
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
Алюмосиликатный пропант								
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

шения магнезиально-кварцевых пропантов, делая их непригодными к применению в данных условиях.

Выводы

Проведенные испытания подтвердили необходимость проведения испытаний на долговременную проводимость/проницаемость при оценке преимуществ/недостатков пропантов того или иного типа. Результаты испытаний подтвердили практически двукратное 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.

В условиях нестационарных циклически изменяющихся нагрузок проводимость/проницаемость пропантов дополнительно снижается вдвое, но соотношение проводимости алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых пропантов при одинаковых условиях испытаний остается неизменным при любом количестве циклов.

На основании полученных результатов можно сделать заключение, что применение магнезиально-кварцевых пропантов при давлениях закрытия более 5000 psi, а также в условиях циклически изменяющихся нагрузок нецелесообразно, по причине обвалной 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. Можжерин А.В. и др. Исследования остаточной проводимости алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых пропантов при циклических нагрузках // Бурение и нефть. 2017. № 5. С. 42–45.

Reference

1. Mozherin A.V., Korzhavin A.Ju. Crash-test ili provodimost' Otsenka kachestva alyumosilikatnykh i magnezial'no-kvartseyvykh propantov [Crash test or conductivity? Evaluation of the quality of aluminosilicate and magnezian-quartz proppants]. *Neftgazovaya vertikal'* [Neftgazovaya vertical], 2016, no. 17, pp. 76–78.
2. Mozherin A.V. i drugie . Issledovaniya ostatochnoy provodimosti al-yumosilikatnykh i magnezial'no-kvartseyvykh propantov pri tsiklicheskih nagruzkakh [Investigations of the residual conductivity of aluminosilicate and magnezian-quartz proppants under cyclic loads]. *Burenije i nef't'* [Drilling and oil], 2017, no. 5, pp. 42–45. ■