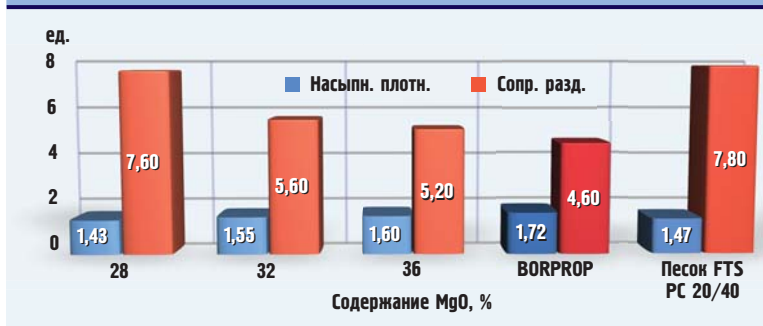


КРАШ-ТЕСТ ИЛИ ПРОВОДИМОСТЬ?

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ И МАГНЕЗИАЛЬНО-КВАРЦЕВЫХ ПРОППАНТОВ

Тестирование двух типов проппантов, предлагаемых российскими производителями, показали преимущество алюмосиликатных проппантов перед магнезиально-силикатными по таким важнейшим характеристикам, как долговременная проводимость и проницаемость при сопоставимых результатах краш-теста. Установлено негативное влияние состава магнезиально-силикатных проппантов на формирование дефектной структуры с пониженной прочностью при долговременных и циклических нагрузках, приводящее к обвальному разрушению гранул, характерному для песков. Даны предложения по организации отечественного независимого центра для тестирования проппантов.

Рис.1 Изменение насыпной плотности и сопротивления раздавливанию проппантов различного состава



Российская нефтяная промышленность является одной из главных бюджетообразующих отраслей народного хозяйства. Увеличение добычи нефти при ухудшении горно-геологических условий возможно только при использовании новых технологий. 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 проппанты.

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

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

Магнезиально-кварцевые проппанты было бы точнее назвать магнезиально-силикатными. Их изготавливают из магнезиально-силикатных природных минералов и техногенных отходов с добавлением кварцевого песка. Непостоянство химического и минералогического состава при использовании отходов требует тщательного контроля сырьевой смеси и параметров всего технологического процесса, в противном случае это приведет к ухудшению качества проппантов.

Проверка качественных показателей проппантов в независимых лабораториях основана на доверительных отношениях между производителями и потребителями. Потребитель сам отбирает нужные образцы проппанта и отправляет в лаборатории Frac-Tech или Stim-Lab. Взятые представленные образцы из производственного потока или сделаны в лаборатории — это на совести производителя. По нашему мнению, отбор образцов необходимо осуществлять покупателю со своих складов, и тогда можно с уверенностью говорить об объективной оценке качества проппанта.

Для проведения испытаний предпочтение следует отдать авторитетной российской лаборатории, такой как Независимый научно-лабораторный центр по исследованию керна и проппантов АО «Геологика» (НЛЦ).

АО «Боровичский комбинат огнеупоров» специализируется на выпуске алюмосиликатных проппантов. Диверсифицируя собственную структуру производства проппантов, АО «БКО» построило и запустило в эксплуатацию в 2014 г. завод по производству магнезиально-силикатных проппантов в Китае, ориентированный на внутреннее потребление в КНР. В связи с этим АО «БКО» в настоящее время обладает знаниями и опытом в области производства проппантов обоих типов.

При разработке и освоении технологии производства магнезиально-силикатных проппантов на новом заводе было обнаружено, что использование формулы магнезиально-кварцевых проппантов с применением кварцевого песка, которой пользуются и российские производители проппантов, позволяет получить проппант с физико-механическими характеристиками, удовлетворяющими требованиям международного стандарта¹ (см. графики на рис.1). В то же время, этот тип проппанта существенно уступает алюмосиликатным по показателям долговременной проводимости и проницаемости² (см. графики на рис.2). В силу различия насыпной плотности проппантов, более корректным является сравнение проницаемости.

Добавление песка в сырьевую смесь снижает содержание оксида магния (с 32 до 28%), уменьшает насыпную плотность проппантов с

1,55 до 1,43 г/см³ и ухудшает сопротивление раздавливанию, увеличивая количество разрушенных гранул с 5,6 до 7,6% и снижает долговременную проницаемость: при давлении 41,4 МПа (6 kpsi) с 171 до 114 мкм², а при давлении 68,9 МПа (10 kpsi) с 58 до 29 мкм². Уменьшение количества оксида магния в пропанте до 28% приводит к снижению физико-механических характеристик и долговременной проницаемости до уровня частично упрочненного песка FTSI PC 20/40.

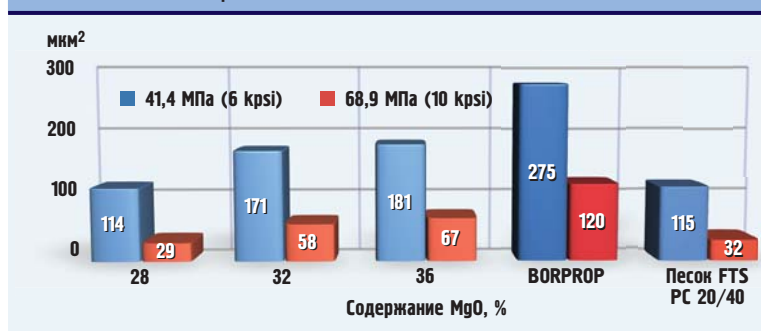
Добавление магниезиального компонента увеличивает содержание оксида магния с 32 до 36%, способствует незначительному увеличению насыпного веса с 1,55 до 1,60 г/см³, улучшает сопротивление раздавливанию с 5,6 до 5,2% и незначительно повышает долговременную проницаемость: при давлении 41,4 (6 kpsi) с 171 до 181 мкм², а при давлении 68,9 МПа (10 kpsi) с 58 до 67 мкм².

В результате экспериментов с составом сырьевой смеси было выявлено, что применение кварцевого песка ухудшает долговременные проводимость и проницаемость магниезиально-силикатных пропантов. Исключение песка из сырьевой смеси и замена его на магниезиальный компонент позволяют их улучшить, но уровень характеристик алюмосиликатных пропантов остается недостижимым. Применение кварцевого песка снижает себестоимость вместе с долговременными проводимостью и проницаемостью, а использование вместо песка магниезиального компонента улучшает долговременные характеристики, но приводит к увеличению себестоимости. Экспериментальным путем было определено оптимальное содержание оксида магния в пропантах — 34–36%.

При анализе свойств алюмосиликатных и магниезиально-силикатных пропантов следует отметить, что при сравнимых показателях прочности пропантов обоих типов лучшие показатели долговременной проницаемости магниезиально-силикатных пропантов на треть (34%) ниже, чем у алюмосиликатных пропантов.

Аналогичные результаты получены при испытании образцов пропантов других фракций. При

Рис.2 Изменение долговременной проницаемости для магниезиально-силикатных и алюмосиликатных пропантов



тестировании образцов российских магниезиально-кварцевых пропантов FOREPROP также характерна пониженная долговременная проводимость и проницаемость при давлении свыше 6 kpsi в сравнении с алюмосиликатными пропантами BORPROP [1,2].

В чем же причина этого феномена? Уменьшение проницаемости слоя пропантов вызвано увеличением доли разрушившихся пропантов. Продукты разрушения не выносятся из толщи пропантов, а заполняют пространство (поры) между гранулами, снижая проницаемость. Это хорошо видно на фото пропантов после окончания испытания на долговременную проводимость и проницаемость. Здесь следует обратить внимание на степень увеличения тонких фракций. На фотографиях видно, что если алюмосиликатные пропанты (рис.3Б) разрушаются на две трети практически равные по объему частицы, то для магниезиально-силикатных пропантов присуще разрушение на множество мелких частиц (рис.3А), больше характерное для песков.

Свойства пропантов, являющихся керамическими материалами, определяются их составом и структурой. Для выяснения причин различий в степени разрушения выполнены исследования, связанные с определением химического и фазового составов пропантов методами рентгеноспектрального и рентгенодифракционного анализа, их макро- и микроструктуры методами петрографического анализа с использованием оптического и электронного микроскопа. Исследования производились на аппаратуре исследовательского центра АО «БКО».

В фазовом составе алюмосиликатных пропантов всего два устойчивых химических соединения — муллит и корунд, не имеющих полиморфизма, которые образуют внутренний несущий каркас, усиливающий прочность гранул. Заполняющая внутреннюю полость каркаса стекловидная аморфная фаза и сам кристаллический каркас имеют близкие коэффициенты термического расширения, что способствует созданию бездефектной прочной структуры гранул после обжига.

РИС.3 МАГНЕЗИАЛЬНО-СИЛИКАТНЫЕ (А) И АЛЮМОСИЛИКАТНЫЕ BORPROP (Б) ПРОПАНТЫ ФРАКЦИИ 20/40 ПОСЛЕ ИСПЫТАНИЙ НА ДОЛГОВРЕМЕННУЮ ПРОВОДИМОСТЬ И ПРЕНИЦАЕМОСТЬ

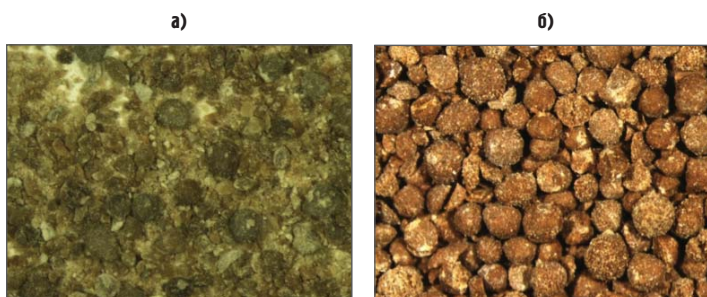


Табл.1 Минимальные требования компании «Роснефть» к алюмосиликатным и магнезиально-кварцевым проппантам

Показатель	Проппанты с насыпной плотностью 1,6-1,9 г/см ³ (алюмосиликатные)	Проппанты с насыпной плотностью не более 1,6 г/см ³ (магнезиально-кварцевые)
Сопротивление раздавливанию при давлении 10 kpsi, % для фракций:		
12/18	19	25
16/20, 16/30	15	19
20/40	9	10
Проводимость проппантной пачки, при давлении 10 kpsi, мД-фут для фракций:		
12/18	4 500	1 100
16/20, 16/30	3 600	1 000
20/40	2 800	900

Фазовый состав магнезиально-силикатных проппантов гораздо более сложный. Основными являются минералы энстатитового ряда (протоэнстатит, клинэнстатит, энстатит, в том числе и железистый, здесь присутствуют остаточные минералы от исходной сырьевой смеси — форстерит и кварц). За исключением форстерита, все упомянутые магнезиально-силикатные минералы обладают полиморфизмом, т.е. с изменением температуры переходят в различные кристаллические формы. Для магнезиально-силикатных проппантов характерны повышенные внутренние напряжения, связанные со структурными переходами неустойчивых фаз и сопровождающимися их объемными изменениями. Высокая неравновесная концентрация точечных и краевых дефектов, присущая кристаллическим

элементам, обуславливает создание в структуре гранул дислокационной сетки. При механическом воздействии на гранулы от краевых дислокаций кристаллов расходятся поля напряжений в межкристаллическое пространство, заполненное маловязкой стекловидной массой, обладающей структурой стекла. Развитие протяженности микроструктурных дефектов значительным образом сказывается на ослаблении механической прочности гранул, особенно при долговременных нагрузках. Ослабление прочности приводит к обвалному разрушению гранул при повышенных нагрузках. Наличие свободного кварца в магнезиально-кварцевых проппантах только увеличивает степень разрушения за счет его полиморфизма.

Циклические нагрузки снижают проводимость (проницаемость) проппантной пачки: с увеличением количества циклов долговременная проводимость (проницаемость) уменьшается на 20%. Для магнезиально-силикатных проппантов, с присущей им дефектной внутренней структурой, повышающей хрупкость, снижение проводимости (проницаемости) проявится еще большим снижением проводимости (проницаемости).

Таким образом, более глубокое изучение подтвердило серьезный недостаток магнезиально-силикатных проппантов — снижение прочности при воздействии длительных механических нагрузок, — обусловленный 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 значительно снижается, а разрушение гранул на мелкие частицы приобретает обвальный характер, аналогичный разрушению песков. Поэтому, несмотря на керамический способ производства, магнезиально-силикатные проппанты следует отнести к продукту, занимающему промежуточное положение между керамическими проппантами и песком и называть их правильнее не керамический проппант, а модифицированный песок.

Компания «Роснефть» выдвинула различные технические требования к алюмосиликатным и магнезиально-кварцевым проппантам (табл.1). Требования к магнезиально-кварцевым проппантам по таким важным показателям, как проводимость проппантной пачки, сопротивление раздавливанию, занижены по отношению к алюмосиликатным проппантам.

Различие в технических требованиях подразумевает и различные условия применения двух типов проппантов. Для алюмосиликатных проппантов они более сложные, с сочетанием воздействия высокого давления, знакопеременных нагрузок, температуры, агрессивных реагентов, для магнезиально-кварцевых — менее сложные, со сниженным давлением, невысокой температурой и отсутствием химического воздействия пластовых и технологических жидкостей. 

ВЫВОДЫ

1. Данные краш-теста, изначально разработанного для оценки качества песков, недостаточны для сравнительной оценки керамических проппантов различной минералогии: алюмосиликатных и магнезиально-силикатных;
2. Наиболее полное представление о качестве проппантов дают только испытания на долговременную проводимость и проницаемость;
3. Магнезиально-силикатные проппанты нельзя однозначно отнести к среднепрочным проппантам только на основании данных краш-теста (кратковременной прочности); этот тип проппантов следует отнести к продукту, занимающему промежуточное положение между керамическими проппантами и песком;
4. Легкие магнезиально-силикатные проппанты и среднепрочные алюмосиликатные проппанты предназначены для применения в различных условиях эксплуатации;
5. Необходимо дополнительное изучение влияния циклических нагрузок на проводимость (проницаемость) рассмотренных двух типов проппантов;
6. Специальноготавливаемые производителями проппантов пробы для ежегодного тестирования в признанных международных испытательных центрах Stim-Lab и Frac-Tech не дают объективной оценки качества производства проппантов данного производителя (только данные конкретной пробы проппантов, подготавливаемой один раз в год); требуется организация надежных испытательных центров проппантов в России. Легкая нефть уходит в прошлое, горно-геологические условия добычи нефти постоянно усложняются. И решить надвигающиеся проблемы ГРП по расклинивающему агенту смогут только истинно керамические — алюмосиликатные — проппанты. АО «БКО» приняло решение о наращивании собственного производства алюмосиликатных проппантов в России с прогнозной мощностью до 600 тыс. т/г в течение трех лет.

Список литературы:

1. Выбор проппанта: критерии отбора / Скурихин В.В., Мигаль В.П.// Нефтяное хозяйство, 2008 г., №1, стр. 90–93
2. Анализ эффективности применения легких проппантов / Скурихин В.В., Мигаль В.П.// Нефтяное хозяйство, 2009 г., №8, стр. 76–78
- ¹ Здесь и далее по тексту использованы требования и методы измерения ISO 13503-2:2006
- ² Здесь и далее по тексту использованы методы измерения ISO 13503-5:2006