

# О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОССТАНОВЛЕННЫХ (РЕГЕНЕРИРОВАННЫХ) ПРОПАНТОВ

**В настоящее время одним из распространенных методов увеличения продуктивности скважин на нефтяных месторождениях является технология гидроразрыва пласта (ГРП). Более чем на половине эксплуатационных скважин с трещинами ГРП наблюдается вынос проппанта в ствол скважины, что существенно снижает ее продуктивность. При этом количество проппанта, поступающего обратно в ствол скважины вместе с потоком пластового флюида, особенно велико на этапах ее освоения и начальной эксплуатации.**

**А.В. МОЖЖЕРИН**

к.т.н.,

АО «Боровичский комбинат огнеупоров

**А.Ю. КОРЖАВИН**

ООО «Торговый Дом БКО»

**Д**остаточно часто при проведении ГРП происходит недопродавка проппанта в продуктивный пласт, когда часть проппанта остается в скважине. Вымытый проппант вместе с добываемыми флюидами оседает на ее стенках, забивая технологическое оборудование, и зачастую является основной причиной преждевременного выхода из строя электроцентробежного насоса (ЭЦН) [1].

Отработанные проппанты (ОП) представляют собой многотонные нефтенасыщенные отходы, которые ввиду отсутствия универсальной технологии их регенерации или утилизации, как правило, просто вывозятся в специальные амбары [2]. Как отходы, ОП относят к 3 классу опасности, они, как правило, загрязнены нефтепродуктами и химическими

реагентами разной природы. Для повторного использования в качестве расклинивающего агента отработанный проппант не пригоден в силу отрицательного влияния на рабочую жидкость ГРП. В публикациях описаны две технологии его регенерации:

- Технология отмывки с последующим восстановлением полимерного покрытия — применительно к осмоленным проппантам (RCP) [3];
- Технология обжига отработанного проппанта — для керамических проппантов [4].

В связи с тем, что в результате проведения ГРП накапливается большое количество ОП, представляет интерес изучение влияния технологии регенерации на изменение свойств различных типов керамических проппантов, производимых в России:

алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых.

Для исследований были отобраны образцы алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых проппантов торговых марок BORPROP и FOREPROP, соответственно. Как видно из результатов тестирования по ГОСТ Р 51761-2013 (табл.1), основные свойства обоих типов проппантов, такие как прочность (сопротивление раздавливанию), содержание основной фракции, сферичность и округлость сопоставимы.

Имитация условий пластового давления выполнялась на установке для определения проводимости и проницаемости. Пробу проппанта помещали между пластинами из песчаника Огайо и сжимали при давлении 6000 psi, после чего ее делили на две части. Одну часть замачивали в нефти (на 1 сутки), далее извлекали из нефти, после чего без промывки какими-либо растворителями отправляли на прокаливании в течение четырех часов при температуре 800°C, чтобы обеспечить полное выгорание нефти, а затем определяли сопротивление раздавливанию при давлении 10000 psi (краш-тест). Стоит отметить, что выгорание нефти было возможно при минимальной температуре 800°C, при меньшей температуре нефть выгорала крайне медленно чадящим образом. Для второй части пробы замачивание в нефти не производили, делали только прокаливании на 800°C, после чего проводили краш-тест.

Определение возможности повторного использования регенерированного проппанта оценивали по сопротивлению раздавливанию при

**Табл.1 Свойства испытываемых проппантов по ГОСТ Р 51761-2013**

Показатель	Значение показателей для проппантов	
	Алюмо-силикатный	Магнезиально-кварцевый
Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	1,75	1,51
Сопротивление раздавливанию, % разрушенных гранул при давлении 68,9 МПа (10 kpsi)	19,6	20,1
Содержание основной фракции, %	94,1	95,5
Ситовой анализ, остатки на ситах %:		
12	0,0	0,0
16	1,3	1,7
18	53,1	43,1
20	41,0	52,4
25	4,3	2,5
30	0,2	0,2
40	0,1	0,1
Поддон	0,0	0,0
Сферичность	0,8	0,8
Округлость	0,8	0,9

Табл.2 Изменение granulометрического состава пропантов при имитации условий эксплуатации

Гранулометрический состав пробы, остаток на сите, %	Наименование типа пропанта									
	Алюмосиликатный					Магнезиально-кварцевый				
	Исходная проба	Проба после краш-теста 6000 psi после обжига при 800°C (без замачивания в нефти)	Изменение грансостава после обжига при 800°C	Проба после сжатия при 6000 psi с замачиванием в нефти после обжига при 800°C	Изменение грансостава после замачивания в нефти и обжига при 800°C	Исходная проба	Проба после краш-теста 6000 psi после обжига при 800°C (без замачивания в нефти)	Изменение грансостава после обжига при 800°C	Проба после сжатия при 6000 psi с замачиванием в нефти после обжига при 800°C	Изменение грансостава после замачивания в нефти и обжига при 800°C
16 меш	1,3	1,3	0	1,0	-0,3	1,7	1,6	-0,1	1,6	-0,1
18 меш	53,1	52,5	-0,6	49,6	-3,5	43,1	42,2	-0,9	37,0	-5,2
20 меш	41,0	38,4	-2,6	38,8	-2,2	52,4	45,7	-6,7	47,9	-4,5
25 меш	4,3	5,1	+0,8	6,1	+1,8	2,9	5,1	+2,2	5,4	+2,5
30 меш	0,2	0,9	+0,7	1,5	+1,3	0,2	1,8	+1,6	2,2	+2,0
40 меш	0,1	0,9	+0,8	1,7	+1,6	0,1	1,9	+1,8	2,9	+2,8
Поддон	0	0,8	+0,8	1,3	+1,3	0	1,8	+1,8	2,4	+2,4
Содержание фр.16/20	94,1	90,9	-3,2	88,4	-5,7	95,5	87,9	-7,6	84,9	-10,6

давлении 68,9 МПа (10000 psi) и granulометрическому составу после имитации условий эксплуатации. Критерий — соответствие требований ГОСТ Р 51761-2013. Для определения сопротивления раздавливанию при давлении 10000 psi из проб пропантов, подвергнутых кратковременному давлению 6000 psi с вымачиванием в нефти и последующим прокаливанием при температуре 800°C, предварительно была высеяна фракция 16/20.

Результаты испытаний представлены на графиках рис.1 и 2 и в табл.2, фото образцов пропантов (при увеличении 1,5 крата) на каждом этапе испытаний приведены в табл.3.

Результаты показывают, что в условиях эксплуатации пропант меняет свои свойства. При термическом воздействии с увеличением температуры выжигания нефти имеется тенденция ухудшения сопротивления раздавливанию, которая становится более явной при предварительном контакте пропанта с нефтью. Это указывает на деструктивное воздействие нефти, которая пропитывает пропант и при выжигании которой продукты термического разложения оказывают разрыхляющее воздействие на структуру пропанта.

Гранулометрический состав изменяется в сторону увеличения количества более мелких гранул, при этом содержание основной фракции алюмосиликатного пропанта сни-

Рис.1 Диаграмма изменения сопротивления раздавливанию пропантов

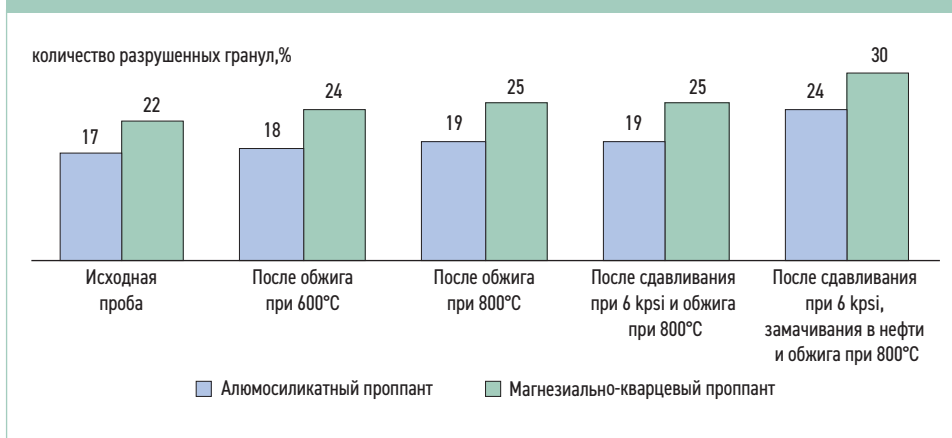
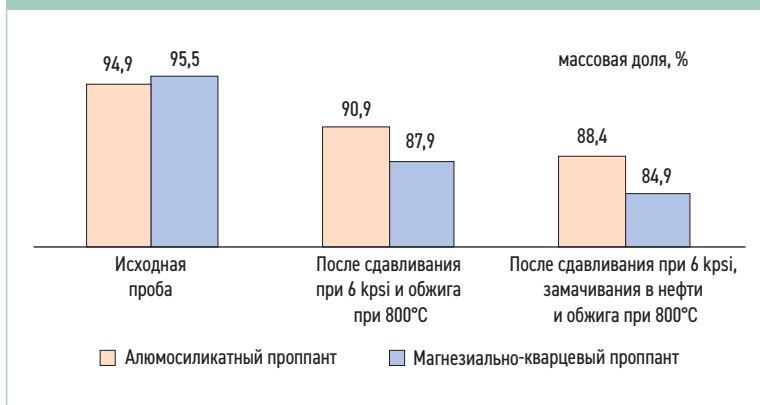


Рис.2 Диаграмма изменения содержания основной фракции пропантов



**Табл.3 Фото проб проппантов после проведения испытаний (при увеличении 1,5 крат)**

**Алюмосиликатный проппант**



**Исходная проба**



**Проба после сжатия при 6000 psi и после обжига при 800°C (без замачивания в нефти)**



**Проба после сжатия при 6000 psi, замачивания в нефти и после обжига при 800°C**



**Проба после краш-теста при давлении 10000 psi (проппант после сжатия при 6000 psi, замачивания в нефти и после обжига при 800°C)**

**Магнезиально-кварцевый проппант**



**Исходная проба**



**Проба после сжатия при 6000 psi и после обжига при 800°C (без замачивания в нефти)**



**Проба после сжатия при 6000 psi, замачивания в нефти и после обжига при 800°C**



**Проба после краш-теста при давлении 10000 psi (проппант после сжатия при 6000 psi, замачивания в нефти и после обжига при 800°C)**

жается на 3–6%, а магнезиально-кварцевый — на 7–11% и не соответствует требованию «не менее 90%». При этом пропитка нефтью увеличивает показатель разрушения ориентировочно в два раза.

Дополнительно были проведены испытания проб алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых проппантов на долговременную проводимость/проницаемость при циклических нагрузках по режиму 6000 psi — 3000 psi — 6000 psi (15 циклов).

Для измерения остаточной проводимости проппантов при циклических нагрузках была использована методика, применяемая лабораторией Stim-Lab [5]. Измерение проводимости проводили по методике ISO 13503-5:2006 на установке, разработанной и изготовленной компанией Core Lab Instruments. Условия проведения измерений проводимости: пластины песчаника из штата Огайо, концентрация проппанта 2 фунта на квадратный фут, температура 121°C.

Пластины песчаника из штата Огайо помещали в каждую из двух ячеек в количестве четырех штук. Ячейки изготовлены из нержавеющей коррозионно-стойкой стали. Выравнивали насыпанный слой проппанта специальным уровнем и сверху накрывали второй пластиной песчаника. Слой проппантов подвергался одновременному воздействию давления и температуры с пропуском 2%-го раствора KCl. Начальное измерение проводимости проводили при 1000 psi и температуре 24°C, затем нагревали измерительные ячейки до 121°C и выводили на давление 2000 psi. Для прослеживания динамики изменения проводимости слоя проппантов проводили измерения при давлениях 1000, 2000, 4000, 6000 psi, затем в условиях циклической нагрузки 6000 psi — 3000 psi — 6000 psi (15 циклов).

Значения долговременной проводимости/проницаемости приведены в графиках на рис. 2, 3.

По окончании проведения испытания на установке проводимости/проницаемости, ячейки с проппантами были разобраны, а в процессе разборки сделаны фото процесса разборки проппантов при увеличении 1,5 крат на пластинах песчаника и проппантов после сушки при температуре 50°C в сушильном шкафу. Фото приведены в табл.4.

На высушенном в сушильном шкафу при 50°C проппанте был произве-



ден рассев гранул до и после испытаний на долговременную проводимость/проницаемость для оценки количества разрушенных гранул после циклического воздействия высокого давления и температур (табл.5). После проведения испытаний на проводимость/проницаемость отмечено значительно большее разрушение гранул на магнезиально-кварцевых пропантах с перераспределением гранулометрического состава в сторону мелких фракций, чем на алюмосиликатных пропантах.

По результатам проведенных испытаний установлено:

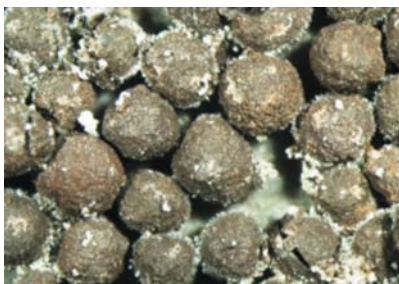
- воздействие на пропанты смоделированных в лабораторном масштабе условий их эксплуатации и регенерации (кратковременного сжатия при давлении 6000 psi, взаимодействия с углеводородами (нефть) и обжига при температуре 800°C) приводит к разрушению и разупрочнению гранул;
- показатель сопротивления раздавливанию при давлении 10000 psi после имитации условий эксплуатации в лабораторных условиях имеет тенденцию к уменьшению;
- наибольшее уменьшение показателя сопротивления раздавливанию (снижение прочности) отмечено на пробах пропантов, подвергнутых предварительному сжатию и пропитанных нефтью;
- уменьшение прочности пропантов связано с термическим воздействием для очистки пропантов от нефти, во время которого происходит разупрочнение гранул в ре-

**Табл.4 Внешний вид пропантов после испытания на циклические нагрузки**

**Алюмосиликатный пропант**

**Магнезиально-кварцевый пропант**

**Фото пропантов (после испытания) при увеличении 1,5 крат на пластине песчаника**



**Внешний вид разрушенных проб (после испытания) пропантов при увеличении 1,0 крат**



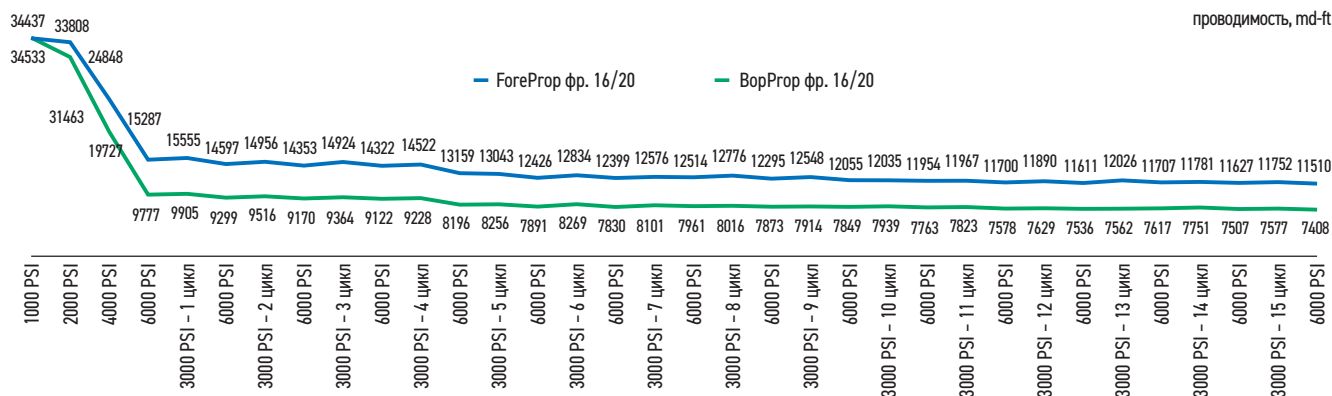
зультате объемных преобразований входящих в структуру пропанта фаз, особенно кварца SiO<sub>2</sub>;

- пропитка нефтью оказывает деструктивное воздействие на струк-

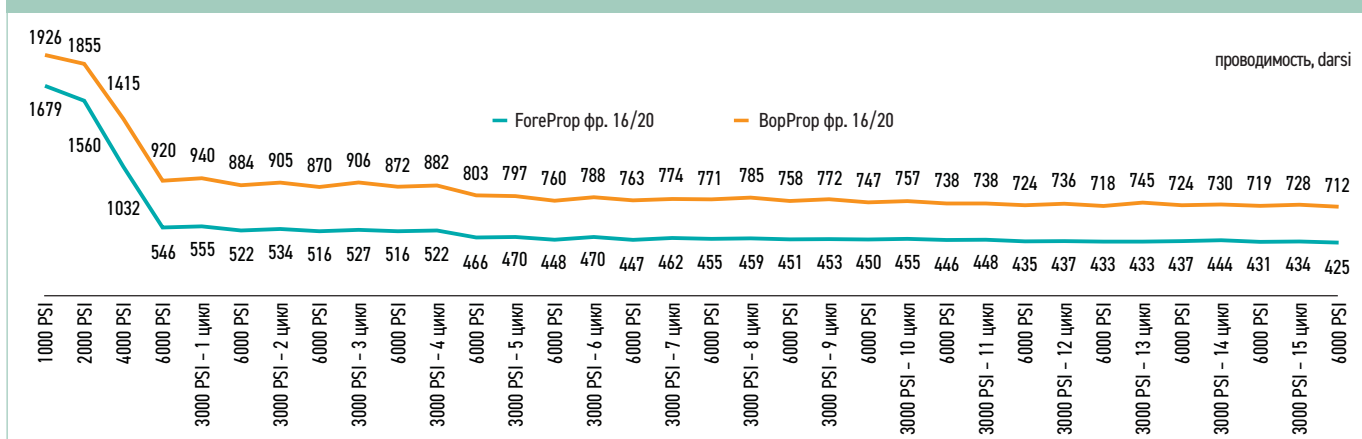
туру пропанта, уменьшая сопротивление раздавливанию после обжига;

- для магнезиально-кварцевых пропантов отмечено значительно большее уменьшение прочности в

**Рис.3 Проводимость пропантов фр. 16/20 магнезиально-кварцевого состава (FOREPROP) и алюмосиликатного состава (BORPROP) в зависимости от приложенного давления**



**Рис.4 Проницаемость проппантов фр. 16/20 магнезиально-кварцевого состава (FOREPROP) и алюмосиликатного состава (BORPROP) в зависимости от приложенного давления**



**Табл.5 Грансоставы проппантов до и после испытаний на долговременную проводимость/проницаемость**

Проба	Гранулометрический состав, % по ситам							Содержание осн. фракции, %
	16	18	20	25	30	40	под	
<b>FOREPROP</b>								
До	1,7	43,1	52,4	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	-16,4	-17,2	+5,9	+5,5	+10,1	+12,4	-33,6
<b>BORPROP</b>								
До	1,3	53,1	41,0	4,3	0,2	0,1	0	94,1
После	1,1	47,3	30,8	5,7	3,1	5,4	6,6	78,1
Δ	-0,2	-5,8	-10,2	+1,4	+2,9	+5,3	+6,6	-16,0

сравнении с прочностью алюмосиликатных проппантов (до 36,0% (отн.), соответственно, с 22 до 30%);

- при рассмотрении гранул алюмосиликатного и магнезиально-кварцевых составов после имитации условий эксплуатации под стереомикроскопом при увеличении 1,5 крата отчетливо видны гранулы с трещинами, оскольчатые и половинчатые зерна проппантов, причем для алюмосиликатных проппантов характерно разрушение гранулы на две половины, а гранулы магнезиально-кварцевых проппантов разрушаются на множество мелких осколков, что и объясняет разницу в проводимости практически в 1,5 раза;

- в гранулометрическом составе проб, подвергнутых кратковременному давлению 6000 psi, пропитанных нефтью (и без пропитки) и обожженных при температуре 800°C отмечено разрушение гранул и перераспределение зернового состава проппантов в сторону мелких фракций (с увеличением остатка на ситах 25, 30, 40 меш).
- наибольшее разрушение гранул, подвергнутых кратковременному давлению 6000 psi, пропитанных нефтью (и без пропитки) и термообработанных при температуре 800°C, отмечено для магнезиально-кварцевых проппантов, что подтверждается результатами определения гранулометрического состава;

- моделирование условий эксплуатации показало серьезный недостаток магнезиально-кварцевых проппантов — обвальное разрушение гранул, обусловленное фазовым составом и сопряжением фаз в структуре проппанта, а именно: содержание стеклофазы кварца, количество которого до 70% под воздействием пластовых давлений приводит к хрупкому разрушению на оскольчатые, несферичные образования и снижению показателей проводимости и проницаемости пачки проппанта на 5–60% по сравнению с алюмосиликатными.

## Заключение

Регенерированные (восстановленные после эксплуатации проппанты) утрачивают свои первоначальные свойства. Использование восстановленных алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых проппантов приводит к неконтролируемой потере проводимости и проницаемости проппантной пачки, что особенно видно при использовании магнезиально-кварцевых проппантов. АО «БКО» не рекомендует использовать восстановленные после эксплуатации проппанты. □

## ЛИТЕРАТУРА

1. Константинов С.В., Гусев В.И. Техника и технология проведения гидравлического разрыва пласта за рубежом. – М.: ВНИИОЭНГ. Обзорная информация. Сер. Нефтепромысловое дело, 1985. – 60 с.
2. Фердман, В.М. Комплексная технология утилизации нефтешламов и ликвидация нефтешламовых амбаров в промысловых условиях: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 03.00.16. – Уфа, 2002. – 24 с.
3. Патент РФ №2353642. Способ утилизации нефтезагрязненного проппанта. Рядинский В.Ю., Антропов А.А. // Бюл. № 12. – 2009.
4. Патент РФ №2487911. Способ регенерации нефтехимически загрязненного проппанта. Барышников А.В., Сурков А.В., Елфимов В.С., Мурахтанов Д.В. // Бюл. №20. – 2013.
5. Отчет лаборатории Stim-Lab SL 7944, май 2008.