

Эволюция пропанта BORPROP

А.В. МОЖЖЕРИН, к. т. н., АО «Боровичский комбинат огнеупоров»; А.Ю. КОРЖАВИН, ООО «Торговый Дом БКО»

За два десятка лет до появления термина импортозамещение, с 1994 по 1998 год, АО «Боровичский комбинат огнеупоров» реализовал свой собственный проект по освоению промышленного производства пропантов для ГРП с целью замещения американских пропантов, используемых отечественными нефтяными компаниями, чем внес свой вклад в развитие и становление отечественной технологии ГРП. В статье подробно рассмотрена эволюция свойств боровичского алюмосиликатного пропанта BORPROP (насытная плотность, сопротивление раздавливанию (прочность), долговременная проводимость), даны оценки изменений, приведено сравнение со свойствами магнезиально-кварцевых пропантов. Показано, что при сравнимых показателях прочности пропантов обоих типов лучшие показатели долговременной проницаемости магнезиально-кварцевых пропантов на треть (34%) ниже, чем у алюмосиликатных пропантов, и, несмотря на более низкую насыщенную плотность, эффект от снижения массы пропанта, используемого для ГРП, не перекрывает убытков от снижения продуктивности скважины из-за снижения проводимости. Использование магнезиально-кварцевых пропантов при ГРП убыточно для нефтяных компаний. В меняющихся рыночных условиях АО «БКО» способно выпускать пропанты, удовлетворяющие меняющиеся запросы потребителей. При этом пропанты BORPROP в любом случае остаются лучшими по ключевым показателям – долговременной проводимости и проницаемости.

В июле 2017 года АО «Боровичский комбинат огнеупоров» отмечает 160-летний юбилей. В 1993 году, осуществляя собственную программу диверсификации, комбинат приступил к реализации проекта по разработке и освоению выпуска керамических алюмосиликатных пропантов на основе отечественных бокситов. Первая очередь производства пропантов мощностью 15 000 тонн пропантов в год была пущена в эксплуатацию в сентябре 1998 года. И хотя производство пропантов АО «БКО» в настоящее время не является единственным, оно навсегда останется первой удачной попыткой организовать в России серийный промышленный выпуск пропантов [1, 2]. В следующем году первому в России производству пропантов исполняется 20 лет, а самому проекту – 25 лет. В текущем году годовой выпуск пропантов впервые превысит 300 000 тонн, а в следующем достигнет 400 000 тонн. Освоение производства пропантов, расширив спектр выпускаемой продукции, позволило комбинату уйти от традиционных рынков сбыта продукции к более перспективным и платежеспособным нефтедобывающим предприятиям, обеспечив финансово-экономическую устойчивость. По своей сути – это один из первых проектов по импортозамещению, выполнение которого позволило ускоренными темпами освоить и развить отечественную технологию ГРП.

Разработка пропанта и технологии его производства с самого начала велась с ориентиром

на лучшие зарубежные аналоги. При реализации технологического процесса использованы новейшие достижения в области технологии производства керамических материалов и эксклюзивное импортное оборудование – смесители-грануляторы Eirich (рис. 1), применяемые ведущими в то время зарубежными производителями пропантов, такими как Carbo Ceramics и Norton-Alcoa. Технические решения, разработанные технологами комбината, были запатентованы [3, 4]. С 1997 года по настоящее время в копилке АО «БКО» уже 12 патентов по производству пропантов. В 2001 году была зарегистрирована торговая марка боровичских пропантов – BORPROP (свидетельство Роспатента № 200569).

Для проектирования и постановки на производство новых видов пропантов работает научно-исследовательское подразделение – Центр совершенствования технологии и производства. Центр оснащен необходимым испытательным и исследовательским оборудованием, укомплектован лучшими инженерными кадрами. В распоряжении исследователей – лучшие образцы технологического оборудования (мельницы тонкого измельчения, противочные смесители Eirich, сита Ro-Tap, обжиговые печи Nabertherm), установка по определению проводимости и проницаемости пропантов (США), комплекс оборудования для выполнения оперативного технологического контроля и глубокого



Рисунок 1 – Смесители-грануляторы Eirich

исследования материалов, включающий рентгеновский дифрактометр ДРОН-6 для определения фазового состава вещества, лазерный анализатор размера частиц Micrisizer для контроля степени измельчения, оптические и электронный (Jeol, Япония) микроскопы для изучения состава и микроструктуры материалов и т.п.

Система менеджмента качества проектирования и производства пропантов с 2003 года сертифицирована на соответствие требованиям спецификации API Spec Q1, на сегодня уже в 9-й версии. Ресертификационные аудиты проводятся аудиторами API каждый год.

Для проверки собственной испытательной лаборатории и независимой оценки свойств третьей стороной образцы пропантов BORPROP ежегодно тестируются в авторитетных независимых лабораториях Stim-Lab (США) или FracTech (Великобритания).

В настоящей статье предпринята попытка ретроспективного обзора эволюции основных свойств пропантов BORPROP с самого начала их выпуска на основе данных испытаний в независимых лабораториях Stim-Lab или FracTech.

В силу различных причин, среди которых

основной является наличие в номенклатуре выпускаемой продукции, определяемой рыночным спросом, на тестирование отправляются образцы пропантов тех фракций, выпуск которых планируется на текущий год. Поэтому максимальное количество испытаний выпало на две фракции: 20/40 и 16/20. Пропанты 20/40 широко применялись в конце 90-х – начале 2000-х годов, фракция 16/20 стала применяться с начала 2000-х и в настоящее время – это наиболее продаваемая и востребованная фракция в России.

Для обзора были выбраны основные свойства пропантов, которые определяют успешность их эксплуатации: насыпная плотность (насыпной вес), прочность, определяемая сопротивлением раздавливанию, а также долговременная проводимость пачки пропантов при различных давлениях. Насыпную плотность и сопротивление раздавливанию пропантов определяли по методике API RP 60 или ISO 13503-2, долговременную проводимость – по ISO 13503-5.

Результаты тестирования и эволюция основных свойств пропантов BORPROP представлены на графиках – рис. 2 (для фракции 20/40) и рис. 3 (для фракции 16/20). ▶

Изменение свойств пропантов BORPROP обеих фракций отражает этапы становления и развития их производства на Боровичском комбинате огнеупоров.

1-й этап: с 1998 по 2000 год – отладка технологии. Характеризуется улучшением всех основных характеристик пропантов. В то время востребованы были пропанты только двух фракций: 16/30 и 20/40. Для пропантов фракции 20/40 в этот период характерно:

- увеличение насыпной плотности с 1,86 до 2,04 г/см³;
- увеличение прочности с кратным сокращением количества разрушенных гранул:
 - при давлении 10 000 psi (68,9 МПа) – с 6,79% до 1,78% (в 3,8 раза);
 - при давлении 15 000 psi (103,2 МПа) – с 14,42 до 7,28% (в 1,98 раза);
- увеличение долговременной проводимости пропантной пачки:
 - при давлении 6000 psi (41,3 МПа) – с 1226 до 2885 миллиардов на фут (в 2,3 раза);
 - при давлении 10 000 psi (68,9 МПа) – с 3369 до 4680 миллиардов на фут (на 39%).

2-й этап: с 2001 по 2006 год – стабилизация технологического процесса с увеличением объемов производства пропантов. Для пропантов обеих фракций в этот период характерно плавное незначительное изменение основных свойств.

- Снижение насыпной плотности с 1,90 до 1,79 г/см³ (на 6%) для пропантов фракции 20/40 и с 1,88 до 1,81 г/см³ (на 4%) для пропантов фракции 16/20.
- Снижение насыпной плотности практически не сказалось на изменении прочности пропантов обеих фракций:
 - для фракции 20/40 при давлении 10 000 psi изменения прочности не наблюдается, а при давлении 15 000 psi количество разрушенных гранул увеличилось на 12%;
 - для фракции 16/20 как при давлении 10 000 psi, так и при давлении 15 000 psi размах колебаний по количеству разрушенных гранул велик и не отражает тренда на ухудшение.
- Столь незначительное снижение насыпной плотности в целом в рассматриваемый период привело к незначительному изменению проводимости обеих фракций пропантов.

3-й этап: с 2007 по 2015 год – поиск технических решений для снижения насыпной плотности пропантов в конкурентной борьбе. С 2007 года на рынке развернулась конкурентная борьба за потребителей между компаниями, также освоившими технологию производства пропантов. Так как технологии были разными,

в целях активной маркетинговой политики использовались различные методы убеждения в преимуществах своего продукта. Так, например, компания «ФОРЭС» заявила, что достигнутая ими сниженная насыпная плотность пропантов позволит потребителям снизить их затраты на расходные материалы для ГРП, и им действительно удалось убедить в этом крупные нефтяные компании, получив надолго самые большие объемы продаж.

Рассмотрим результаты испытаний пропантов BORPROP в этот период.

- Насыпная плотность пропантов снизилась на 7%:
 - для пропантов фракции 20/40 с 1,79 до 1,68 г/см³;
 - для пропантов фракции 16/20 с 1,81 до 1,68 г/см³.
- Показатель сопротивления раздавливанию в этот период изменялся в широких пределах:
 - для фракции 20/40 от 4,5 до 8,9% при давлении 10 000 psi.
 - для фракции 16/20 от 9,1 до 16,6% при давлении 10 000 psi.
- При всех изменениях удалось не допустить такого же резкого ухудшения долговременной проводимости и стабилизировать его в рамках значений предыдущего периода:
 - для фракции 20/40 в пределах 1500–1800 миллиардов на фут при давлении 10 000 psi и в пределах от 3400 до 5000 миллиардов на фут при давлении 6000 psi;
 - для фракции 16/20 в пределах 2900–3000 миллиардов на фут при давлении 10 000 psi и в пределах от 9000 до 10 000 миллиардов на фут при давлении 6000 psi.

Однако сравнение с лучшими результатами по сопротивлению раздавливанию и проводимости, полученными в 2000 году, дает практически двукратное ухудшение проводимости для фракции 20/40, а для фракции 16/20 – снижение на 43% при давлении 6000 psi и на 20% при давлении 10 000 psi. Таким образом, стремление к снижению насыпной плотности привело к снижению основного свойства пропантов – долговременной проводимости.

Дело в том, что свойства пропантов как керамического материала во многом зависят от его вещественного (фазового) состава. Рассмотрим динамику изменения фазового состава пропантов с 2000 по 2015 год. Состав 2000 года, имеющий максимальную прочность и долговременную проводимость, имел оптимальное соотношение кристаллических фаз (40% муллит, корунд 20%) и аморфной стеклофазы (40%). Увеличение содержания муллита с 40 до 52% и появление в составе прочих кристаллических фаз (остаточный

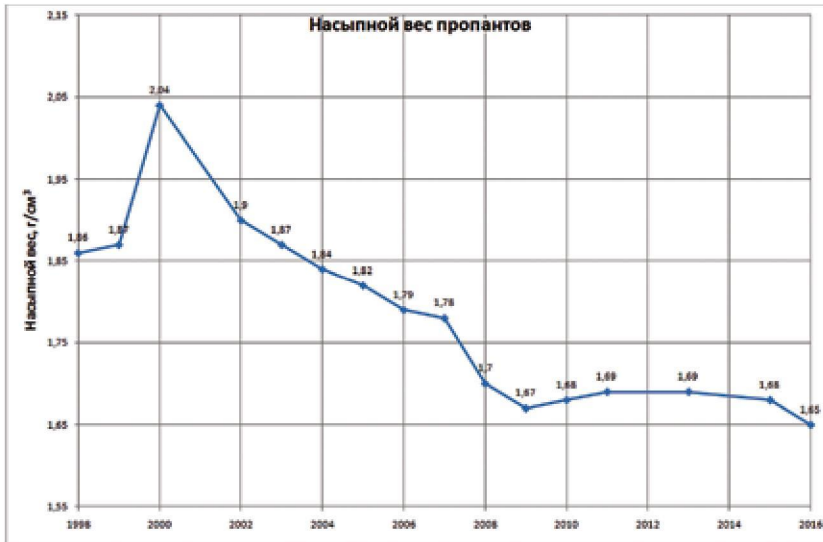


Рисунок 2 – Эволюция основных свойств пропантов BORPROP фракции 20/40 по годам выпуска

кварц, кристобалит, анортит и т.п.) с одновременным снижением корунда с 20 до 12% и стеклофазы с 40 до 32% приводит к созданию напряженной структуры с понижением мгновенной и долговременной прочности пропантов. Корунд увеличивает долговременную прочность пропантов, а стеклофаза – мгновенную, при этом увеличение доли корунда как наиболее плотного материала в этой системе резко повышает насыпную плотность. Стабилизировав состав пропантов в 2015 году (44% муллита, 14% корунда, 2% прочих кристаллических фаз, 40% стеклофазы), получили стабилизацию показателей сопротивления раздавливанию и долговременной проводимости, но на уровне существенно худшем, чем в 2000 году.

В 2017 году были продолжены работы по снижению насыпной плотности пропантов и получены первые успешные результаты. При снижении насыпной плотности до 1,55 г/см³, т.е. до уровня магнезиально-кварцевых пропантов, получена долговременная проводимость алюмосиликатных пропантов при давлении 10 000 psi на 40% выше, чем у магнезиально-кварцевых пропантов.

Итак, погоня за низкой насыпной плотностью алюмосиликатных пропантов, вдогонку за магнезиально-кварцевыми, привела к ухудшению их свойств. Сравнительные испытания и исследования обоих видов пропантов неоднократно проводились в лаборатории исследовательского центра АО «БКО», а результаты исследований были опубликованы [4–8]. Напомним их результаты.

Магнезиально-кварцевые пропанты FOREPROP, выпускаемые компанией «ФОРЭС», имеют более низкую насыпную плотность 1,55–1,70 г/см³ против 1,67–1,74 г/см³ у алюмосиликатных пропантов BORPROP, но при этом показатели сопротивления раздавливанию у них сравнимы. Это и явилось основным аргументом маркетологов компании «ФОРЭС» насчет экономии на пропантах. Действительно, низкая насыпная плотность позволяет заполнить объем трещины меньшим количеством пропантов. Но эффект от применения пропантов не ограничивается прямыми затратами на их закупку, это лишь часть

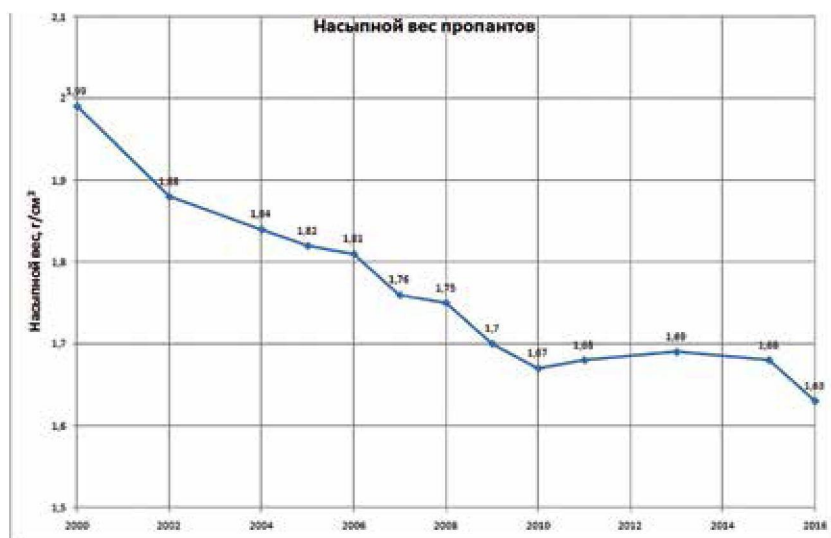


Рисунок 3 – Эволюция основных свойств пропантов BORPROP фракции 16/20 по годам вытуска

статьи расходов. Доход нефтяники получают лишь от увеличения притока нефти, который напрямую связан с показателем долговременной проводимости (проницаемости) пачки пропантов. При сравнении свойств алюмосиликатных и магнизиально-кварцевых пропантов следует отметить, что при сравнимых показателях прочности пропантов обоих типов лучшие показатели долговременной проницаемости магнизиально-кварцевых пропантов на треть (34%) ниже, чем у алюмосиликатных пропантов [7]. Причины этого явления установлены и изложены в [7, 8]. С увеличением давления закрытия долговременная проводимость пропантной пачки уменьшается, но при всех уровнях давления, начиная от 2 kpsi и выше, долговременная проводимость алюмосиликатных пропантов выше, чем у магнизиально-кварцевых пропантов, хотя их прочность (сопротивление раздавливанию при давлении 10 kpsi) практически одинакова. При давлении 6 kpsi превышение составляет 1,56 раза, а при давлении 10 kpsi разница увеличивается до 1,8 раза [8]. Снижение проводимости (проницаемости) приводит к снижению притока нефти и накопленной добычи. По расчету [6] экономический эффект при использовании FOREPROP взамен BORPROP на одной скважине получается отрицательным (ущерб) и составит 7,8 млн руб., или \$260 тыс. в год за счет недополученной нефти. Расчет производился для условного ГПП с объемом закачки пропанга 50 т (27,5 м³) и дополнительной добычи нефти после ГПП в количестве 10 т/сутки, который при применении магнизиально-кварцевых пропантов снижался пропорционально снижению их долговременной проводимости.

На основании этих данных сделан вывод, что данные краш-теста, изначально разработанного для оценки качества песков, недостаточны для сравнительной оценки керамических пропантов различной минералогии: алюмосиликатных и магнизиально-кварцевых. Наиболее полно о качестве пропантов дают представления только испытания на долговременную проводимость и проницаемость.

ВЫВОДЫ

1. Боровичский комбинат огнеупоров первым в России в 1998 году освоил промышленный выпуск пропантов – необходимого компонента для осуществления и развития технологии ГРП. К настоящему времени он не является лидером по объемам производства, но сохраняет лидерство в области качества. Пропанты BORPROP при относительно невысокой насыпной плотности имеют существенно более высокие показатели проводимости и проницаемости в сравнении с конкурирующими на российском рынке продуктами. При давлении 6 kpsi превышение проводимости составляет 1,56 раза, а при давлении 10 kpsi разница увеличивается до 1,8 раза.
2. Отвечая на сегодняшние потребности рынка в универсальном керамическом пропанте, пригодном для различных условий эксплуатации, АО «БКО» адаптировало свойства пропантов BORPROP по насыпной плотности, сохранив лучшие показатели по долговременной проводимости.
3. Данные по насыпной плотности и краш-теста недостаточны 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 как при статических, так и при циклических нагрузках.
4. Потребителям пропантов следует учитывать, что показатели тестирования по ISO 13502-2 (API RP 60) или ГОСТ Р 51761 являются необходимыми, но недостаточными для обоснования при выборе поставщика пропантов. Основой для выбора должны стать результаты испытаний на долговременную проводимость и проницаемость как при статических, так и при циклических нагрузках.
5. Специально подготавливаемые производителями пропантов пробы для ежегодного тестирования в признанных международных испытательных центрах Stim-Lab и Frac-Tech не дают объективной оценки качества производства пропантов данного производителя. Они дают только данные о свойствах конкретной пробы пропантов, подготавливаемой 1 раз в год. Требуется организация надежных испытательных центров пропантов в России.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

АО «БКО» выпускает алюмосиликатные пропанты в соответствии с запросами

своих потребителей и за весь период выпуска с 1998 года накопило научные, производственные и технологические знания и опыт в выпуске всей линейки пропантов различных категорий по насыпной плотности, прочности и проводимости: от «легких» до высокопрочных. Эти знания и опыт в сочетании с расширенными производственными возможностями, при наличии запросов потребителей позволяют в любое время возобновить производство алюмосиликатного керамического высокопрочного пропанта категории HSP для использования в глубоких скважинах с пластовым давлением свыше 10 000 psi. Предлагаемый сегодня пропант HSP производится с помощью специальных покрытий, снижающих разрушаемость пропанта и незначительно увеличивающих его проводимость. Отказ от применения покрытий позволит при снижении себестоимости увеличить проводимость на 30–40%. Точно такое же заявление можно сделать и в отношении «легких» пропантов.

В меняющихся рыночных условиях алюмосиликатные пропанты способны удовлетворять меняющиеся запросы потребителей, оставаясь при этом лучшими по ключевым показателям – долговременной проводимости и проницаемости. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Можжерин В.А. и др. Российские пропанты для гидроразрыва пластов//Нефтяное хозяйство. – 2001. – № 1. – С. 56–58.
2. Можжерин В.А. и др. Пропанты ОАО «БКО»: производство и перспективы//Интервал. – 2007. – № 8. – С. 63–66.
3. Мигаль В.П. и др. Способ производства высокопрочных сферических керамических гранул// Патент РФ 2133716, МПК 6 С 04 В 20/04. ОАО «Боровичский комбинат огнеупоров». № 97119318/03; Заявл. 10.11.97. Опубл. 27.7.99. Бюл. № 21.
4. Скурихин В.В., Мигаль В.П. Легкие пропанты: эффект реальный и виртуальный//Интервал. – 2007. – № 11. – С. 33–40.
5. Скурихин В.В., Мигаль В.П. Выбор пропанта: критерии отбора//Нефт. х-во. – 2008. – № 1. – С. 90–93.
6. Скурихин В.В., Мигаль В.П. Анализ эффективности применения легких пропантов//Нефтяное хозяйство. – 2009. – № 8. – С. 76–78.
7. Можжерин А.В., Коржавин А.Ю. Краш-тест или проводимость? Оценка качества алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых пропантов//Нефтегазовая вертикаль. – 2016. – № 17. – С. 76–78.
8. Исследования остаточной проводимости алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых пропантов при циклических нагрузках/А.В. Можжерин и др.//Бурение и нефть. – 2017. – № 5. – С. 42–45.