



Сравнительная оценка эффективности применения алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых пропантов



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

Ф.Р. ИКСАНОВ,
к. т. н., начальник центра
совершенствования технологии
и производства
info@aobko.ru

АО «Боровичский комбинат
огнеупоров»

Новгородская обл.,
174411, РФ

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

ООО «Торговый Дом БКО»

Новгородская обл.,
174411, РФ

АО «БКО»
Россия, 174411,
Новгородская обл., г. Боровичи,
ул. Международная, д. 1

Тел.: +7 (816-64) 9-25-00,
(816-64) 9-20-65
Факс: (816-64) 9-21-95
e-mail: info@aobko.ru
www.aobko.ru

Приведены результаты исследований двух основных типов керамических пропантов, выпускаемых отечественной промышленностью. Показано, что при сравнимых показателях насыпной плотности и сопротивления раздавливанию пропантов обоих типов лучшие показатели долговременной проницаемости магнезиально-кварцевых пропантов на треть (34 %) ниже, чем у алюмосиликатных пропантов. Экономический эффект от снижения цены магнезиально-кварцевого пропанта не перекрывает убытков от недополучения значительной части дополнительной добычи после выполнения гидравлического разрыва пласта (ГРП) из-за уменьшения нефтеотдачи по причине уменьшения проводимости при использовании этого типа раклинивателя. Использование магнезиально-кварцевых пропантов при ГРП убыточно для нефтяных компаний. В меняющихся рыночных условиях АО «БКО» способен выпускать пропанты, удовлетворяющие меняющиеся запросы потребителей. При этом пропанты BORPROP являются лучшими по ключевым показателям – долговременной проводимости и проницаемости.

Ключевые слова: гидравлический разрыв пласта (ГРП), многократный гидроразрыв пласта (МГРП), алюмосиликатные пропанты, BORPROP®, магнезиально-кварцевые пропанты, насыпная плотность, сопротивление раздавливанию, долговременная проводимость

COMPARATIVE EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF ALUMINOSILICATE AND MAGNESIA-QUARTZ PROPPANTS

The results of studies of two main types of ceramic proppants produced by the domestic industry are presented. It is shown that with comparable indices of bulk density and crushing resistance of proppants of both types, the best long-term permeability values of magnesia-quartz proppants are one third (34 %) lower than that of aluminosilicate proppants. The economic effect of reducing the price of magnesia-quartz proppant does not cover the losses from not receiving a significant part of the additional production after hydraulic fracturing (hydraulic fracturing) due to reduced oil recovery due to a decrease in conductivity when using this type of wiper. The use of magnesia-quartz proppants in hydraulic fracturing is unprofitable for oil companies. In the changing market conditions, «БКО» JSC is able to produce proppants that meet the changing needs of consumers. At the same time, BORPROP proppants are the best in terms of key indicators - long-term conductivity and permeability.

Keywords: hydraulic fracturing (hydraulic fracturing), multiple hydraulic fracturing (MSHF), aluminosilicate proppants, BORPROP®, magnesia-quartz proppants, bulk density, crushing resistance, long-term conductivity

SAKULIN A.V.¹, IKSANOV F.R.¹, KORZHAVIN A.Yu.²

¹ JSC «Borovichi Refractories Plant»
Novgorod region, 174411, Russian Federation

² «Trading House BKO» LLC,
Novgorod region, 174411, Russian Federation

УДК 622.276.66.002.34



Российская нефтяная промышленность является одной из главных бюджетобразующих отраслей народного хозяйства. Увеличение добычи нефти при ухудшении горно-геологических условий возможно только при использовании новых технологий. Гидравлический разрыв пласта (ГРП) является на сегодняшний день наиболее результативным геолого-техническим мероприятием, обеспечивающим кратное увеличение добычи и повышение эффективности разработки низкопроницаемых коллекторов. Рост потребления пропантов, в первую очередь, связан с развитием технологии горизонтального бурения и многократного гидроразрыва пласта (МГРП), что в свою очередь определяется геологическими условиями залегания месторождений углеводородов.

В России производят два типа пропантов: алюмосиликатные (содержание Al_2O_3 от 50 до 70 % и SiO_2 от 15 до 30 %) и магнезиально-кварцевые (содержание MgO от 28 до 48 % и SiO_2 от 40 до 60 %). Они различаются по химико-минеральному составу керамической основы, видам используемого минерального сырья, способу его переработки.

АО «БКО» изготавливает алюмосиликатные пропанты из природных глинистых минералов и бокситов, что обеспечивает постоянство их минералогического состава, физико-химических и специальных технических характеристик.

При снижении стоимости нефти, когда удельная стоимость расклинивающего агента в себестоимости нефти повышается, конкуренция между различными типами керамических пропантов становится еще более острой.

АО «БКО» изготавливает алюмосиликатные пропанты из природных глинистых минералов и бокситов, что обеспечивает постоянство их минералогического состава, физико-химических и специальных технических характеристик. Бокситы являются ценным металлургическим сырьем, большая часть их используется для получения алюминия. Ценность бокситов определяет более высокую стоимость алюмосиликатных пропантов.

Магнезиально-кварцевые пропанты было бы точнее назвать магнезиально-силикатными. Их изготавливают несколько российских компаний из магнезиально-силикатных природных минералов и техногенных отходов с добавлением кварцевого песка. Применение отходов значительно удешевляет производство и определяет возможность заметного снижения цены магнезиально-кварцевых пропантов. 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 пропантов.

Как показано в статье [1], сравнение пропантов необходимо производить не по характеристикам ГОСТ Р 51761-2013 (краш-тест, насыпная плотность, ситовой анализ), а по показателям долговременных проводимости и проницаемости пропантной пачки. Эти показатели

Свойства испытываемых пропантов по ГОСТ Р 51761-2013

Наименование показателя	Значение показателей для пропантов			
	Алюмосиликатные BORPROP®		Магнезиально-кварцевые	
	16/20	20/40	16/20	20/40
Насыпная плотность, г/см ³	1,65	1,64	1,65	1,62
Сопротивление раздавливанию, % разрушенных гранул при давлении 68,9 МПа (10 kpsi)	19,60	9,30	20,30	9,10
Содержание основной фракции, %	93,40	96,80	95,80	96,30
Сферичность	0,80	0,90	0,90	0,90
Округлость	0,80	0,90	0,90	0,90

наиболее реально отражают эффект от использования пропантов в ГРП. В настоящей статье приводятся аргументы и расчеты безразмерной проводимости трещины – основного параметра, используемого для характеристики скважины после ГРП. Сведения основаны на экспериментально полученных данных, показывающих, что использование алюмосиликатных пропантов позволяет получить увеличение дебета, превышающее степень увеличения его цены в сравнении с магнезиально-кварцевыми пропантами.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДУЕМЫХ ПРОПАНТОВ

Тестирование по основным свойствам проведено на образцах алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых пропантов фракций 16/20 и 20/40. Как видно из результатов испытаний (табл.), основные свойства обоих типов пропантов, такие как прочность (сопротивление раздавливанию), содержание основной фракции, сферичность и округлость сопоставимы.

При этом следует отметить, что как указано в [2], с 2007 г. наблюдается существенное снижение насыпной плотности алюмосиликатных пропантов с 1,80 до 1,65 г/см³, что связано с использованием инновационных технологий и постоянным совершенствованием процесса производства, в соответствии с запросами нефтяных компаний. В 2019 г. по этому показателю алюмосиликатные и магнезиально-кварцевые пропанты сравнялись.

Использование алюмосиликатных пропантов позволяет получить увеличение дебета, превышающее степень увеличения его цены в сравнении с магнезиально-кварцевыми пропантами.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Сравнение пропантов производили путем измерения долговременной проводимости и проницаемости пропантой пачки. Измерения производили по методике ISO 13503-5:2006 на установке, разработанной и изготовленной компанией Corelab Instruments.

Условия проведения измерений проводимости:

- пластины песчаника из штата Огайо (США);
- концентрация пропанта – 2 фунта на квадратный фут;
- температура – 121 °С.

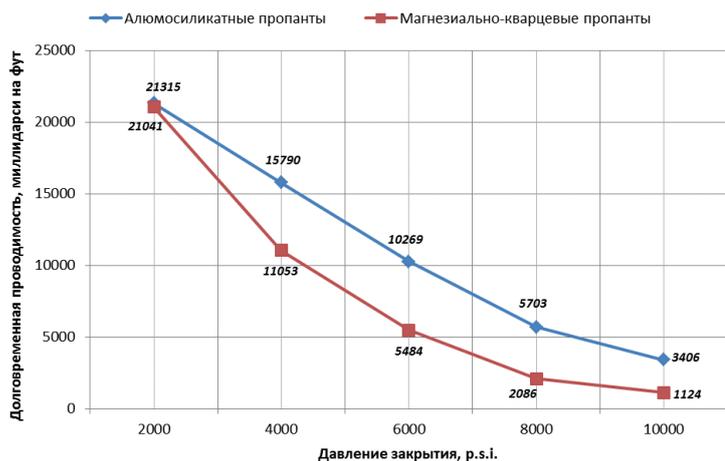


Рис. 1. Графики изменения долговременной проводимости пропантов фракции 16/20 от давления закрытия трещины

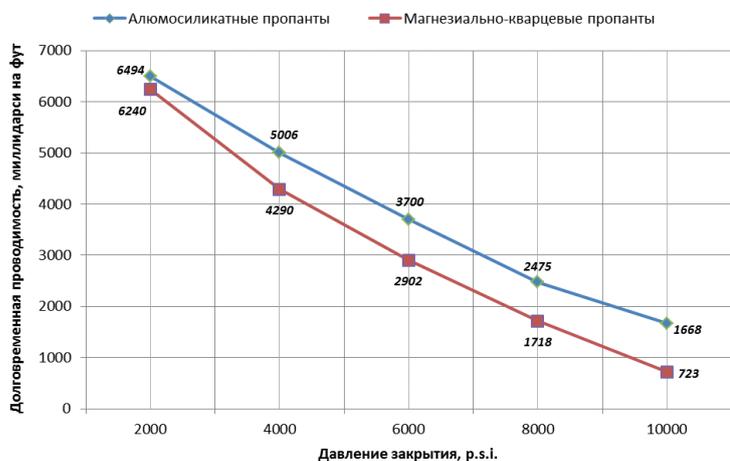


Рис. 2. Графики изменения долговременной проводимости пропантов фракции 20/40 от давления закрытия трещины

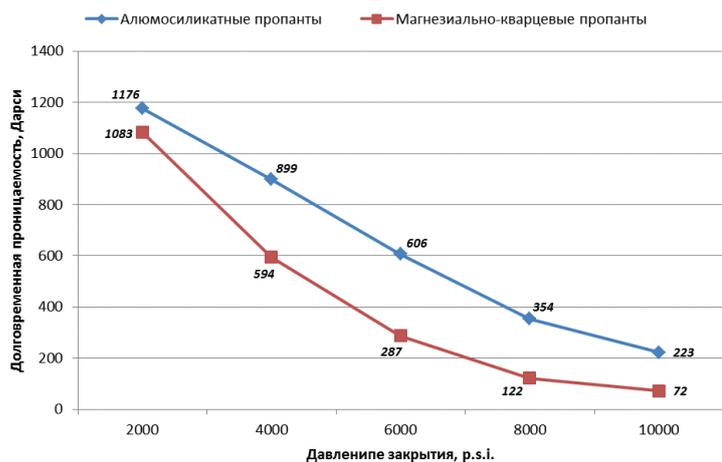


Рис. 3. Графики изменения долговременной проницаемости пропантов фракции 16/20 от давления закрытия трещины

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерений долговременной проводимости пропантов при различных давлениях приведены на диаграммах рис. 1–4.

По результатам измерений долговременной проводимости и проницаемости выявлены и подтверждены нижеизложенные закономерности:

- для всех типов и фракций с увеличением давления закрытия трещины долговременная проводимость и проницаемость пропантов пачки уменьшается;

- для всех типов и фракций при всех давлениях закрытия трещины долговременная проводимость и проницаемость алюмосиликатных пропантов выше, чем магнезиально-кварцевых. Если при низком давлении 2000 psi, различие проводимости и проницаемости не столь существенно, в пределах погрешности эксперимента, то при более высоких давлениях, от 4000 до 10000 psi, с ростом давления она увеличивается;

- для пропантов фракции 16/20 превышение проводимости алюмосиликатных пропантов в сравнении с магнезиально-кварцевыми начинается с 1,42-кратного при давлении 4000 psi, и достигает 3-кратного при давлении 10 000 psi, аналогично увеличивается и проницаемость;

- для пропантов фракции 20/40 превышение проводимости алюмосиликатных пропантов несколько ниже, но тоже существенно: начинается с 1,16-кратного при давлении 4000 psi и достигает 2,3-кратного при давлении 10 000 psi, аналогично увеличивается и проницаемость.

Причины различия проводимости и проницаемости пропантов двух типов были обозначены в публикациях [1, 3, 4]. Пониженная долговременная проводимость и проницаемость магнезиально-кварцевых пропантов 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 обвальный характер, аналогичный разрушению песков. Поэтому, несмотря на керамический способ производства, магнезиально-силикатные пропанты следует отнести к продукту, занимающему промежуточное положение между керамическими пропантами и кварцевым песком, и называть их правильнее не керамическими пропантами, а **модифицированным песком**, тем более что содержание основного компонента SiO_2 в них около 70 %.

Причины различия проводимости и проницаемости пропантов двух типов были обозначены в публикациях. Пониженная долговременная проводимость и проницаемость магнезиально-кварцевых пропантов обусловлены особенностями их состава и способа производства.

РАСЧЕТЫ БЕЗРАЗМЕРНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ТРЕЩИНЫ

Оценку эффективности применения пропантов производили по показателю безразмерной проводимости трещины – ключевому параметру, используемому при оценке характеристики притока к скважине:

где $k_f \times w$ – произведение проницаемости трещины k_f на ее ширину w , т. е. способность трещины проводить жидкость к скважине, так называемая проводимость



трещины, $k \times X_f$ – произведение проницаемости пласта k на длину трещины X_f , т. е. способность пласта доставлять жидкость к трещине [5].

Безразмерная проводимость трещины связана прямой пропорциональной зависимостью с величиной безразмерного индекса продуктивности скважины.

Расчеты безразмерной проводимости трещины производились по вышеприведенной формуле на основании данных измерений долговременной проводимости и проницаемости пропантов. При этом для расчетов принимали длину трещины равной 100 м, а ее ширину – 10 мм.

Результаты расчетов приведены на графиках (рис. 5, 6) и диаграмме на (рис. 7).

Безразмерная проводимость трещины связана прямой пропорциональной зависимостью с величиной безразмерного индекса продуктивности скважины.

Графики зависимости безразмерной проводимости трещины от давления смыкания на рис. 5 и 6 повторяют тенденции, описанные для измеренных значений долговременной проводимости пропантов различных типов и фракций.

В связи с этим безразмерная проводимость алюмосиликатных пропантов обеих фракций превосходит аналогичный показатель магнезиально-кварцевых пропантов при всех давлениях. Диаграммы на рис. 7 и 8 показывают соотношение между алюмосиликатными и магнезиально-кварцевыми пропантами по безразмерной проводимости. За 100 % принята безразмерная проводимость алюмосиликатных пропантов.

В связи с этим безразмерная проводимость алюмосиликатных пропантов обеих фракций превосходит аналогичный показатель магнезиально-кварцевых пропантов при всех давлениях. Диаграммы на рис. 7 и 8 показывают соотношение между алюмосиликатными и магнезиально-кварцевыми пропантами по безразмерной проводимости. За 100 % принята безразмерная проводимость алюмосиликатных пропантов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенными испытаниями и расчетами показано:

1. Существовавшее ранее преимущество магнезиально-кварцевых пропантов в более низком насыпном весе производителями алюмосиликатных пропантов преодолено. С 2019 г. этот показатель для обоих видов пропантов сравнялся.
2. Использование алюмосиликатных пропантов

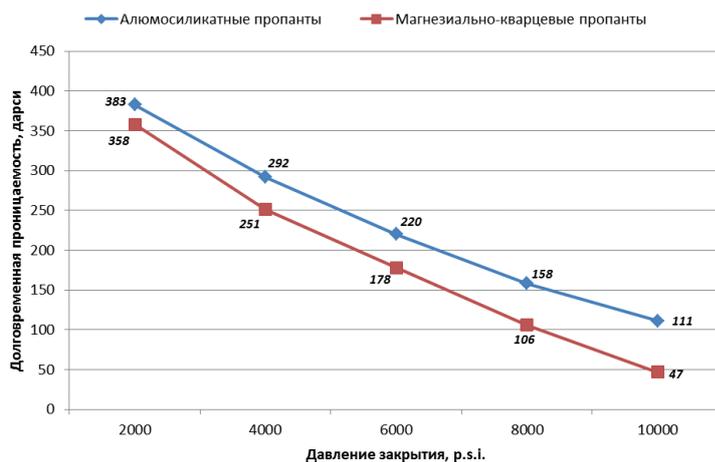


Рис. 4. Графики изменения долговременной проницаемости пропантов фракции 20/40 от давления закрытия трещины

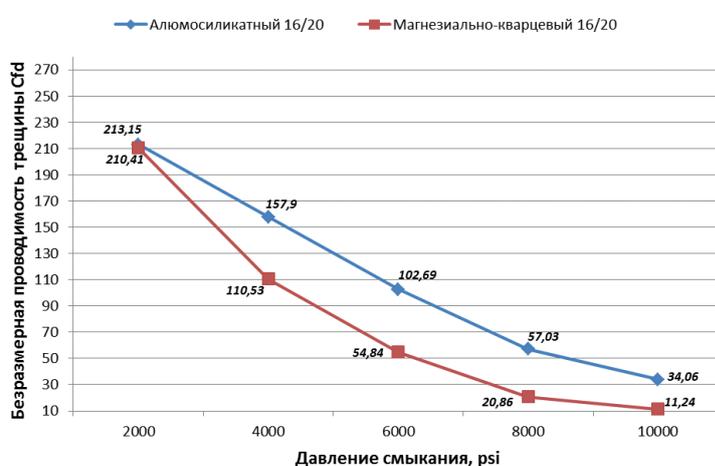


Рис. 5. График зависимости безразмерной проводимости трещины от давления для пропантов фракции 16/20

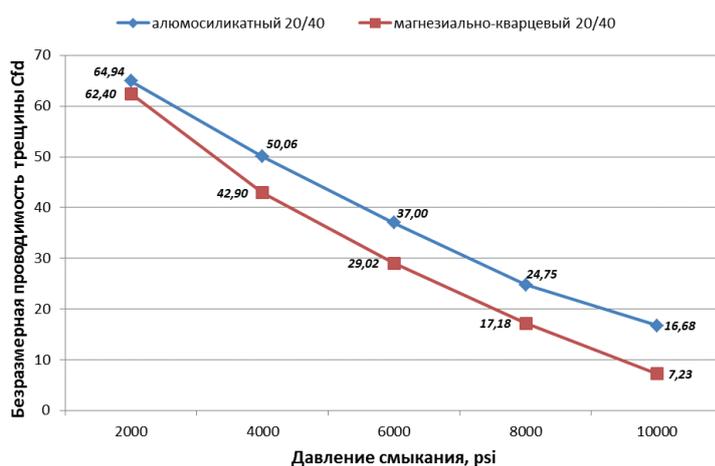


Рис. 6. График зависимости безразмерной проводимости трещины от давления для пропантов фракции 20/40

позволяет получить более высокий дополнительный дебет, чем при использовании магнезиально-кварцевых пропантов.

3. Более высокая продуктивность при использовании алюмосиликатных пропантов определяется их более высокой долговременной проводимостью (проницаемостью).

4. Пониженная долговременная проводимость и проницаемость магнезиально-кварцевых пропантов обусловлены особенностями их состава и способа производства.

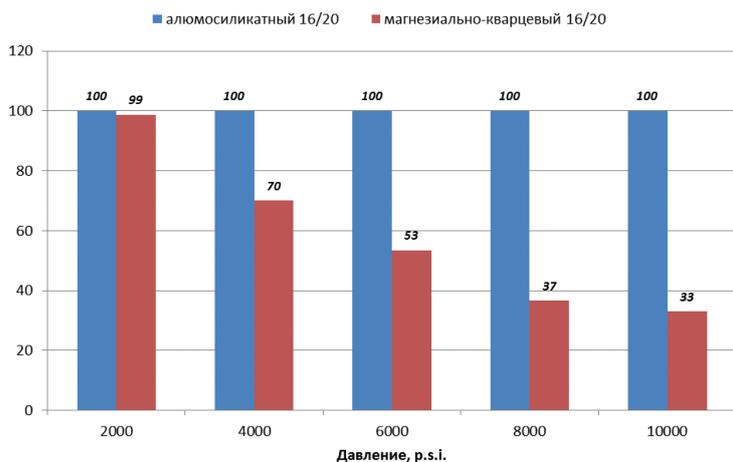


Рис. 7. Процентное соотношение безразмерной проводимости пропантов фракции 16/20 различных марок в зависимости от давления смыкания трещины

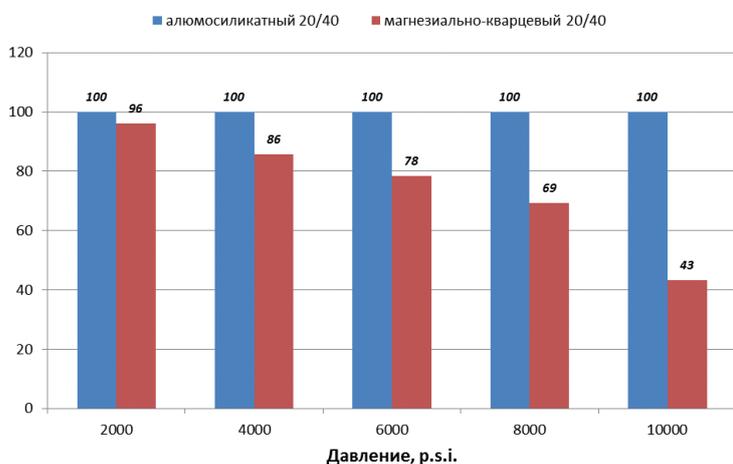


Рис. 8. Процентное соотношение безразмерной проводимости пропантов фракции 20/40 различных марок в зависимости от давления смыкания трещины

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., Коржавин А.Ю. Эволюция пропанта BORPROP // «Время колтюбинга. Время ГРП». 2017. № 3 (061). С. 86–91.
3. Можжерин А.В., Сакулин А.В., Скурихин В.В., Коржавин А.Ю. Исследования остаточной проводимости алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых пропантов при циклических нагрузках // Бурение и нефть. 2017. № 5. С. 42–45.
4. Сакулин А.В., Иксанов Ф.Р., Коржавин А.Ю., Штурн Д.В. Сравнительная оценка эффективности применения пропантов фракций 16/30 и 16/20 // Бурение и нефть. 2019. № 12. С. 14–17.
5. Гидравлический разрыв пласта / Кузнецов Д.С., Кулагина Т.Е., Малахов Д.А., Меркулов В.П. Томск, 2010.

References

1. Mozherin A.V., Korzhavin A.Yu. Krash-test ili provodimost' Otsenka kachestva alyumosilikatnykh i magnezial'no-kvartsevykh propantov [Crash test or conductivity? Assessment of the quality of aluminosilicate and magnesia-quartz proppants]. *Neftgazovaya vertikal'* [Oil and gas vertical], 2016, no. 17, pp. 76–78. (In Russian).
2. Mozherin A.V., Korzhavin A.Yu. Evolyutsiya propanta BORPROP [Evolution of BORPROP proppant] «*Vremya koltyubinga. Vremya GRP*». [Coiled tubing time. Frac time]. 2017, no. 3 (061), pp. 86–91. (In Russian).
3. Mozherin A.V., Sakulin A.V., Skurikhin V.V., Korzhavin A.Yu. Issledovaniya ostatochnoy provodimosti alyumosilikatnykh i magnezial'no-kvartsevykh propantov pri tsiklicheskiykh nagruzkakh [Investigations of the residual conductivity of aluminosilicate and magnesia-quartz proppants under cyclic loads]. *Burenije i nef't'* [Drilling and oil], 2017, no. 5, pp. 42–45. (In Russian).
4. Sakulin A.V., Iksanov F.R., Korzhavin A.Yu., Shturn D.V. Sravnitel'naya otsenka effektivnosti primeneniya propantov fraktsiy 16/30 i 16/20 [Comparative evaluation of the effectiveness of the use of proppants fractions 16/30 and 16/20] *Burenije i nef't'* [Drilling and oil], 2019, no. 12, pp. 14–17. (In Russian).
5. Kuznetsov D.S., Kulagina T.Ye., Malakhov D.A., Merkulov V.P. *Gidravlicheskiy razryv plasta* [Hydraulic fracturing], Tomsk, 2010. (In Russian).