



Сравнительная оценка эффективности применения пропантов фракций 16/30 и 16/20



А.В. САКУЛИН,
к.т.н., главный инженер

Ф.Р. ИКСАНОВ,
к.т.н., заместитель начальника
технического отдела
info@aobko.ru

АО «Боровичский комбинат
огнеупоров»
г. Боровичи, 174411,
Новгородская обл., РФ

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

ООО «Торговый Дом БКО»
г. Боровичи, 174411,
Новгородская обл., РФ

Д.В. ШТУРН,
ведущий инженер
по заканчиванию
скважин и ГРП
d.shturn@achimgaz.ru

АО «АЧИМГАЗ»
г. Новый Уренгой, 629303,
Ямало-Ненецкий
автономный округ, РФ

SAKULIN A.V.^{1, 2, 3}
IKSANOV F.R.^{1, 2, 3}
KORZHAVIN A.Yu.^{2, 3}
STURN D.V.³

¹ «Borovich Refractory Plant»
JSC
Borovich, 174411, Novgorod
Region, Russian Federation
² «Trading House BKO» LLC
Borovich, 174411, Novgorod
Region, Russian Federation
³ «Achimgaz» JSC
Novy Urengoy, 629303,
Yamalo-Nenets Autonomous
Okrug, Russian Federation

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

Рассмотрены основные свойства пропантов фракций 16/20 и 16/30 в части максимального эффекта при применении. Проведенные испытания пропантов двух типов (алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых), а также расчеты безразмерной проводимости трещины (основного параметра), используемых для характеристики скважины после ГРП, показали, что при давлении более 6000 p.s.i. проводимость и эффект от применения алюмосиликатных пропантов фракции 16/30 выше, чем у пропантов фракции 16/20 обоих типов. Наличие нестационарных циклических нагрузок усиливает это преимущество.

Ключевые слова: гидроразрыв пласта (ГРП), алюмосиликатные пропанты, магнезиально-кварцевые пропанты, долговременная проводимость, стационарные нагрузки, циклические нагрузки, давление закрытия трещины, безразмерная проводимость

COMPARATIVE EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF APPLICATION OF PROPANTS OF FRACTIONS 16/30 AND 16/20

The main properties of the proppants of fractions 16/20 and 16/30 are considered in terms of the maximum effect when applied. The tests of two types of proppants (aluminosilicate and magnesia-quartz), as well as calculations of the dimensionless conductivity of the fracture (the main parameter) used to characterize the well after hydraulic fracturing, showed that at a pressure of more than 6000 p.s.i. the conductivity and effect of the use of aluminosilicate proppants of fraction 16/30 is higher than that of proppants of fraction 16/20 of both types. The presence of non-stationary cyclic loads reinforces this advantage.

Keywords: hydraulic fracturing (Fracturing), aluminosilicate proppants, magnesia-quartz proppants, long-term conductivity, stationary loads, cyclic loads, crack closing pressure

На сегодня российскими нефтедобывающими компаниями для закрепления трещин ГРП применяются пропанты четырех фракций, из которых две основные – 16/20 и 12/18 и две вспомогательные – 16/30 и 20/40. Выбор нужного размера зерен пропанта определяется комплексом геологических и технических факторов. Логично утверждение, что чем крупнее гранулы, тем большей проницаемостью обладает упаковка пропанта в трещине. Однако использование пропанта крупной фракции сопряжено с рядом дополнительных проблем:

1. Необходимость создания более высокого чистого давления внутри трещины для обеспечения дополнительной ширины, позволяющей транспортировать пропант вдоль трещины.

2. Прочность пропанта снижается с увеличением размеров гранул. Кроме того, в слабосцементированных коллекторах предпочтительным оказывается использование пропанта более мелкой фракции, так как за счет выноса из пласта мелкодисперсных частиц упаковка крупнозернистого пропанта постепенно засоряется и ее проницаемость снижается [1].

3. Зависимость от размера перфорационного отверстия. Размер пропанта должен быть в шесть раз меньше диаметра перфорационного отверстия в обсадной трубе. Если отверстие оказывается недостаточным для прохождения пропанта, то происходит закупорка перфораций, поступление пропанта в пласт прекращается и наблюдается остановка закачки [2]. Стоит отметить, что пропанты фракций 16/20 и 16/30 имеют одинаковый максимальный размер зерна, поэтому для их применения не требуется изменения размера перфорации, т.е. по этому признаку они сопоставимы.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДУЕМЫХ ПРОПАНТОВ

Сравнение пропантов необходимо производить не по характеристикам ГОСТ Р 51761-2013, а по показателям проводимости (проницаемости) пропантной пачки [3]. Эти показатели наиболее реально отражают эффект от использования пропантов в ГРП. Сравнение проводимости (проницаемости) различных по составу и исполнению пропантов позволяет выделить наиболее подходящий для тех или иных условий эксплуатации.



Исследования для данной статьи проведены на образцах алюмосиликатных пропантов фракции 16/20, 16/30 и магнезиально-кварцевых пропантов фракции 16/20. 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

Сравнение пропантов осуществляли путем измерения долговременной проводимости и проницаемости пропантовой пачки. Измерение проводимости производили по методике ISO 13503-5:2006 на установке, разработанной и изготовленной компанией CorelabInstruments. Условия проведения измерений: пластины песчаника из штата Огайо, концентрация пропанта 2 фунта на квадратный фут, температура 121 °С, интервал изменения давления от 2 до 10 kpsi с шагом 2 kpsi, выдержка 50 часов на каждой ступени.

Для измерения остаточной проводимости пропантов при циклических нагрузках была использована методика, применяемая лабораторией Stim-Lab [4]. Измерения проводили при режиме циклического нагружения 6kpsi – 3kpsi – 6kpsi [табл. 2 и 3], соответствующие наиболее распространённому уровню давления закрытия для трещин ГРП в России.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение долговременной проводимости

В связи с тем, что проводимость пачки пропантов рассчитывается умножением проницаемости на ее ширину, обсуждаются только результаты измерений проводимости при различных давлениях, которые приведены на графике (рис. 1).

По полученным результатам выявлена и подтверждена закономерность – увеличением давления закрытия трещины долговременная проводимость пропантовой пачки снижается. При этом минимальная скорость уменьшения наблюдается для алюмосиликатных пропантов фракции 16/30 – в среднем 2388 мД/фут на каждые 1000 p.s.i., максимальная – для магнезиально-кварцевых пропантов – в среднем 3351 мД/фут на каждые 1000 p.s.i. За счет самой низкой скорости снижения проводимости алюмосиликатных пропантов фракции 16/30, самая низкая в начале испытаний, сравнивается с проводимостью магнезиально-кварцевых пропантов фракции 16/20 при давлении 4000 p.s.i., а при давлении 6000 p.s.i. – с проводимостью алюмосиликатных пропантов фракции 16/20. А при давлениях 8000 и 10000 p.s.i. преимущество алюмосиликатного пропанта 16/30 над алюмосиликатным пропантом 16/20 и, тем более, магнезиально-кварцевым пропантом 16/20 становится больше.

Анализ результатов для алюмосиликатного пропанта 16/30 подтверждает, что его полифракционный состав способствует образованию более плотной упаковки частиц в пачке, за счет чего при малых давлениях (до 4000 p.s.i.) долговременная проводимость меньше, чем у остальных пропантов. Но этот же полифракционный состав (за счет увеличения числа контактов между частицами) позволяет снизить давление единичных контактов и предотвратить разрушение частиц пропанта при высоких давлениях. По этой причине проводимость пропанта фракции 16/30 при давлениях 4000 p.s.i. сначала

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

| Наименование показателя | Значение показателей для пропантов | | |
|---|------------------------------------|-------|------------------------------|
| | Алюмосиликатный BORPROP® | | Магнезиально-кварцевый 16/20 |
| | 16/20 | 16/30 | |
| Насыпная плотность, г/см³ | 1,65 | 1,69 | 1,55 |
| Сопротивление раздавливанию, % разрушенных гранул при давлении 68,9 МПа (10 kpsi) | 19,6 | 12,5 | 20,1 |
| Содержание основной фракции, % | 95,1 | 96,5 | 95,5 |
| Гранулометрический состав, остатки на ситах %: | | | |
| 12 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 1,3 | 3,5 | 1,7 |
| 18 | 53,1 | 37,3 | 50,1 |
| 20 | 42,0 | 40,8 | 45,4 |
| 25 | 3,3 | 10,5 | 2,5 |
| 30 | 0,2 | 7,9 | 0,2 |
| 40 | 0,1 | 0 | 0,1 |
| Поддон | 0 | 0 | 0 |
| Сферичность | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| Округлость | 0,8 | 0,9 | 0,8 |

Табл. 2. Режим циклического нагружения

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

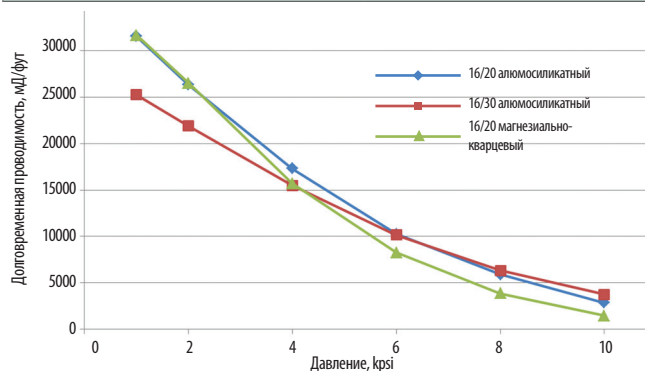


Рис. 1. Графики изменения долговременной проводимости пропантов от давления закрытия

сравнивается с проводимостью магнезиально-кварцевых пропантов фракции 16/20, а при давлении более 6000 p.s.i. уже превышает по проводимости и алюмосиликатный пропант фракции 16/20.

Таким образом, проводимость алюмосиликатного пропанта фракции 16/30 превосходит проводимость пропантов фракции 16/20:

- Магнезиально-кварцевого пропанта – при давлении выше 4000 p.s.i.
- Алюмосиликатного пропанта – при давлении выше 6000 p.s.i.

Следует также отметить, что увеличение числа контактов между полифракционными частицами (фр. 16/30) способствует лучшему сцеплению их между

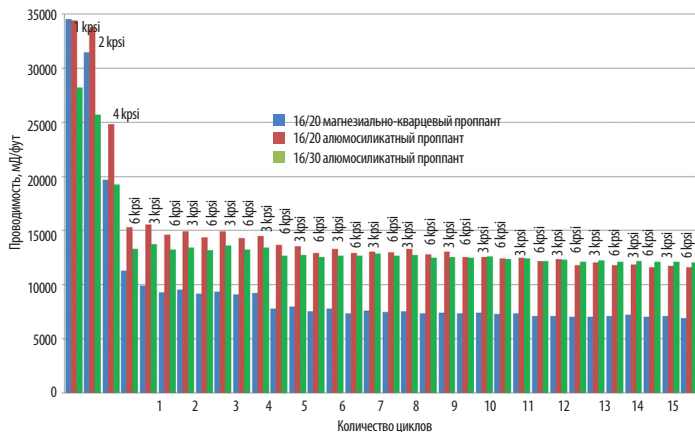


Рис. 3. Результаты измерения остаточной проводимости пропантов в режиме циклического нагружения 6kpsi–3kpsi–6kpsi (15 циклов)



Рис. 4. Сравнение уменьшения проводимости пропантной пачки (в %) по окончании испытания на циклические нагрузки (после 15 циклов)

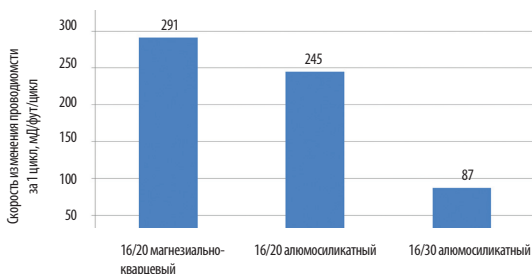


Рис. 5. Сравнение скорости изменения проводимости пропантной пачки в среднем за 1 цикл

собой и повышает стойкость пропантной пачки к выносу по сравнению с упаковкой монофракционных частиц (фр. 16/20), а это может благотворно сказаться на техническом ресурсе насосного оборудования.

СРАВНЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

В процессе эксплуатации скважины происходит закупоривание (кольматация) призабойной зоны намывами мелких (чаще всего глинистых) частиц, выносимых движением жидкости из продуктивных или водоносных слоев. Для очистки фильтрационных каналов призабойной зоны и увеличения притока применяются различные методы, приводящие к циклически меняющимся по величине нагрузкам на пропантную пачку. Поэтому изучение устойчивости пропантов к воздействию циклических нагрузок имеет практический интерес.

Определение устойчивости пропантов к воздействию циклических нагрузок производили измерением проводимости в условиях многократного циклического изменения давления на пропантную пачку. Они осуществлялись при режиме циклического нагружения 6kpsi – 3kpsi – 6kpsi – 15 циклов. Результаты испытаний приведены на графике (рис. 3).

При циклических нагрузках с увеличением количества циклов наблюдается снижение остаточной проводимости. Причем в этом процессе можно отметить некоторую общую взаимосвязь с изменением проводимости при увеличении давления (см. графики на рис. 4 и 5):

- Скорость уменьшения проводимости магниезильно-кварцевых пропантов фракции 16/20 с увеличением количества циклов – максимальная (в среднем 291 мД/фут за 1 цикл), для них же наблюдается максимальное снижение проводимости по окончании испытания (39 %).

- Минимальная скорость уменьшения проводимости с увеличением количества циклов (в среднем 87 мД/фут за 1 цикл) – у алюмосиликатных пропантов фракции 16/30, у которых наблюдается минимальное снижение проводимости по окончании испытания (10 %).

- Скорость уменьшения проводимости алюмосиликатных пропантов фракции 16/20 с увеличением количества циклов (в среднем 245 мД/фут за 1 цикл) меньше, чем у магниезильно-кварцевых пропантов, но больше, чем у алюмосиликатных пропантов фракции 16/30. а максимальное снижение проводимости по окончании испытания (24 %).

К окончанию испытаний проводимость алюмосиликатных пропантов фракции 16/30 превышает проводимость алюмосиликатных пропантов фракции 16/20 на 3 %, а магниезильно-кварцевых пропантов фракции 16/20 – на 37 %.

Проведенные испытания дополнительно подтверждают, что пониженная долговременная проводимость магниезильно-кварцевых пропантов и 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 обвальный характер, аналогичный разрушению производств, магниезильно-силикатные 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 %.

Низкая скорость разрушения алюмосиликатного пропанта фракции 16/30 при циклических нагрузках обусловлена их расширенным гранулометрическим составом, за счет которого снижается нагрузка на каждую из гранул и предотвращается их преждевременное разрушение.

РАСЧЕТЫ БЕЗРАЗМЕРНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ТРЕЩИНЫ

Оценку эффективности применения пропантов производили по показателю безразмерной проводимости трещины – ключевому параметру, используемому при оценке характеристики притока к скважине. При этом для расчетов принимали длину трещины равной 100 м, а ее ширину – 10 мм, проницаемость пласта – 1 миллидарси.

$$C_{fd} = k_f w / k X_f$$



где k_{fv} – произведение проницаемости трещины k_f на ее ширину w , т.е. способность трещины проводить жидкость к скважине, так называемая проводимость трещины, k_{xf} – произведение проницаемости пласта k на длину трещины X_f [6].

Расчеты носят сравнительный характер и не учитывают скин-фактор, дополнительные несовершенства трещин и т.д.

Расчеты безразмерной проводимости трещины производились по вышеприведенной формуле на основании данных измерений долговременной проводимости и проницаемости пропантов.

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

Результаты расчетов приведены на графиках (рис. 6) и диаграммах на (рис. 7).

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

В связи с этим, безразмерная проводимость алюмосиликатного пропанта фракции 16/30 превосходит аналогичный показатель пропантов фракции 16/20 при следующих условиях:

- Магнезиально-кварцевого пропанта – при давлении выше 4000 p.s.i.
- Алюмосиликатного пропанта – при давлении выше 6000 p.s.i.

На рис. 7 показано сравнение безразмерной проводимости, где в качестве базовой величины составляющей 100 % принят алюмосиликатный пропант марки 1 фракции 16/20. По диаграммам можно установить, что при давлении 10000 p.s.i. относительное превосходство алюмосиликатного пропанта марки 2 фракции 16/30 по величине безразмерной проводимости составляет:

- Над магнезиально-кварцевым пропантом марк 1 и 3 фр.16/20 – в 2,5 раза.
- Над алюмосиликатным пропантом марки 1 фр. 16/20 – в 1,3 раза.

ВЫВОДЫ

Проведенными испытаниями и расчетами показаны преимущества пропанта фракции 16/30 по сравнению с пропантом фракции 16/20 в определенных случаях.

При давлении 4000 p.s.i. долговременная проводимость всех испытанных пропантов сравнивается (в пределах погрешности измерения), а при давлении более 6000 p.s.i. проводимость алюмосиликатных пропантов фракции 16/30 превышает проводимость пропантов фракции 16/20 обоих типов (магнезиально-кварцевых и алюмосиликатных).

Таким образом, выявлены условия, при которых алюмосиликатные пропанты фракции 16/30 имеют более высокую долговременную проводимость, чем пропанты фракции 16/20:

- Давление закрытия более 6000 p.s.i. (48,2 МПа).
- Наличие нестационарных циклических нагрузок.

В этих условиях использование алюмосиликатных пропантов фракции 16/30 позволит получить более высокие значения безразмерной проводимости пропантной пачки, чем при использовании как алюмосиликатных, так и магнезиально-кварцевых пропантов фракции 16/20, что в итоге может оказать положительное влияние на результаты интенсификации и дебит скважины.

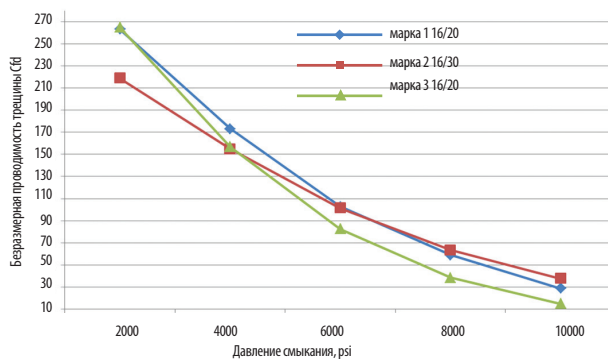


Рис. 6. Зависимость безразмерной проводимости трещины от давления смыкания трещины для пропантов различных марок и фракций. Марка 3 – магнезиально-кварцевый пропант, марки 1 и 2 – алюмосиликатный пропант

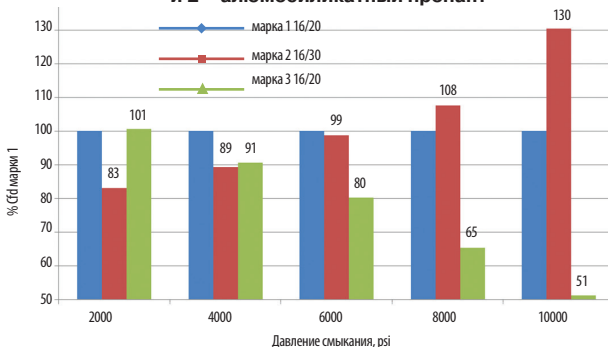


Рис. 7. Процентное соотношение безразмерной проводимости пропантов различных марок в зависимости от давления смыкания трещины. Марки 1 и 2 – алюмосиликатный пропант, марка 3 – магнезиально-кварцевый пропант

Литература

1. Kuzkin V.A., Krivtsov A.M., Linkov A.M. Computer simulation of effective viscosity of fluid-proppant mixture used in hydraulic fracturing // arXiv: 1310.2720 [physics.flu-dyn], 2013.
2. Грамотный подход к перфорационным работам. 2016. [Электронный ресурс]. URL: http://www.nftn.ru/blog/gramotnyj_podkhod_k_perforacionnym_rabotam_1830 (дата обращения: 16.07.2016).
3. Можжерин А.В., Коржавин А.Ю. Краш-тест или проводимость? Оценка качества алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых пропантов // Нефтегазовая вертикаль. 2016. № 17. С. 76–78.
4. Отчет лаборатории StimLab SL 7944, май 2008.
5. Можжерин А.В. [и др.]. Исследования остаточной проводимости алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых пропантов при циклических нагрузках // Бурение и нефть. 2017. № 5. С. 42–45.
6. Гидравлический разрыв пласта / Кузнецов Д.С. [и др.]. Томск-2010. С. 161–162.

References

1. Kuzkin V.A., Krivtsov A.M., Linkov A.M. Computer simulation of effective viscosity of fluid-proppant mixture used in hydraulic fracturing. arXiv: 1310.2720 [physics.flu-dyn], 2013.
2. A competent approach to perforation. 2016. [in Russian]. Available at: http://www.nftn.ru/blog/gramotnyj_podkhod_k_perforacionnym_rabotam_1830. (accessed 16.07.2016).
3. Mozhzherin A.V., Korzhavin A.Yu. Crash-test ili provodimost' Otsenka kachestva alyumosilikatnykh i magnezial'no-kvartsevykh propantov [Crash test or conductivity? Quality assessment of aluminosilicate and magnesia-quartz proppants]. *Neftegazovaya vertikal'* [Oil and gas vertical], 2016, no. 17, pp. 76–78. (In Russian).
4. *Otchet laboratorii StimLab SL 7944* [Report of the laboratory StimLab SL 7944]. May 2008.
5. Mozhzherin A.V. Issledovaniya ostatochnoy provodimosti alyumosilikatnykh i magnezial'no-kvartsevykh propantov pri tsiklicheskikh nagruzkakh [Studies of the residual conductivity of aluminosilicate and magnesia-quartz proppants under cyclic loads]. *Bureniye i nef't'* [Drilling and oil], 2017 no. 5, pp.42–45. (In Russian).
6. Kuznetsov D.S. *Gidravlicheskiy razryv plasta* [Hydraulic fracturing]. Tomsk-2010, pp. 161–162 (In Russian).