

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.276

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОВОДИМОСТИ ТРЕЩИН С ПРОППАНТОМ ИЗ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ МИКРОСФЕР В УСЛОВИЯХ МАЛОГЛУБИННОГО ГИДРОРАЗРЫВА НЕФТЯНОГО ПЛАСТА

Т. В. Шилова, М. В. Курленя, С. В. Сердюков

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: ss3032@yandex.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Приведены результаты лабораторных исследований проводимости трещин с проппантом из алюмосиликатных микросфер АСПМ-500 в комплексе с кислотной обработкой для условий малоглубинного гидроразрыва пласта при термошахтной добыче тяжелых нефтей. Показано, что использование алюмосиликатных микросфер для локального разрыва пород является перспективным направлением развития технологий шахтного гидроразрыва.

Тяжелые нефти, термошахтная разработка, локальный гидроразрыв, трещина, проппант, алюмосиликатные микросферы, проводимость, кислотная обработка, проницаемость

DOI: 10.15372/FTPRPI20170612

В настоящее время важнейшее направление совершенствования подземно-поверхностной системы термошахтной разработки тяжелых нефтей связано с увеличением производительности парораспределительных скважин [1, 2]. Эффективное решение этой задачи заключается в гидроразрыве продуктивного пласта, применяемого для интенсификации добычи сланцевого газа и легких нефтей. Нефтепромысловый гидроразрыв выполняют с дневной поверхности через глубокие скважины с закачкой рабочих жидкостей сложного состава в смеси с раскрепляющим материалом (проппантом) в объеме до нескольких сотен и тысяч тонн (рис. 1а). Для многостадийных разрывов используются бесшовные гибкие трубы, скважинные клапанные системы, ориентированные по габаритам и своим характеристикам на проведение работ с дневной поверхности [3].

Особенности шахтной добычи не позволяют напрямую внедрять дорогостоящие технологические и технические способы нефтепромыслового гидроразрыва. Следует отметить, что подземное оборудование ограничено размерами горных выработок, а технологические операции осуществляются в восстающих необсаженных скважинах. При этом стоимость работ должна соответствовать невысоким экономическим показателям и темпам разработки вязкой нефти тепловыми методами. Сложность адаптации нефтепромыслового гидроразрыва к шахтным условиям и высокая стоимость ведут к нерентабельности данного технологического процесса в термошахтной добыче тяжелых нефтей.

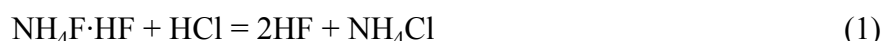


Рис. 1. Разномасштабные работы по нефтепромысловому (а) и инженерному (б) гидроразрывам горных пород с дневной поверхности

Приемлемыми показателями обладает технология локального подземного гидроразрыва, получившая распространение в подземном строительстве, неотъемлемой частью которой являются малогабаритные скважинные устройства со сдвоенными надувными герметизаторами [4, 5] (рис. 1б). Объем закачки рабочей жидкости на одну операцию обычно не превышает 50–100 дм³. На рис. 1 показана разница масштабов и технической сложности оборудования локального и нефтепромыслового гидроразрывов.

Разрыв продуктивного пласта без раскрепления трещины пропантом приводит к плотному смыканию ее берегов и, как следствие, низкой проводимости. Поскольку при локальном гидроразрыве для подачи рабочей жидкости приняты гибкие рукава высокого давления (РВД) с диаметром проходного сечения менее 25 мм и насосное оборудование с малым расходом (до 35 дм³/мин) [5], то возникает проблема низкой грузонесущей способности фильтрационного потока, доставки пропанта в интервал разрыва и создаваемую трещину. Для ее решения в условиях малоглубинного гидроразрыва продуктивных пластов (глубина залегания менее 200 м, горное давление до 5 МПа) авторами предложено расклинивать трещины разрыва алюмосиликатными микросферами, например, марки АСПМ-500, которые изготавливаются в больших масштабах из зольных отходов на российских ТЭЦ [6, 7]. Такие микросферы обладают плотностью порядка 650–800 кг/м³, способствующей их транспортированию низковязкой рабочей жидкостью по каналам малого сечения. Из-за относительно невысокой прочности (предел прочности на сжатие 15–29 МПа) в процессе гидроразрыва возможно разрушение микросфер и снижение проводимости трещины. Для уменьшения риска разрушения пропанта рекомендуется подавать его в интервал разрыва после завершения формирования трещины, когда давление рабочей жидкости ненамного превышает ее сжатие в породном массиве.

В качестве дополнительного средства увеличения проводимости трещин предусмотрена кислотная обработка их берегов. В технологии химически активная жидкость гидроразрыва образуется непосредственно в трещине путем смешивания двух составов, разделяемо закачиваемых по РВД, а именно: смеси водного раствора бифторида аммония с алюмосиликатными микросферами и водного раствора соляной кислоты (21.4% мас). В результате химической реакции



получается плавиковая кислота, которая в смеси с избытком соляной кислоты оказывает влияние на кварц- и карбонатсодержащие породы. Раздельная закачка компонентов рабочей жидкости обеспечивает защиту скважинного оборудования от коррозии, а также позволяет регулировать интенсивность и продолжительность химического воздействия на горные породы в зависимости от их минерального состава.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Проводимость трещин изучалась на лабораторной установке [8], которая была реконструирована под фильтрацию жидкости. Для этого объем системы поддержания среднего и дифференциального давлений газа был отделен от рабочей жидкости мембранными разделителями. На рис. 2 представлены фотографии образцов горной породы, один из которых с сомкнутой трещиной (рис. 2а), а другой — с трещиной, заполненной алюмосиликатными микросферами (рис. 2б). Вид поверхности берегов трещины разрыва в образцах приведен на рис. 2в.

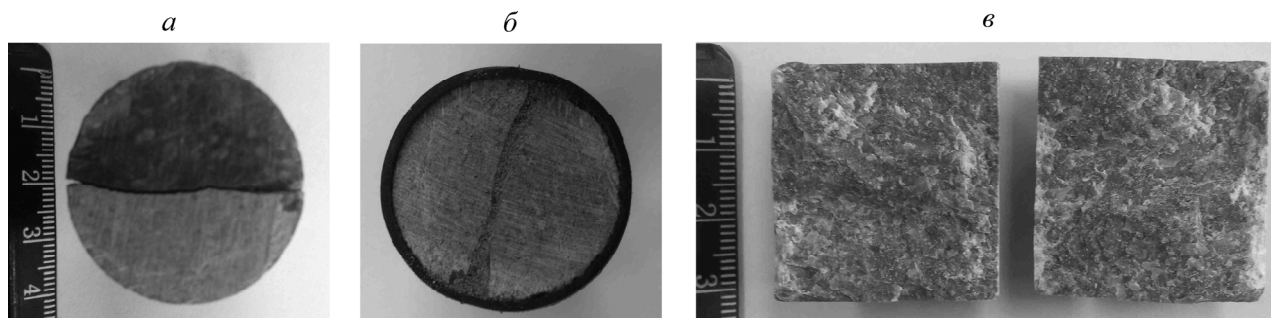


Рис. 2. Фотографии образца карбонатсодержащей породы с трещинами разрыва: а — сомкнутая; б — заполненная алюмосиликатными микросферами; в — поверхности берегов трещины разрыва в образце

Оценка влияния кислотной обработки и проппанта на проводимость трещин разрыва осуществлялась при различных значениях всестороннего сжатия образцов σ в режиме стационарной линейной фильтрации воды со средним давлением, соответствующим натурным условиям. Увеличение σ проводилось последовательно от 1 до 5 МПа с шагом 1 МПа. При каждом заданном значении σ образец породы выдерживали 8 ч, после чего выполнялась серия опытов с различными перепадами давления ΔP между входом и выходом фильтрационного потока.

Эксперименты велись как на образцах, содержащих сомкнутую трещину без кислотной обработки и проппанта, так и с трещиной шириной 1.5 мм, заполненной смесью водных растворов бифторида аммония с алюмосиликатными микросферами (состав А) и соляной кислотой (состав Б). Для получения состава А в емкость вместимостью 10 дм³ наливали 3.6 дм³ воды, температура которой была 15–18 °С, затем небольшими порциями, постоянно перемешивая, насыпали 0.57 кг бифторида аммония и 1.47 кг алюмосиликатных микросфер АСПМ-500. Аналогично приготавливался состав Б. Для этого в емкость вместимостью 10 дм³ наливали 1.0 дм³ воды, температура которой 15–18 °С, и небольшими порциями, постоянно перемешивая, вливали техническую соляную кислоту 1 сорта в другую емкость объемом 8.2 дм³. Состав выдерживали в данном состоянии в течение 1 ч. Далее жидкости А и Б смешивали между собой, заливали в трещину разрыва и спустя 15 мин проводили эксперименты.

Обработку результатов измерений проводимости трещины K_f выполняли по формуле для ламинарного потока

$$K_f = \mu \frac{QL^2}{S_f \Delta P}, \quad (2)$$

где $K_f = kw$; k — проницаемость трещины; w , L , h — раскрытие (ширина), длина и высота трещины, соответственно; $S_f = wL$ — площадь трещины; Q — объемная скорость фильтрационного потока жидкости; ΔP — перепад давления на входе и выходе фильтрационного потока в образце; μ — динамическая вязкость жидкости при температуре испытания.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В первой серии экспериментов изучалась зависимость проводимости сомкнутой трещины без кислотной обработки и заполнения пропантом от всестороннего сжатия образца. Для каждого значения σ в диапазоне 1–5 МПа с шагом 1 МПа принималось давление ΔP от 0.01 до 0.2 МПа с шагом 0.05 МПа. Данные измерений обрабатывали по формуле (2) и получали произведение проводимости трещины на площадь ее поверхности (рис. 3). Установлено, что проводимость трещин линейно падает с ростом всестороннего сжатия, уменьшаясь в 2.8–3.1 раза, когда σ увеличивается в 5 раз с 1 до 5 МПа. Это свидетельствует о малой эффективности дренирования породного массива трещинами гидроразрыва без их заполнения расклинивающим материалом.

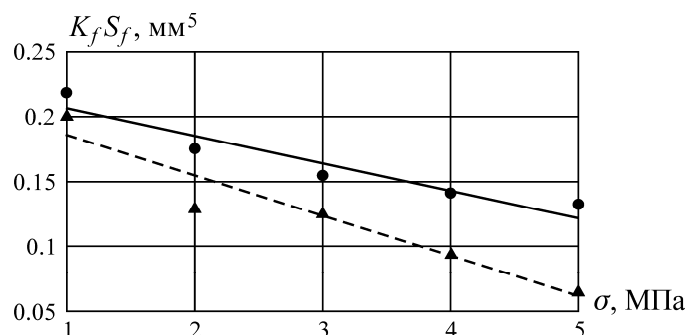


Рис. 3. Зависимость величины $K_f S_f$ сомкнутой трещины без пропанта и кислотной обработки от всестороннего сжатия образца: сплошная линия — кварцсодержащая порода; пунктирная — карбонатсодержащая

Во второй серии экспериментов оценивалось влияние горного давления σ на раскрытие и проводимость трещин, наполненных алюмосиликатными микросферами (рис. 2б), до и после кислотной обработки химически активной жидкостью разрыва (таблица).

Зависимость раскрытия и проводимости трещин, заполненных алюмосиликатными микросферами, от всестороннего сжатия образцов горной породы

σ , МПа	Раскрытие трещины с пропантом w , мм		$(K_f S_f)$, мм ⁵
	без кислотной обработки	с кислотной обработкой	
Образец кварцсодержащей породы			
1	1.485	1.949	9.957
2	1.450	1.898	8.227
3	1.430	1.880	5.990
4	1.419	1.863	4.647
5	1.410	1.845	4.182
Образец карбонатсодержащей породы			
1	1.474	2.013	9.143
2	1.446	1.925	8.404
3	1.422	1.855	7.325
4	1.415	1.810	6.484
5	1.390	1.785	4.980

На рис. 4 приведены зависимости раскрытия трещин, заполненных проппантом, от всестороннего сжатия образцов горной породы с кислотной обработкой и без нее. Увеличение сжатия образца вызывает снижение раскрытия трещин на 5–11 %, а при кислотной обработке их берегов величина w примерно на 30 % больше. Зависимость раскрытия трещины с проппантом и кислотной обработкой от σ описывается линейно с коэффициентом детерминации $r^2 = 0.929–0.952$.

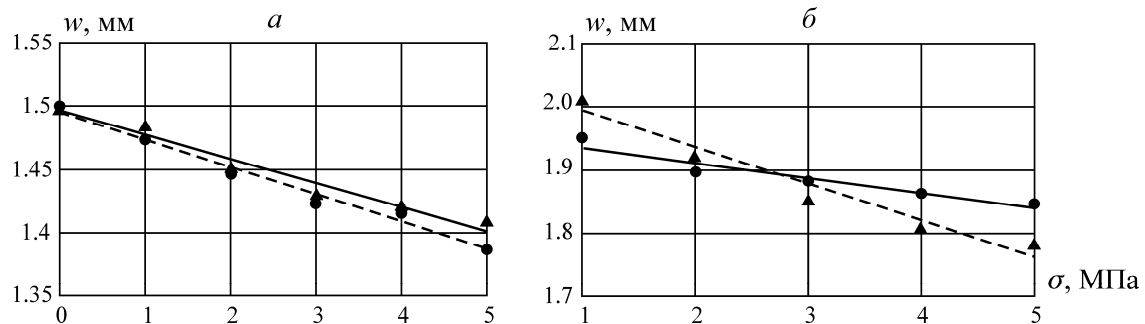


Рис. 4. Зависимость раскрытия трещин с алюмосиликатными микросферами от всестороннего сжатия образцов горной породы: *a* — без кислотной обработки трещин; *б* — с кислотной обработкой трещин смесью бифторида аммония с соляной кислотой; сплошная линия — кварцсодержащая порода; пунктирная — карбонатсодержащая

На рис. 5 графики демонстрируют зависимость проводимости трещины с проппантом и кислотной обработкой от всестороннего сжатия образца. Проводимость трещины шириной 1.5 мм с увеличением ее сжатия в диапазоне 1–5 МПа снижается в 1.8–2.4 раза, однако остается в 40–50 раз больше, чем для сомкнутого разрыва без расклинивающего материала. Поскольку раскрытие трещины уменьшается лишь на 5–11 % (рис. 4б), то основная доля падения проводимости приходится на показатель проницаемости трещины из-за уплотнения упаковки в ней проппанта.

Для создания трещин радиусом 5 м и раскрытием 1.5 мм требуется примерно 30–40 кг алюмосиликатных микросфер плотностью 320–370 кг/м³ при рыночной стоимости 20–40 руб. за 1 кг. Результаты экспериментов показали, что применение алюмосиликатных микросфер и их аналогов для локальных гидроразрывов горных пород в шахтных условиях повышает технико-экономические показатели и является перспективным направлением развития этой технологии.

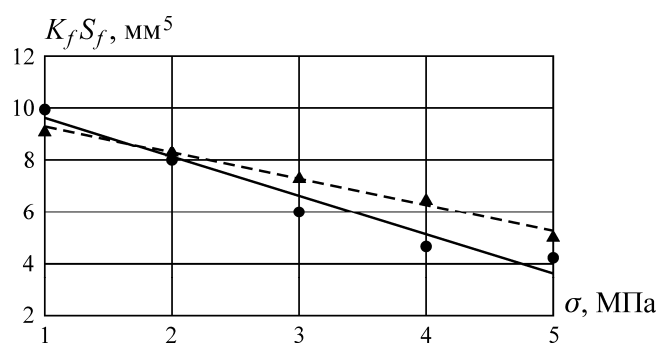


Рис. 5. Зависимость величины $K_f S_f$ трещины с проппантом из алюмосиликатных микросфер и кислотной обработкой от всестороннего сжатия образца: сплошная линия — кварцсодержащая порода; пунктирная — карбонатсодержащая

ВЫВОДЫ

1. Заполнение трещины локального гидроразрыва алюмосиликатными микросферами приводит к росту ее проводимости в 40–50 раз по сравнению с разрывом без проппанта.

2. Кислотная обработка берегов трещины двухкомпонентной рабочей жидкостью из бифторида аммония и соляной кислоты повышает раскрытие трещин на 30 %, дополнительно увеличивая их проводимость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коноплев Ю. П., Питиримов В. В., Табаков В. П., Тюнькин Б. А. Термошахтная разработка месторождений с тяжелыми нефтями и природными битумами (на примере Ярегского нефтяного месторождения) // ГИАБ. — 2005. — № 3. — С. 246–253.
2. Сердюков С. В., Курленя М. В. Применение локального гидроразрыва для интенсификации термогравитационного дренирования пласта // Интерэкспо Гео-Сибирь. XII Междунар. науч. конф. “Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология”: сб. материалов в 4 т. — Новосибирск: СГГА, 2016. — Т. 4. — С. 8–13.
3. Gandossi L. and Von Estorff U. An overview of hydraulic fracturing and other formation stimulation technologies for shale gas production. Scientific and Technical Research Reports, Publications Office of the European Union: Joint Research Centre of the European Commission, 2015, doi: 10.2790/379646.
4. Landers Jay. Microbial capacitive desalination system generates energy while treating fracking wastewater, Civil Engineering Magazine Archive, 2015, Vol. 85, Issue 4, <https://doi.org/10.1061/ciegag.0000993>.
5. Сердюков С. В., Дегтярева Н. В., Патутин А. В., Шилова Т. В. Технический комплекс для множественного локального гидроразрыва породного массива в необсаженных скважинах // ФТПРПИ. — 2016. — № 6. — С. 180–186.
6. Технические условия ТУ 5717-001-11843486-2004. Микросферы алюмосиликатные АСПМ-500 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.microspheres.ru/products.htm>.
7. Курленя М. В., Сердюков С. В., Патутин А. В., Шилова Т. В. Интенсификация подземной дегазации угольных пластов методом гидроразрыва // ФТПРПИ. — 2017. — № 6. — С. 3–9.
8. Сердюков С. В., Шилова Т. В., Дробчик А. Н. Лабораторная установка и методика определения газопроницаемости горных пород при стационарной фильтрации в пластовых условиях // ФТПРПИ. — 2017. — № 5. — С. 172–180.

Поступила в редакцию 14/X 2017