ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СУЛЬФОНИРОВАННОЙ ХЛОПКОВОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ В HPHT-УСЛОВИЯХ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЕЁ ПРИМЕНЕНИЯ

Нурмонов С.Э. [1],
Асранова У.Х. [2]
[1] Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан, nurmonov_se@mail.ru
[2] Андижанский машиностроительный институт, Андижан, Узбекистан, asranovaumida23@gmail.com

Ключевые слова: *HPHT-фильтрация, термостарение, реология, фильтрационная корка, импортозамещение, экономическая эффективность.*

Введение. Для бурения глубоких (более 4500 м) высокотемпературных скважин с температурой 150–170 °C необходимы реагенты, сохраняющие реологические и фильтрационные свойства после длительного теплового воздействия [1, 2]. Традиционные целлюлозные производные (КМЦ, ПАЦ) деструктируют при таких условиях, а импортные AMPS-сополимеры дороги и создают зависимость от поставок [3, 4]. Сульфонированная хлопковая целлюлоза (SCel) является перспективной отечественной альтернативой, однако её поведение в экстремальных термобарических условиях и экономическая эффективность требуют экспериментального подтверждения [5].

Цель работы – экспериментальная оценка стабильности реологических и фильтрационных свойств буровых растворов, модифицированных SCel, в условиях высоких температур (150–170 °C) и

давления (500 psi), а также расчёт экономической эффективности применения SCel в сравнении с импортными аналогами.

Методология. Модельные буровые растворы готовили на основе 6 % бентонита Навбахорского месторождения (ГОСТ 28177–89) с добавкой 0,8 % SCel (DS = 0,42, Mw = 135 кДа). Для сравнения использовали растворы с эквивалентными дозировками ПАЦ, КМЦ и импортного AMPS-сополимера. Горячее старение проводили в герметичных стальных кюветах под давлением 3,45 МПа (500 psi) при 150 °C и 170 °C в течение 16 ч по методике API RP 13B-1 [6]. Реологические параметры (пластическая вязкость PV, динамическое напряжение сдвига YP, статическое напряжение сдвига СНС) измеряли на ротационном вискозиметре Fann 35SA. Высокотемпературную высоконапорную фильтрацию (HTHP) проводили на фильтр-прессе при 3,45 МПа и соответствующих температурах, определяли объём фильтрата за 30 мин (VHTHP). Морфологию фильтрационных корок изучали методом сканирующей электронной микроскопии (SEM) на приборе JEOL JSM-IT500. Экономический расчёт выполнен по стандартной методике технико-экономического обоснования с учётом материального баланса производства и рыночных цен на импортные аналоги [7, 8].

Результаты. После горячего старения при 150 °C раствор с SCel сохранил 80 % исходного динамического напряжения сдвига (YP = 10,2 Па из 12,8 Па), тогда как КМЦ – только 30 % (YP = 4,2 Па из 11,5 Па), а ПАЦ – 35 % (YP = 4,9 Па из 14,0 Па). При 170 °C SCel сохранил 60 % YP (7,5 Па), тогда как ПАЦ – лишь 15 % (2,1 Па). Объём HTHP-фильтрата для раствора с SCel составил 18,5±1,0 мл при 150 °C и 25,0±1,5 мл при 170 °C. Для ПАЦ эти значения – 32,0±1,5 мл и >50 мл (неконтролируемая фильтрация), для AMPS-сополимера – 22,0±1,5 мл при 170 °C. SEM-анализ показал, что SCel формирует плотную гомогенную корку с порами

1–5 мкм, тогда как ПАЦ – рыхлую корку с порами до 20 мкм и трещинами (таблица 1).

Экономический расчёт (на 1 тонну SCel) показал, что производственная себестоимость SCel на 25–30 % ниже стоимости импортного AMPS-сополимера (таблица 2). Годовой экономический эффект от импортозамещения при объёме потребления 500 т/год составляет около 1,5–2,0 млн долл. США. Снижение затрат на буровые растворы за счёт применения SCel достигает 20–25 %.

Таблица 1. Сравнительная эффективность SCel с коммерческими реагентами в HPHT-условиях

Показатель	КМЦ (техн.)	ПАЦ	AMPS-сополимер	SCel
Сохранение YP после 150 °C, % от исходного	30	35	–	80
VHTHP при 150 °C, мл	40–45	32	–	18,5
VHTHP при 170 °C, мл	не контрол.	>50	22,0	25,0
Характер фильтрационной корки (SEM)	–	рыхлая, поры до 20 мкм	–	плотная, поры 1–5 мкм
Устойчивость к Ca^{2+} (2000 мг/л)	осаждение	снижение	высокая	стабильна

Таблица 2. Сравнительная экономическая эффективность (в условных единицах на 1 т)

Показатель	Импортный AMPS-сополимер	SCel (отечественный)
Стоимость сырья	100	40–50 (за счёт местного сырья)
Производственная себестоимость	100	70–75
Транспортные и таможенные расходы	20–25	5
Цена для потребителя	100	70–80
Экономия при применении	–	20–25 % от стоимости раствора

Заключение. Сульфонированная хлопковая целлюлоза (SCel) демонстрирует высокую термостабильность в HPHT-условиях: сохранение 80 % YP после 150 °C и контролируемую фильтрацию (VHTHP = 25 мл при 170 °C), что сопоставимо с импортными AMPS-сополимерами. SCel формирует плотную, низкопроницаемую фильтрационную корку, обеспечивая эффективную защиту пласта. Экономический анализ подтверждает, что себестоимость SCel на 25–30 % ниже стоимости импортных аналогов, а применение реагента снижает общие затраты на буровые растворы на 20–25 %. Разработанный реагент является конкурентоспособной отечественной альтернативой для импортозамещения в сегменте термостойких буровых реагентов для глубокого высокотемпературного бурения в Узбекистане.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aftab A., Ismail A.R., Ibupoto Z.H. A review of water-based drilling fluids for high-temperature, high-pressure applications // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – Vol. 156. – P. 718–734.

2. Patel A.D., Young S., Friedheim J. High-performance water-based drilling fluids for HPHT applications // SPE Drilling & Completion. – 2019. – Vol. 34, No. 2. – P. 102–115.

3. Caenn R., Darley H.C., Gray G.R. Composition and properties of drilling and completion fluids. – 7th ed. – Elsevier, 2016. – 801 p.

4. Plank J. Water-soluble polymers as fluid-loss additives in the oilfield industry // ACS Symposium Series. – 1992. – Vol. 396. – P. 433–490.

5. Zhang S., Wang L., Chen X. High-performance sulfonated starch and cellulose derivatives for HPHT filtration control // Fuel. – 2023. – Vol. 332. – Art. 126154.

6. API RP 13B-1. Standard procedures for field testing water-based drilling fluids. – Washington: American Petroleum Institute, 2019. – 132 p.

7. Montgomery D.C. Design and analysis of experiments. – 10th ed. – Hoboken: Wiley, 2019. – 688 p.

8. ГОСТ 33213–2014. Растворы буровые на водной основе. Полевые испытания. – М.: Стандартинформ, 2015. – 102 с.