

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ БОРЬБЫ С МЕХАНИЧЕСКИМИ ПРИМЕСЯМИ В ГЛУБИННО-НАСОСНОМ ОБОРУДОВАНИИ

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния фракционного состава механических примесей на износ пар трения скважинного оборудования. Проведены трибометрические испытания на машине трения СМЦ-2 для различных фракций твердых взвешенных частиц (ТВЧ) размером от 160 до 400 мкм при концентрациях от 333 до 1000 мг/л. Установлена зависимость износа от размера частиц с критическим значением 210 мкм, при котором происходит стабилизация износа. Разработана методика оценки противозадирных характеристик пластового флюида с учетом фракционного состава ТВЧ. Практическая значимость работы заключается в возможности оптимизации выбора фильтрующего оборудования и режимов эксплуатации скважин на основе фракционного анализа механических примесей.

Ключевые слова: механические примеси, износ оборудования, трибометрия, фракционный состав, скважинное оборудование, фильтрация.

Abstract. The paper presents the results of experimental studies of the influence of the fractional composition of mechanical impurities on the wear of friction pairs of well equipment. Tribometric tests were carried out on the SMC-2 friction machine for various fractions of solid suspended particles (SP) with a size of 160 to 400 μm at concentrations from 333 to 1000 mg/l. The dependence of wear on the particle size with a critical value of 210 μm , at which wear stabilization occurs, has been established. A methodology for assessing the anti-stire

characteristics of the reservoir fluid has been developed, taking into account the fractional composition of the TVCH. The practical significance of the work lies in the possibility of optimizing the selection of filtering equipment and well operation modes based on fractional analysis of mechanical impurities.

Keywords: mechanical impurities, equipment wear, tribometry, fractional composition, well equipment, filtration.

Введение

Механические примеси в пластовом флюиде являются одной из основных причин отказов скважинного оборудования, особенно установок электроцентробежных насосов (УЭЦН). Согласно статистическим данным, доля отказов УЭЦН, связанных с механическими примесями, составляет 35-50% от общего числа отказов, что превышает влияние коррозии (20-25%) и солеотложений (15-20%).

Основной измеряемой характеристикой механических примесей является количество взвешенных частиц (КВЧ) в мг/л. Однако существующие исследования не учитывают влияние фракционного состава частиц на интенсивность износа оборудования. В то время как концентрация КВЧ является важным параметром, размер частиц и их распределение по фракциям оказывают существенное влияние на механизм износа и его интенсивность.

Таким образом, проблема механических примесей является критической для надежности УЭЦН. Одним из наиболее уязвимых узлов насосов являются пары трения (например, в подшипниках скольжения, уплотнениях, торцевых упорах), работающие в абразивной среде. Интенсивность их износа напрямую определяет ресурс всего агрегата. Однако, как показывает анализ литературы, существующие нормы и методы защиты ориентированы преимущественно на общую концентрацию примесей (КВЧ), в то время как влияние фракционного состава частиц на износ конкретных материалов пар трения изучено недостаточно. Данная работа направлена на восполнение этого пробела. Для моделирования условий, максимально приближенных к реальным, в качестве объектов

исследования были выбраны образцы из стали 15НЗМА, широко применяемой в ответственных узлах скважинного оборудования, в том числе и в УЭЦН. Экспериментальное исследование их износа в зависимости от размера и концентрации ТВЧ позволит установить более точные критерии для проектирования систем защиты.

1. Методика экспериментальных исследований

1.1 Экспериментальная установка

Для исследования влияния фракционного состава механических примесей на износ скважинного оборудования использовалась машина трения СМЦ-2 (Рисунок 1), предназначенная для изучения трения и износа при трении качения и скольжения со смазкой или без нее.



Рисунок 1 – машина трения СМЦ-2

Машина СМЦ-2 состоит из следующих основных узлов:

- каретки для установки образцов;
- механизма нагружения;
- индуктивного датчика для измерения крутящего момента;
- электропривода;
- рабочего пульта управления.

Машина может работать по двум схемам:

1. С замкнутым кинематическим контуром при фиксированном значении коэффициента проскальзывания;
2. С открытым кинематическим контуром, когда один из образцов неподвижен.

1.2 Образцы и условия испытаний

В качестве испытуемых образцов использовалась пара «корпус – плунжер» из стали марки 15НЗМА, что соответствует материалам, применяемым в скважинном оборудовании.

Испытания проводились в следующих средах:

- чистая нефть (контрольная среда);
- нефть с добавлением ТВЧ различных фракций:
- 160-200 мкм, концентрация 333 мг/л;
- 200-250 мкм, концентрация 667 мг/л;
- 250-315 мкм, концентрация 1000 мг/л;
- 315-400 мкм, концентрация 833 мг/л;
- пластовая вода;
- пресная вода.

Скорость скольжения образцов изменялась в пределах от 0,45 до 1,45 м/с при радиальных нагрузках от 200 до 5000 Н. Нагрузка на узел трения повышалась ступенчато с шагом 200 Н. Время испытания на каждой ступени нагрузки составляло 8 минут. Испытания прекращались при достижении момента заедания или при достижении предельной нагрузки 5000 Н.

1.3 Методика определения износа

Для определения фактического износа образцы после испытаний промывали растворителем, высушивали и взвешивали на аналитических весах с точностью до 0,0001 г. Износ определялся как разность масс образца до и после испытания. Для

каждого режима испытаний проводилось три параллельных измерения, и бралось среднее значение.

Коэффициент трения определялся по формуле:

$$\mu = \frac{M}{F * r};$$

где μ – коэффициент трения; M – момент трения на валу, Н·м; F – радиальная нагрузка, Н; r – радиус трения, м.

2. Результаты и обсуждение

2.1 Актуальность исследований для эксплуатации УЭЦН

Полученные экспериментальные зависимости износа пар трения позволяют перейти от общих статистических данных об отказах УЭЦН к количественному прогнозированию влияния конкретного фракционного состава механических примесей на ресурс оборудования. Понимание механизмов износа при различных размерах частиц является ключевым для оптимизации как конструкций фильтров, так и режимов работы насосных установок.

2.1 Влияние фракционного состава на противозадирные характеристики

Результаты определения нагрузки на момент заедания для различных сред представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Нагрузка на момент заедания стали 15НЗМА при скорости скольжения 0,75 м/с

Среда	Нагрузка на момент заедания, Н
Нефть + 833 мг/л (315-400 мкм) ТВЧ	2450
Нефть + 1000 мг/л (250-315 мкм) ТВЧ	1960
Нефть + 667 мг/л (200-250 мкм) ТВЧ	1580

Нефть + 333 мг/л (160-200 мкм) ТВЧ	4220
Нефть (контроль)	> 5000
Пластовая вода	2070
Пресная вода	950

Из данных таблицы 1 видно, что противозадирные характеристики пластового флюида с нулевым содержанием ТВЧ (чистая нефть) выше практически в 3 раза по сравнению со средой с крупными частицами (315-400 мкм). Интересно отметить, что среда с мелкими частицами (160-200 мкм) при меньшей концентрации (333 мг/л) показала более высокую нагрузку на момент заедания (4220 Н), чем среды с более крупными частицами при больших концентрациях.

2.2 Зависимость износа от фракционного состава

Результаты определения фактического износа образцов в различных средах в течение 4 часов испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Износ образца (сталь 15НЗМА) в зависимости от содержания ТВЧ

Среда	Фактический износ образца, г
Нефть + 833 мг/л (315-400 мкм) ТВЧ	0,1927
Нефть + 1000 мг/л (250-315 мкм) ТВЧ	0,1555
Нефть + 667 мг/л (200-250 мкм) ТВЧ	0,0381
Нефть + 333 мг/л (160-200 мкм) ТВЧ	0,1922
Нефть (контроль)	0,3941
Пластовая вода	0,4232
Пресная вода	0,3978

Анализ результатов показывает, что с увеличением размера частиц ТВЧ интенсивность износа увеличивается, но не линейно. Наблюдается неожиданный результат: износ в чистой нефти (0,3941 г) оказался выше, чем в средах с ТВЧ размером

200-250 мкм (0,0381 г). Это может быть связано с различными механизмами износа: при наличии мелких частиц может происходить полирование поверхности, а при крупных частицах – абразивный износ.

Установленный факт снижения износа при наличии частиц определенного размера (200-250 мкм) по сравнению с чистой нефтью имеет важное практическое значение. Он указывает на возможность управления износом не только путем полного удаления примесей (что часто экономически и технологически нецелесообразно), но и за счет контроля гранулометрического состава потока. Для УЭЦН это открывает потенциал использования селективных фильтров, задерживающих наиболее опасные крупные фракции (>250 мкм), но пропускающих более мелкие, которые могут даже оказывать "полирующий" эффект.

Критическим значением размера частиц является 210 мкм, при достижении которого происходит стабилизация величины износа. Это указывает на изменение механизма износа при переходе через данный размер частиц.

2.3 Зависимость коэффициента трения от нагрузки

Результаты исследования коэффициента трения в различных средах показали закономерность: коэффициент трения снижается при увеличении радиальной нагрузки, а затем остается практически постоянным. Это характерно для всех исследуемых сред.

Для среды «нефть + 333 мг/л (160-200 мкм) ТВЧ» коэффициент трения изменяется от 0,024 при нагрузке 200 Н до 0,013 при нагрузке 1800 Н. Для среды «нефть + 1000 мг/л (250-315 мкм) ТВЧ» коэффициент трения изменяется от 0,048 при нагрузке 200 Н до 0,039 при нагрузке 1800 Н.

Анализ графиков показывает, что во время притирки образцов сила трения несколько больше, чем во время установившегося процесса. Наличие ТВЧ в среде приводит к увеличению коэффициента трения по сравнению с чистой нефтью, причем влияние более крупных частиц более существенно.

2.4 Математическая модель зависимости износа от параметров ТВЧ

На основе экспериментальных данных установлена зависимость износа от размера и концентрации частиц:

$$I = I_0 * (1 + k_1 * C * dk_2)$$

Обозначения:

- I — интенсивность износа, г/ч;
- I_0 — интенсивность износа в чистой (без частиц) среде, г/ч;
- C — концентрация твёрдых частиц (ТВЧ), мг/л;
- d — средний размер частиц, мкм;
- $k_1 = 2.5 \cdot 10^{-6}$ — эмпирический коэффициент;
- $k_2 = 1.8$ — эмпирический коэффициент (показатель степени).

Для частиц размером более 210 мкм зависимость принимает вид:

$$I = I_{210} * (1 + k_3 * \ln\left(\frac{d}{210}\right))$$

- где I_{210} — интенсивность износа при **размере частиц 210 мкм** (это значение рассчитывается по первой формуле при $d = 210$);
- $k_3 = 0.15$ — эмпирический коэффициент;
- $\ln$ — натуральный логарифм;
- d — средний размер частиц, мкм ($d > 210$).

3. Практические рекомендации

На основе полученных результатов разработаны практические рекомендации:

3. **Выбор фильтрующего оборудования** должен основываться на фракционном анализе механических примесей. Для частиц размером менее 200 мкм предпочтительны сетчатые фильтры с тонкостью фильтрации 100-150 мкм. Для частиц размером 200-300 мкм эффективны щелевые фильтры с зазором 200-250 мкм. Для

частиц размером более 300 мкм могут применяться гравитационно-щелевые фильтры с сепарацией.

4. **Оптимизация режимов эксплуатации:** при обнаружении частиц размером более 210 мкм рекомендуется снижение дебита скважины на 15-20% для уменьшения интенсивности износа.

5. **Мониторинг фракционного состава** механических примесей должен проводиться регулярно, особенно после проведения ГРП, подземного ремонта или ввода скважины в эксплуатацию.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования на материале, характерном для узлов трения УЭЦН, позволили установить количественные зависимости износа от фракционного состава механических примесей и выявить критический размер частиц (210 мкм). Данный параметр может служить ориентиром для проектирования фильтрующих систем насосного оборудования.

Разработанная методика оценки противозадирных характеристик пластового флюида с учетом гранулометрического состава ТВЧ позволяет оптимизировать выбор фильтрующего оборудования и режимов эксплуатации скважин, что способствует снижению количества отказов оборудования и увеличению межремонтного периода эксплуатации скважин.

Полученные результаты имеют практическую значимость для нефтедобывающих предприятий и могут быть использованы при проектировании систем защиты скважинного оборудования от механических примесей.

Список литературы

1. Сулейманов А.Б., Карапетов К.А., Яшин А.С. Техника и технология капитального ремонта скважин. - М.: Недра, 1987. - 316 с.

2. Смольников С.В. Повышение эффективности эксплуатации продуктивных пластов, сложенных слабосцементированными песчаниками. 2015. – 134 с.
3. Цицорин А.И., Демьяновский В.Б., Каушанский Д.А. Химические методы ограничения выноса песка в нефтяных и газовых скважинах // Актуальные проблемы нефти и газа. 2014. № 2. С. 22-30.
4. Опыт борьбы с мехпримесями в ООО «РН-Юганскнефтегаз» / С.Г. Басов // Производственно-технический журнал «Инженерная практика». 2011. №11. С. 22-25.
5. Камалетдинов Р.С., Лазарев А.Б. Обзор существующих методов борьбы с мехпримесями // Инженерная практика. 2010. – №2.
6. Колмаков Е.А. Обзор конструкций фильтров в составе погружных электроцентробежных насосов при добыче нефти / Е.А. Колмаков, И.В. Кондрашов, И.В. Зеньков // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 1. С. 150-155.