

УДК 681.2.084: 621.891

Г. Б. Бурдо, Ю. А. Стрельников, С. А. Чаплыгин  
ООО "Нефтегазгеофизика"  
В. В. Измайлов  
Тверской ГТУ

## ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКОЛЬЗЯЩЕГО КОНТАКТА ДАТЧИКА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПРИБОРА 4СКП

Приведены результаты исследований триботехнических и электрических характеристик резистивного датчика перемещения скважинного каверномера-профилемера 4СКП в различных средах. Выявлены флуктуации силы трения, возникающей при работе исследуемого датчика, которые влияют на стабильность контактного сопротивления и, как следствие, на точность показаний прибора в целом.

*Ключевые слова:* скважина, резистивный датчик перемещения, каверномер-профилемер, сила трения, контактное сопротивление.

### Введение

Резистивный датчик перемещения, исследованный в данной работе, используется в геофизическом приборе "каверномер-профилемер скважинный 4СКП", который выпускается ООО "Нефтегазгеофизика". Прибор работает в условиях повышенного внешнего гидростатического давления (до 140 МПа) и повышенной температуры (до 175 °C). Внутренний объем прибора заполнен маслом, на которое через компенсаторы передается внешнее избыточное давление. Таким образом, исследуемый датчик перемещения испытывает повышенные гидростатическое давление и температуру.

Прибор 4СКП предназначен для исследования геометрии ствола скважины по результатам измерения четырех независимых радиусов в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. С его помощью решаются следующие задачи:

- вычисление диаметра скважины;
- поиск желобов;
- подсчет объема затрубного пространства скважины;
- контроль технического состояния скважины и др.

Схема датчика перемещения, входящего в состав прибора 4СКП, приведена на рис. 1.

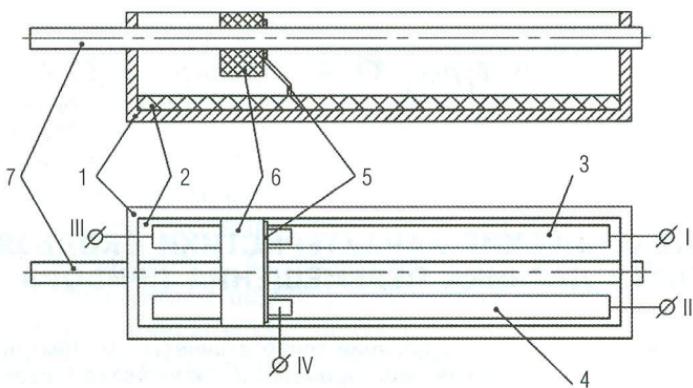


Рис. 1. Схема резистивного датчика перемещения

Датчик состоит из корпуса 1, резистивного элемента 2, на котором расположены высокоомная дорожка 3 и токосъемная дорожка с низким сопротивлением 4. Щетка 5, состоящая из 8 упругих элементов (по 4 на каждой ее стороне), соприкасающихся с дорожками 3 и 4, закреплена на корпусе 6, который в свою очередь зафиксирован на оси 7. На выводы I и III дорожки 3 подается напряжение постоянного тока, а к выводам I и II подключен вольтметр. Когда ось с закрепленной на ней щеткой перемещается вдоль дорожек резистивного элемента, сопротивление между выводами I и II меняется, что и фиксируется вольтметром. Полученные данные пересчитываются электроникой прибора в величину линейного перемещения.

Таким образом, скользящий контакт, образованный резистивными дорожками и щеткой (рис. 1), является токопроводящим узлом трения, от постоянства контактного сопротивления которого зависит точность показаний прибора в целом. Поэтому целью работы явилось изучение контактного сопротивления и влияния на него триботехнических характеристик.

### Экспериментальная установка и методика проведения исследования

В экспериментальной установке (рис. 2), с помощью которой определялись характеристики исследуемого скользящего контакта, частично использованы элементы реального датчика перемещения.

Установка состоит из каретки 1 с закрепленным на ней резистивным элементом 2, контактирующим со щеткой 3, зафиксированной на корпусе 5, который в свою очередь закреплен на оси 4. Ось соединяется с тензобалкой 6, на которой наклеены тензодатчики, с помощью приспособления 7 с установочными винтами 8. Детали 2–5 являются элементами исследуемого датчика перемещения прибора 4СКП.

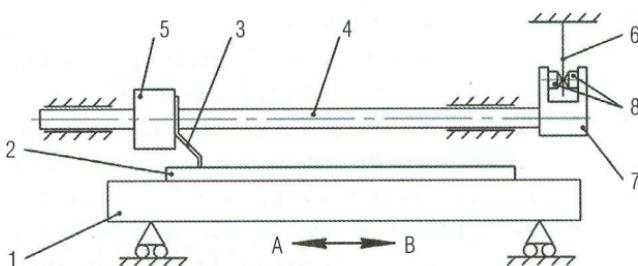


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

При проведении эксперимента каретка совершает циклические возвратно-поступательные движения относительно неподвижной оси, при этом щетка скользит по резистивному элементу. Длина хода каретки близка к величине рабочего хода скользящего контакта исследуемого датчика перемещения. Измерение сопротивления контакта резистивного элемента и щетки (рис. 2) производится по классической четырехпроводной схеме (рис. 3), позволяющей исключить посторонние сопротивления и измерять практически только сопротивление контакта. К выводам I и II подводится напряжение постоянного тока, а к выводу III и дополнительному выводу IV (в реальном устройстве он отсутствует) подключается вольтметр.

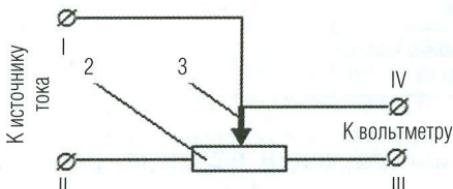


Рис. 3. Четырехпроводная схема измерения контактного сопротивления. Обозначения деталей те же, что на рис. 2

Параллельно в экспериментах с помощью самописца фиксируется сила трения, возникающая при скольжении щетки по резистивному элементу (рис. 2). Сигнал на самописец поступает от тензоусилителя, соединенного с тензодатчиками тензобалки. Сила трения, возникающая в опорах оси, измеряется отдельно и учитывается при обработке результатов.

Измерения проводились как в отсутствии смазочного материала между резистивным элементом и контактом, так и в среде лубриканта. В этом качестве использовалась кремнийорганическая жидкость 161-235 и масло ИПМ-10. Данные диэлектрические жидкости используются ООО “Нефтегазгеофизика” для наполнения внутреннего объема приборов для компенсации высоких внешних гидростатических давлений, в условиях которых работает геофизическая аппаратура. Для заполнения внутреннего объема прибора 4СКП, и в частности узла, в котором находится исследуемый датчик перемещения, применяется масло ИПМ-10.

## Результаты экспериментов и их обсуждение

Фрикционные характеристики исследованного контакта приведены в табл. 1.

Таблица 1

Фрикционные характеристики скользящего контакта  
датчика перемещения

Характеристика	Без смазочного материала	Со смазочным материалом	
		Масло ИПМ-10	Кремнийорганическая жидкость 161-235
Коэффициент трения	0,60–0,62	0,30–0,55	0,35–0,65
Относительная нестабильность коэффициента трения	0,41	0,5–0,8	0,8–1,1

Сила трения при движении щетки по резистивному элементу (рис. 2) испытывает заметные флуктуации. В качестве примера на рис. 4 приведен фрагмент записи сигнала с тензоусилителя, который пропорционален величине силы трения.

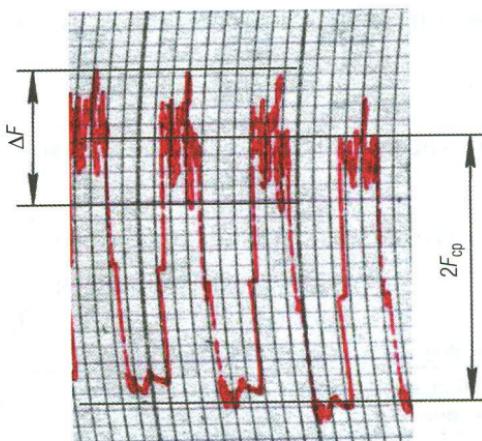


Рис. 4. Флуктуации силы трения при движении щетки по резистивному элементу:  $2F_{\text{ср}}$  – удвоенное среднее значение силы трения;  $\Delta F$  – размах флуктуаций силы трения при движении каретки в направлении А на рис. 2

На рис. 4 хорошо видны флуктуации силы трения, причем размах флуктуаций различен при различных направлениях движения каретки (рис. 2). Этот факт можно объяснить особенностями конструкции устройства. При движении каретки в направлении А сила трения, возникающая при скольжении щетки по резистивному элементу, дополнительно прижимает ее упругие элементы к дорожке трения, а при движении в противоположном направлении (рис. 2, направление В), наоборот, сила трения уменьшает прижатие щетки к дорожке трения.

Коэффициент трения рассчитывался как отношение среднего значения силы трения  $F_{\text{ср}}$  (рис. 4) к нормальной силе  $N$ , прижимающей щетку к резистивному элементу (рис. 2). Нормальная сила  $N$  была определена экспериментально.

Относительная нестабильность коэффициента трения (табл. 1) представляет собой отношение размаха флуктуаций коэффициента трения в момент его очередного измерения к его среднему значению в данный момент  $\Delta f/f_{\text{ср}} = \Delta F/F_{\text{ср}}$  (рис. 4). По сути это то, что в математической статистике называется коэффициентом осцилляции.

Значения коэффициента трения со смазочным материалом типичны для трения при граничной смазке. Как и следовало ожидать, смазочный материал снижает величину коэффициента трения по сравнению с трением без смазочного материала, хотя и не очень значительно.

Электрические характеристики исследованного контакта приведены в табл. 2.

Таблица 2

Электрические характеристики скользящего контакта датчика перемещения

Характеристика	Наименование смазочного материала	
	Масло ИПМ-10	Кремнийорганическая жидкость 161-235
Контактное сопротивление, Ом	12,2–13,3	9,2–11,4
Относительная нестабильность контактного сопротивления	0,25–0,55	0,31–0,66

Контактное сопротивление определялось как частное от деления напряжения на контакте на силу тока через контакт, относительная нестабильность контактного сопротивления – как частное от деления размаха флюктуаций контактного сопротивления на его среднее значение в данный момент времени.

С ростом наработки среднее значение коэффициента трения остается практически постоянным, его величина в начале и в конце пути трения 250 м отличаются не более чем на 10%, причем наблюдаются изменения как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Относительная нестабильность коэффициента трения увеличивается в конце пути трения, равном 250 м. При трении в среде масла ИПМ-10 она увеличилась примерно на 40% по сравнению с начальным значением, в среде кремнийорганической жидкости 161-235 – примерно на 20%. Сопротивление контакта и его нестабильность также увеличиваются с ростом наработки. На том же пути трения контактное сопротивление увеличилось примерно на 20%, а его нестабильность – примерно на 60% (трение в среде кремнийорганической жидкости).

Для оценки проводящей способности скользящего контакта целесообразно сравнить экспериментальные значения сопротивления из табл. 2 с теоретическим значением. Сопротивление дискретного контакта шероховатых поверхностей можно рассчитать по формуле Р. Хольма [1]:

$$R = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4na}, \quad (1)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – удельные сопротивления материалов дорожки 3 и щетки 5 (рис. 1);  $n$  – число микроконтактов (число контактирующих выступов шероховатости);  $a$  – средний радиус единичной площадки контакта шероховатых поверхностей. Так как в данном случае  $\rho_1 \gg \rho_2$ , формулу (1) можно записать в виде

$$R = \frac{\rho_1}{4na}. \quad (2)$$

По геометрическим размерам дорожки 3 (рис. 1) и ее общему сопротивлению рассчитанное значение  $\rho_1 \approx (1,14-1,62) \cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

Произведение  $na$  в формуле (2) можно оценить по величине фактической площади контакта  $A_r$ :

$$A_r = n\pi a^2, \quad (3)$$

а величину  $A_r$ , в свою очередь, можно приблизительно рассчитать по известной формуле [1]

$$A_r = N/H, \quad (4)$$

где  $N$  – нормальная нагрузка на контакт;  $H$  – твердость материала дорожки 3 (рис. 1). Так как толщина щетки 5 составляет 0,12 мм, что может быть соизмеримо с расстоянием между микронеровностями поверхности резистивной дорожки 3, предположим на каждом его упругом элементе одну площадку контакта (на каждой стороне щетки 5 по 4 упругих элемента). Тогда после несложных преобразований получаем

$$R = \frac{\rho}{4} \cdot \sqrt{\frac{\pi H}{nN}}. \quad (5)$$

Измеренное значение твердости  $H \approx 250 \text{ МПа}$ , откуда по формуле (5) получаем при  $N = 0,7 H$  (70 гс)  $R \approx 5-7 \text{ Ом}$ , что разумно совпадает с экспериментальными значениями с учетом их флуктуаций (табл. 2) и присутствия граничных слоев смазочного материала на поверхности контакта, которое не учитывается формулами (2) – (5).

### Выводы по результатом исследований

1. В целом, датчик сопротивления выполняет свою функцию, нестабильность контактного сопротивления приводит к весьма малой

- нестабильности общего сопротивления измерительной цепи прибора.
2. В условиях работы датчика сопротивления прибора нестабильность фрикционных и электрических параметров контакта определяется, в основном, шероховатостью щетки 5 и резистивных дорожек 3 и 4 (рис. 1) и применяемым материалом, играющим роль смазки.
  3. Имеются возможности уменьшения нестабильности контактного сопротивления путем оптимизации триботехнических и конструктивных характеристик скользящего контакта (коэффициента трения, шероховатости контактирующих деталей в контакте, формы скользящей поверхности контакта 5 (рис. 1).

Практические результаты работы планируется апробировать на реальных приборах в ООО “Нефтегазгеофизика”.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. 464 с.

*Рецензент доктор хим. наук, проф. М. Г. Сульман*