

С. А. Долгих, Б. Л. Журавлев, Р. А. Кайдриков  
В. Э. Ткачева

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА ЗАЩИТЫ И РАСЧЕТ СМЕЩЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА НА ЗАБОЕ ОБСАДНОЙ КОЛОННЫ НЕФТЯНОЙ СКВАЖИНЫ

*Ключевые слова:* обсадная колонна, ток защиты, смещение потенциала.

*Рассмотрены стандартизованные европейские методики определения тока защиты и смещения потенциала на забое обсадной колонны нефтяной скважины. На основании экспериментально полученных данных для одной из обсадных колонн ОАО «Татнефть» проведены расчеты и получены числовые значения искомых параметров.*

*Keywords:* casing, protection current, potential displacement.

*European standardized methodology for determining the protection current and displacement potential at the bottom of an oil casing are considered. Based on the experimental evidence for one of the JSC "Tatneft" casings values of the unknown parameters are calculated and obtained.*

### Введение

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что эксплуатационные колонны подвержены как внутренней, так и грунтовой коррозии [1, 2]. Наибольшую опасность представляет грунтовая коррозия внешней поверхности эксплуатационной колонны (рис. 1). Основными косвенными признаками отказов обсадных колонн, обусловленных наружной коррозией, в отличие от отказов, вызываемых другими причинами (прожоги, чисто механические разрушения, случайные прострелы, абразивный износ, негерметичность резьбовых соединений), являются статистическая приуроченность отказов к водоносным горизонтам, содержащим агрессивные компоненты (сероводород, уголекислота, кислород), и рост количества ежегодных отказов во времени для достаточно большого количества скважин однотипной конструкции [3].



**Рис. 1 – Сквозная наружная коррозия эксплуатационной колонны**

Ресурс обсадных колонн повышают, осуществляя ряд комплексных мероприятий, включающих использование катодной защиты.

Основным параметром катодной защиты является величина защитного тока. Для обсадных конструкций защитный ток считается достаточным в том случае, если результаты измерений показывают, что электрический ток, направленный на обсадную колонну, устранил все анодные участки [4]. Существует ряд методов, позволяющих определить величину требуемого тока катодной защиты [4, 5]:

- метод поляризационных кривых (электрического каротажа);
- метод определения профиля падения напряжения на эксплуатационной колонне;
- метод расчета сдвига потенциала в стволе скважины и величины сопротивления в системе скважина/грунт;
- метод моделирования катодной защиты скважины.

### Метод поляризационных кривых

Метод электрического каротажа прост в исполнении, его достоверность подтверждается лабораторными исследованиями. Метод основан на том, что при подаче тока через землю на металлическую скважинную обсадную конструкцию происходит изменение разности потенциалов между обсадной конструкцией и электродом сравнения. Сдвиг потенциала для данной силы тока зависит от продолжительности поляризации и плотности тока. По мере увеличения силы тока происходит усиление поляризации поверхности обсадной колонны. Минимальную необходимую величину защитного тока определяют, используя зависимость  $E - \log I$ .

Метод электрического каротажа реализуется следующим образом. Необходимое оборудование для выполнения исследования комплектуют согласно рис. 2.

После подготовки необходимого оборудования измеряют и записывают потенциал «естественного состояния». Затем через анодный заземлитель на обсадную колонну подают ток (обычно 0,1 А) в течение определенного времени (2-3 минуты), по истечении которого ток прерывают и измеряют потенциал. В течение доли секунды потенциал резко падает, а затем плавно снижается. Представляет интерес значение, которое достигается после резкого падения (до начала постепенного снижения). Это значение называют «потенциал при мгновенном отключении тока». Прерывание тока длится не более 2 секунд. Затем на обсадную колонну подается ток большей величины (приращения составляют 0,1-2,0 А).

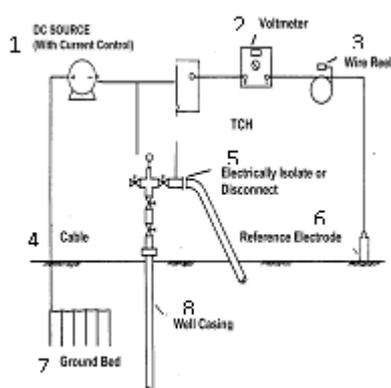


Рис. 2 – Схема испытания методом электрического каротажа: 1 – источник постоянного тока; 2 – вольтметр; 3 – барабан для провода; 4 – кабель; 5 – электроизолирующее соединение; 6 – электрод сравнения; 7 – анодный заземлитель; 8 – обсадная колонна

На рис. 3 представлены результаты определения тока катодной защиты (для одной из обсадных колонн ОАО «Татнефть») методом электрического каротажа. Кривая имеет два отчетливых линейных участка 1 и 2, экстраполяция которых до точки пересечения позволяет определить минимальную величину защитного тока, обеспечивающую удовлетворительную катодную защиту от коррозии. В данном случае эта величина составила 4,8 А.

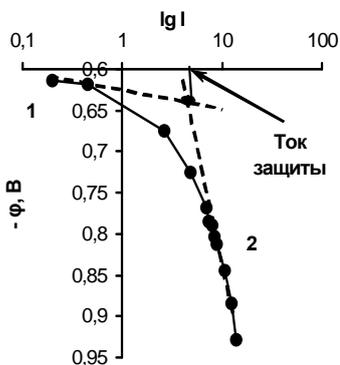


Рис. 3 – Поляризационная кривая обсадной колонны скважины № 22505 НГДУ «Бавлынефть»

### Метод расчета сдвига потенциала в стволе скважины и сопротивления в системе скважина/грунт

Зная величину защитного тока и смещение потенциала на устье скважины, используя метод расчета сдвига потенциала в стволе скважины и сопротивления в системе скважина/грунт, можно рассчитать сдвиг потенциала на забое скважины [5]. Ниже приведен пример расчета для обсадной колонны скважины № 22505 НГДУ «Бавлынефть», состоящей из трех участков: направление, кондуктор, эксплуатационная колонна [2]. Расчеты проводятся для каждого участка обсадной колонны от забоя до устья.

Первый этап расчета включает определение геометрических и электрических параметров конструкции в соответствии с типом и

характеристиками скважины. Для рассматриваемого случая поперечное сечение металлической конструкции определяется согласно схеме [5], представленной на рис. 4.

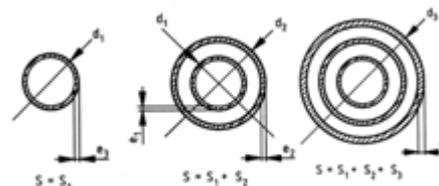


Рис. 4 – Схема определения поперечного сечения обсадной колонны, состоящей из трех участков (слева направо): эксплуатационной колонны; эксплуатационной колонны и кондуктора; эксплуатационной колонны, кондуктора и направления

Формула определения общей площади поперечного сечения участков имеет вид:

$$S_k = \sum \pi \cdot d \cdot e, \text{ м}^2$$

где  $d$  – наружный диаметр трубы;  $e$  – толщина стенки трубы.

Для первого участка (эксплуатационная колонна) площадь поперечного сечения равна:  $S_1 = \pi \cdot d_1 \cdot e_1 = 35,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ; для второго участка (кондуктор):  $S_2 = \pi \cdot (d_1 \cdot e_1 + d_2 \cdot e_2) = 103,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ; для третьего участка (направление):  $S_3 = \pi \cdot (d_1 \cdot e_1 + d_2 \cdot e_2 + d_3 \cdot e_3) = 200,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  [2].

Продольное омическое сопротивление определяется по формуле:

$$r_k = \frac{\rho \cdot l}{S_k}, \text{ Ом} \cdot \text{ м}^{-1}$$

где  $\rho = 18 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{ м}$  – сопротивление стали;  $l$  (единица) – длина участка. Для трех рассматриваемых участков они составили:  $r_1 = 51 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{ м}^{-1}$ ;  $r_2 = 7,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{ м}^{-1}$ ;  $r_3 = 9 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{ м}^{-1}$  соответственно.

В систему электрических параметров при расчетах входят коэффициент затухания  $\alpha_k$  и характеристическое сопротивление  $\gamma_k$ , определяемые по соответствующим формулам:

$$\alpha_k = \sqrt{\frac{r_k}{r_{co}}} = \sqrt{r_k \cdot \frac{\pi \cdot d_k}{r_{co}}}, [ \text{ м}^{-1} ]$$

$$\gamma_k = \sqrt{\frac{r_{co}}{\pi \cdot d_k}} \cdot r_k, \text{ Ом}$$

где  $r_k$  – продольное омическое сопротивление;  $r_{co}$  – удельное сопротивление покрытия;  $d_k$  – наружный диаметр участка обсадной колонны.

На первом этапе расчетов параметры  $\alpha_k$  и  $\gamma_k$  неизвестны, т.к. они зависят от величины  $r_{co}$ .

На втором этапе проводятся испытания с подачей тока, при которых измеряют силу тока ( $I_n$ ) и сдвиг потенциала на устье скважины ( $U_n$ ) и рассчитывают соотношение  $U_n/I_n$ .

В рассматриваемом случае потенциал на устье скважины до подачи тока составлял 0,650 В (МСЭ), а после отключения тока (3 А) – 0,760 В (МСЭ), что соответствует сдвигу потенциала 0,110 В. Рассчитанное соотношение составило:

$$\frac{U_n}{I_n} = \frac{0,110}{3} = 0,037 \text{ В/А}$$

На третьем этапе методом последовательного приближения определяют величину  $r_{co}$ . Расчеты проводят, начиная с нижнего участка, принимая произвольное смещение потенциала на забое  $U_0$  (например,  $U_0 = 1$ ).

Для рассматриваемой колонны, состоящей из трех участков, используют три системы уравнений. Для первого участка (забой):

$$A \begin{cases} U_1 = U_0 \cdot \cosh(b_1) \\ I_1 = \frac{U_0}{\gamma_1} \cdot \sinh(b_1) \end{cases}$$

Для второго участка:

$$B \begin{cases} U_2 = U_1 \cdot \cosh(b_2) + \gamma_2 \cdot I_1 \cdot \sinh(b_2) \\ I_2 = \frac{U_1}{\gamma_2} \cdot \sinh(b_2) + I_1 \cdot \cosh(b_2) \end{cases}$$

Для третьего участка:

$$C \begin{cases} U_3 = U_2 \cdot \cosh(b_3) + \gamma_3 \cdot I_2 \cdot \sinh(b_3) \\ I_3 = \frac{U_2}{\gamma_3} \cdot \sinh(b_3) + I_2 \cdot \cosh(b_3) \end{cases}$$

В этих уравнениях

$$b_k = \alpha_k \cdot L_k$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент затухания;  $L_k$  – длина участка.

В данной методике предполагается, что величина  $r_{co}$ , выражающая удельное сопротивление покрытия, неизменна по всей поверхности скважины для всех участков.

Для решения системы уравнений выражения для  $U_1$  и  $I_1$  системы А подставляют в систему В и соответственно выражения  $U_2$  и  $I_2$ , полученные в системе В подставляют в систему С. В результате подстановок получаем систему  $C'$ :

$$U_3 = U_0 \cdot \left[ \begin{aligned} & \cosh(b_1) \cdot \cosh(b_2) \cdot \cosh(b_3) + \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \cdot \sinh(b_1) \cdot \sinh(b_2) \times \\ & \times \cosh(b_3) + \frac{\gamma_3}{\gamma_2} \cdot \cosh(b_1) \cdot \sinh(b_2) \cdot \sinh(b_3) + \\ & + \frac{\gamma_3}{\gamma_1} \cdot \sinh(b_1) \cdot \cosh(b_2) \cdot \sinh(b_3) \end{aligned} \right]$$

$$I_3 = U_0 \cdot \left[ \begin{aligned} & \frac{1}{\gamma_3} \cosh(b_1) \cdot \cosh(b_2) \cdot \sinh(b_3) + \frac{\gamma_2}{\gamma_1 \gamma_3} \cdot \sinh(b_1) \cdot \sinh(b_2) \times \\ & \times \sinh(b_3) + \frac{1}{\gamma_2} \cosh(b_1) \cdot \sinh(b_2) \cdot \cosh(b_3) + \frac{1}{\gamma_1} \sinh(b_1) \times \\ & \times \cosh(b_2) \cdot \cosh(b_3) \end{aligned} \right]$$

Значение соотношения ( $U_3/I_3$ ) не зависит от величины  $U_0$ , а зависит только от значений параметров  $b_1, b_2, b_3, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ , которые являются функциями  $r_{co}$ . Подставляя параметр  $r_{co}$  в выражение для  $U_3$  и  $I_3$  и приравняв соотношение  $U_3/I_3$  к полученному экспериментально значению этого соотношения, равному 0,037 В/А, методом последовательных приближений рассчитываем значение  $r_{co}$ .

В рассматриваемом случае расчеты проводились при следующих значениях  $r_{co}$  (Ом · м<sup>2</sup>):

100, 50, 25, 20. Значение  $r_{co}$  для рассматриваемого случая оказалось в интервале 25-20 и принято равным 23 Ом·м<sup>2</sup>.

На последнем этапе подставляем значение « $r_{co}$ » во все выражения для  $b_1, b_2, b_3, \gamma_1, \gamma_2$  и  $\gamma_3$ . В результате систему  $C'$  представляем в виде:

$$C' \begin{cases} U_3 = U_0 \cdot 3,26 \\ I_3 = U_0 \cdot 79,78 \end{cases}$$

Таким образом, получены уравнения, связывающие значения смещения потенциала на устье скважины ( $U_3$ ) со смещением потенциала на забое ( $U_0$ ), и величину смещения потенциала на забое ( $U_0$ ) с величиной тока защиты ( $I_3$ ).

Используя систему уравнений  $C'$ , можно рассчитать смещение потенциала на устье и забое скважины при любой заданной силе тока. В частности, подставляя результаты определения тока защиты методом электрического каротажа (4,8 А) в систему уравнений  $C'$ , получим, что значение смещения потенциала на забое составит:

$$I_3 = U_0 \cdot 79,78 \text{ (А)} \rightarrow U_0 = 0,060 \text{ В}$$

При этом расчетное значение смещения потенциала на устье скважины будет равно:

$$U_3 = U_0 \cdot 3,26 \text{ (В)} \rightarrow U_3 = 0,196 \text{ В}$$

## Выводы

1. Рассмотрены стандартизованные европейские методики определения тока защиты и смещения потенциала на забое обсадной колонны нефтяной скважины;
2. Получены уравнения, связывающие значения смещения потенциала на устье скважины со смещением потенциала на забое; величину смещения потенциала на забое с величиной тока защиты для одной из обсадных колонн нефтяной скважины ОАО «Татнефть».

## Литература

1. Долгих, С.А. Диагностика обсадных колонн с использованием технологии магнитной интроскопии / С.А. Долгих, А.А. Абакумов, Р.А. Кайдриков, В.В. Баженов // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2011. - № 9. – С. 241-244.
2. Долгих, С.А. Расчет распределения плотности тока защиты по глубине обсадной колонны нефтяной скважины / С.А. Долгих, Р.А. Кайдриков, Б.Л. Журавлев, В.Э. Ткачева // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2012. - № 20. – С. 191-193.
3. Инструкция по катодной защите обсадных колонн скважин и выкидных линий (разводящих водоводов) от наружной коррозии: РД 153-39.0-531-07: утв. ОАО «Татнефть» 19.09.07: введ. в действие с 20.09.07, 83 с.
4. EN 12954, Cathodic protection of buried or immersed metallic structures. General principles and application for pipelines, 2001.
5. EN 15112, Äußerer kathodischer Korrosionsschutz von Bohrlochverrohrungen; Deutsche Fassung EN 15112:2006

© С. А. Долгих – асп. каф. технологии электрохимических производств КНИТУ, dolg@tatnipi.ru; Б. Л. Журавлев – д-р хим. наук, проф. каф. технологии электрохимических производств КНИТУ, bgyr@kstu.ru; Р. А. Кайдриков – д-р техн. наук, зав. каф. технологии электрохимических производств КНИТУ, krust@kstu.ru; В. Э. Ткачева – канд. техн. наук, доц. той же кафедры.