

С. А. Долгих, Ф. Ш. Шакиров, С. С. Виноградова,
Б. Л. Журавлев, И. Н. Галиев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ОБСАДНЫХ КОЛОНН ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРОМЫСЛОВЫХ УСЛОВИЯХ

Ключевые слова: обсадная колонна, катодная защита, ток защиты, смещение потенциала.

Рассмотрена стандартизованная методика определения параметров катодной защиты обсадных колонн. Разработано программное обеспечение для реализации методики. Проведены расчеты параметров катодной защиты для двух обсадных колонн скважин НГДУ «Бавлынефть». Показана связь срока эксплуатации скважины с параметрами катодной защиты.

Keywords: well casing, cathodic protection, protection current, potential displacement.

Standardized method of determining the parameters of cathodic protection of an oil casing are consider. Software has been developed to implement the methodology. The calculations of the parameters of cathodic protection for two of the well casing NGDU "Bavlyneft" were made. Displayed communication parameters of cathodic protection on the life of the well.

Ресурс обсадных колонн повышают, осуществляя ряд комплексных мероприятий, включающих использование катодной защиты [1,2].

Основным параметром катодной защиты является величина защитного тока. Существует ряд методов, позволяющих определить величину требуемого тока катодной защиты [3,4]: 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.

В данной работе рассматривается метод расчета сдвига потенциала в стволе скважины и сопротивления в системе скважина/грунт

Цель работы заключалась в разработке программного обеспечения для расчетно-экспериментальной методики определения параметров катодной защиты обсадных колонн с учетом конструкции скважин; проведении расчетов параметров модели и сопоставлении результатов расчетов и результатов экспериментальных исследований в промышленных условиях.

Метод расчета сдвига потенциала в стволе скважины и сопротивления в системе скважина/грунт, позволяет, зная величину защитного тока и смещение потенциала на устье скважины, рассчитать сдвиг потенциала на забое скважины [4] или, зная требуемую величину сдвига потенциала на забое скважины, рассчитать ток защиты. В соответствии с этим методом алгоритм расчета параметров катодной защиты состоит из четырех этапов.

Первый этап расчета включает определение геометрических и электрических параметров конструкции в соответствии с типом и характеристиками скважины. Для обсадной колонны, состоящей из трех участков, поперечное сечение металлической конструкции на разных уровнях определяется согласно схеме, представленной на рис. 1 [4].

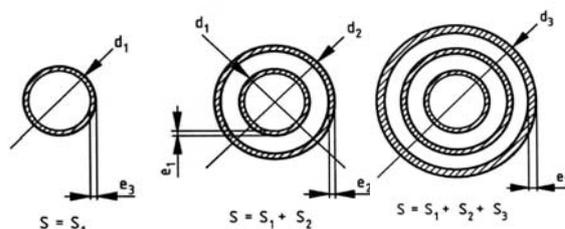


Рис. 1 - Схема определения поперечного сечения обсадной колонны, состоящей из трех участков (слева направо): эксплуатационной колонны; эксплуатационной колонны и кондуктора; эксплуатационной колонны, кондуктора и направления

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.

Продольное омическое сопротивление обсадной колонны определяется по формуле:

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

(единица) – длина участка.

В систему электрических параметров при расчетах входят коэффициент затухания α_k и характеристическое сопротивление γ_k , определяемые по соответствующим формулам:

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

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

Второй этап включает в себя испытания с подачей поляризующего тока (I_n), при котором измеряют сдвиг потенциала на устье скважины (U_n) и рассчитывают соотношение U_n/I_n .

Третий этап методики предусматривает определение методом последовательных

приближений величины удельного сопротивления покрытия ($\gamma_{\text{со}}$).

Расчеты проводят, начиная с нижнего участка, принимая произвольное смещение потенциала на забое U_0 (например, $U_0 = 1$).

Для колонны, состоящей из трех участков, используют три системы уравнений [4]. 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 α_k – коэффициент затухания; L_k – длина участка.

В данной методике предполагается, что величина $\gamma_{\text{со}}$, 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 для U_2 и I_2 , полученные в системе В, подставляют в систему С. В результате подстановок получают систему С':

$$C' \begin{cases} U_3 = U_0 \cdot \left[\frac{\cosh(b_1) \cdot \cosh(b_2) \cdot \cosh(b_3) + \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \sinh(b_1) \cdot \sinh(b_2) \times}{\gamma_3} \times \cosh(b_3) + \frac{\gamma_3}{\gamma_2} \cosh(b_1) \cdot \sinh(b_2) \cdot \sinh(b_3) + \frac{\gamma_3}{\gamma_1} \sinh(b_1) \cdot \cosh(b_2) \cdot \sinh(b_3) \right] \\ I_3 = U_0 \cdot \left[\frac{1}{\gamma_3} \cosh(b_1) \cdot \cosh(b_2) \cdot \sinh(b_3) + \frac{\gamma_2}{\gamma_1 \gamma_3} \sinh(b_1) \cdot \sinh(b_2) \times \right. \\ \left. \times \sinh(b_3) + \frac{1}{\gamma_2} \cosh(b_1) \cdot \sinh(b_2) \cdot \cosh(b_3) + \frac{1}{\gamma_1} \sinh(b_1) \times \right. \\ \left. \times \cosh(b_2) \cdot \cosh(b_3) \right] \end{cases}$$

В рассматриваемой модели принято, что значение соотношения U_3/I_3 – отношение сдвига потенциала на устье скважины к току защиты) 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 $\gamma_{\text{со}}$. Подставляя параметр $\gamma_{\text{со}}$ в выражение для U_3 и I_3 и приравнявая соотношение U_3/I_3 к полученному экспериментально значению этого соотношения, методом последовательных приближений рассчитывают значение $\gamma_{\text{со}}$.

Четвертый этап методики включает подстановку значения « $\gamma_{\text{со}}$ » во все выражения для $b_1, b_2, b_3, \gamma_1, \gamma_2$ и γ_3 в системе С'. Полученные уравнения связывают 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):

$$\begin{cases} U_3 = K_1 \cdot U_0 \\ I_3 = K_2 \cdot U_0 \end{cases}$$

где K_1 – коэффициент пропорциональности между сдвигами потенциала на устье и на забое; K_2 – коэффициент пропорциональности между сдвигом потенциала на забое и током защиты

Используя данную систему уравнений, рассчитывают смещение потенциала на устье и забое скважины при любой заданной силе тока.

Для реализации рассмотренного алгоритма расчета параметров катодной защиты разработано программное обеспечение с использованием объектно-ориентированного языка программирования Delphi 7.

Диалоговое окно программы условно можно разделить на три области (рис.2).

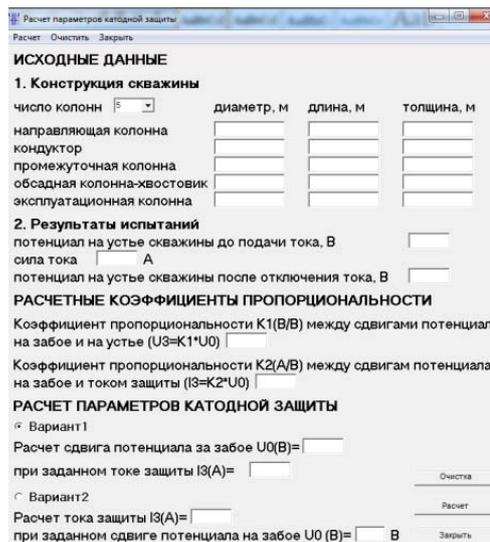


Рис. 2 - Диалоговое окно программы для определения параметров катодной защиты обсадной колонны, состоящей из пяти участков

Область ввода исходных данных:

- ввод параметров колонны (число участков от одного до пяти);
- ввод параметров каждого участка колонны (м) – диаметр, длина и толщина стенки;
- ввод значения потенциала на устье скважины до подачи тока (В);
- ввод значения силы тока (А);
- ввод значения потенциала на устье скважины после отключения тока (В);

Область результатов расчета коэффициентов пропорциональности:

- коэффициент пропорциональности K_1 между сдвигами потенциала на устье и на забое скважины;
- коэффициент пропорциональности K_2 между сдвигом потенциала на забое и током защиты.

Область расчета параметров катодной защиты:

- Вариант 1 – Расчет сдвига потенциала на забое при заданном токе защиты;
- Вариант 2 - Расчет тока защиты при заданном сдвиге потенциала на забое.

Для выбора варианта расчета выделяют “Вариант 1” или “Вариант 2”. В случае выделения “Вариант 1” задают ток защиты $I_3(A)$ и определяют сдвиг потенциала на забое $U_0 (B)$, в случае

выделения “Вариант 2” задают сдвиг потенциала на забое U_0 (В) и определяют ток защиты I_3 (А).

Сопоставление результатов расчетов и результатов экспериментальных исследований в промышленных условиях провели для обсадной колонны скважины № 7263г НГДУ «Бавлынефть» (2012 г. пуск в эксплуатацию), состоящей из трех участков: направление, кондуктор, эксплуатационная колонна (рис. 3).

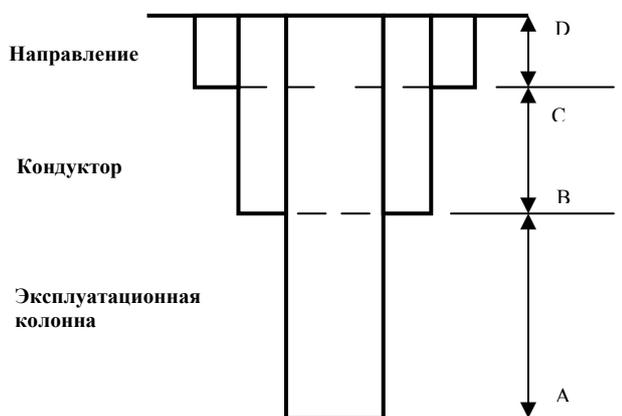


Рис. 3 – Трехступенчатая обсадная колонна

На первом этапе исследования были проведены испытания с подачей тока поляризации ($I_n=6A$), при этом потенциал на устье скважины до подачи тока (U_0, B) составлял $-0,757$ В (МСЭ), а после отключения тока (U_1,B) составил $2,9$ В. Рассчитанное значение соотношение ($\Delta, B/A$) при этом составило $0,357$.

Результаты определения соотношение ($\Delta, B/A$) и удельного сопротивления покрытий ($\gamma_{co}, \text{Ом} \cdot \text{м}^2$) при значениях силы тока защиты от 3 до 10 А приведены в табл.1. В рассматриваемой методике предполагается, что значения соотношения между смещением потенциала на устье скважины и силой тока защиты, а так же значения удельного сопротивления покрытия не изменяются при изменении силы тока защиты. Однако испытания в промышленных условиях и результаты расчета показали, что значения этих параметров модели зависят от величины силы тока защиты при этом коэффициент вариации составляет $0,11$.

После подстановки значения « γ_{co} » во все выражения для $b_1, b_2, b_3, \gamma_1, \gamma_2$ и γ_3 были 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) при рассматриваемых значениях силы тока:

Для силы тока 3 А:

$$\begin{cases} U_3 = U_0 \cdot 1,25 \\ I_3 = U_0 \cdot 4,78 \end{cases}$$

Для силы тока 4 А:

$$\begin{cases} U_3 = U_0 \cdot 1,21 \\ I_3 = U_0 \cdot 3,89 \end{cases}$$

Для силы тока 5А:

$$\begin{cases} U_3 = U_0 \cdot 1,17 \\ I_3 = U_0 \cdot 3,17 \end{cases}$$

Для силы тока 6А:

$$\begin{cases} U_3 = U_0 \cdot 1,14 \\ I_3 = U_0 \cdot 3,19 \end{cases}$$

Для силы тока 7А:

$$\begin{cases} U_3 = U_0 \cdot 1,19 \\ I_3 = U_0 \cdot 3,53 \end{cases}$$

Для силы тока 8А:

$$\begin{cases} U_3 = U_0 \cdot 1,19 \\ I_3 = U_0 \cdot 3,57 \end{cases}$$

Для силы тока 9А:

$$\begin{cases} U_3 = U_0 \cdot 1,2 \\ I_3 = U_0 \cdot 3,79 \end{cases}$$

Для силы тока 10А:

$$\begin{cases} U_3 = U_0 \cdot 1,22 \\ I_3 = U_0 \cdot 4,11 \end{cases}$$

Результаты расчета сдвига потенциала на забое (U_0) с использованием значения силы тока защиты $U_3 = f(I_3)$ и сдвига потенциала на устье скважины $U_0 = f(U_3)$ и усредненных значений коэффициентов ($\begin{cases} U_3 = U_0 \cdot 1,2 \\ U_3 = U_0 \cdot 3,77 \end{cases}$) представлены в табл.1.

Таблица 1 – Результаты определения сдвига потенциала на устье скважины, измеренные и рассчитанные соотношения между сдвигом потенциала и током защиты

Сила тока (J_3, A)	Сдвиг потенц иала ($U_3 B$)	$\Delta, B/A$	$\gamma_{co}, \text{Ом} \cdot \text{м}^2$	$U_0 = f(U_3), B$	$U_0 = f(I_3), B$
3	0,783	0,261	373	0,65	0,80
4	1,243	0,311	450	1,04	1,06
5	1,843	0,369	541	1,54	1,33
6	2,143	0,357	523	1,88	1,59
7	2,363	0,338	492	1,97	1,86
8	2,663	0,333	485	2,22	2,12
9	2,843	0,316	458	2,37	2,39
10	2,963	0,296	428	2,47	2,65

Данные табл. 2 показали, что при использовании в расчетах средних значений коэффициентов K_1 и K_2 , результаты расчетов сдвига потенциала на забое $U_0=f(U_3)$ близки к результатам расчетов сдвига потенциала на забое $U_0=f(I_3)$.

В качестве примера на рис. 4 показано диалоговое окно программы с вариантом расчета сдвига потенциала на забое при токе защиты 6А.

Оценку степени влияния срока эксплуатации колонны на значения параметров модели провели на основании расчетов для обсадной колонны скважины № 22505 НГДУ «Бавлынефть» (1980 г. ввод в эксплуатацию), состоящей из трех участков: направление, кондуктор, эксплуатационная колонна (рис. 3).

Сдвиг потенциала, измеренное соотношение($\Delta, B/A$) и удельное сопротивления покрытия для для обсадной колонны скважины № 22505 составили: сила тока ($J_3=6 A$), потенциал после отключения тока, ($U_1= -0,97B$), сдвиг потенциала ($U_3 =0,26B$), измеренное соотношение ($\Delta=0,043 B/A$), удельное сопротивление покрытия ($\gamma_{co}=30 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$).

Уравнения для расчета смещения потенциала на устье и забое скважины при любой заданной силе тока имеют вид:

$$\begin{cases} U_3 = U_0 \cdot 2,67 \\ I_3 = U_0 \cdot 62,62 \end{cases}$$

Результаты расчета сдвига потенциала на устье (U_3, B) и на забое (U_0, B) с использованием этих уравнений представлены в табл.2.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

1. Конструкция скважины

число колонн	диаметр, м	длина, м	толщина, м
направляющая колонна	0,426	10	0,009
кондуктор	0,245	450	0,007
эксплуатационная колонна	0,168	2284	0,0073

2. Результаты испытаний

потенциал на устье скважины до подачи тока, В: -0,737

сила тока, А: 0,1

потенциал на устье скважины после отключения тока, В: -2,9

РАСЧЕТНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОСТИ

Коэффициент пропорциональности $K1(B/B)$ между сдвигами потенциала на забое и на устье ($U_3=K1*U_0$): 1,14

Коэффициент пропорциональности $K2(A/B)$ между сдвигом потенциала на забое и током защиты ($I_3=K2*U_0$): 0,19

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ

Вариант 1

Расчет сдвига потенциала за забое $U_0(B)=$ 1,88

при заданном токе защиты $I_3(A)=$ 0,1

Вариант 2

Расчет тока защиты $I_3(A)=$ 0,1

при заданном сдвиге потенциала на забое $U_0(B)=$ 0,1 В

Рис. 4 – Результаты расчетов «Вариант 1» на скважине № 7263г НГДУ «Бавлынефть»

Таблица 2 – Результаты определения сдвига потенциала на устье и на забое скважины

Сила тока защиты (J_3, A)	Сдвиг потенциала на устье (U_3, B)	Сдвиг потенциала на забое (U_0, B)
3	-0,128	0,048
4	-0,171	0,064
5	-0,213	0,080
6	-0,256	0,096
7	-0,299	0,112
8	-0,341	0,128
9	-0,384	0,144
10	-0,426	0,160

Сопоставление данных табл. 1 и 2 показывает существенное различие в сдвигах потенциалов, как на

устье так и на забое скважин при одной и той же силе тока защиты для скважины № 7263г НГДУ «Бавлынефть» (2012 г. ввод в эксплуатацию) и для скважины № 22505 НГДУ «Бавлынефть» (1980 г. ввод в эксплуатацию). Это различие в основном связано, с тем что удельное сопротивление покрытия для обсадной колонны скважины № 7263г НГДУ «Бавлынефть» составляет $469 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$, а для обсадной колонны скважины № 22505 НГДУ «Бавлынефть» - $30 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$.

Выводы

1. Разработано программное обеспечения для расчетно-экспериментальной методики определения параметров катодной защиты обсадных колонн с учетом конструкции скважин.
2. Установлено, что соотношение между смещением потенциала на устье скважины и силой тока защиты, а так же рассчитанное значение удельного сопротивления покрытия зависят от величины силы тока защиты.
3. Показано, что рассматриваемая методика позволяет эффективно оценивать удельное сопротивление покрытия колонны, которая в свою очередь зависит от возраста скважины и от условий эксплуатации.

Литература

1. 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.
2. Долгих, С.А. определение тока защиты и расчет смещения потенциала на забое обсадной колонны нефтяной скважины / С.А. Долгих, Б.Л. Журавлев, Р.А. Кайдриков, В.Э. Ткачева // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2012. - № 22. – С. 241-244
3. EN 12954, Cathodic protection of buried or immersed metallic structures. General principles and application for pipelines, 2001.
4. EN 15112, Äußerer kathodischer Korrosionsschutz von Bohrlochverrohrungen; Deutsche Fassung EN 15112:2006

© С. А. Долгих – асп. каф. технологии электрохимических производств КНИТУ, с.н.с. TatНИПИнефть г.Бугульма, dolg@tatnipi.ru, Ф. Ш. Шакиров - зав. лаб. защиты от коррозии института TatНИПИнефть г.Бугульма, fsharirov@tatnipi.ru, С. С. Виноградова – канд. техн. наук, доц. каф. технологии электрохимических производств КНИТУ, vsvet@kstu.ru; Б. Л. Журавлев – д-р хим. наук, проф. той же кафедры, bgyr@kstu.ru; И. Н. Галиев – асп. той же кафедры.