Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LVII, вып. 2, 1969 г.

РАСЧЕТ ТРУБЧАТОГО ЭЛЕКТРОДА И ОМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОМ КРЕПЛЕНИИ СКВАЖИН

В. Н. Сенников

При электрохимическом креплении неустойчивых пород в буровых скважинах обычно используются трубчатые и раздвижные конструкции электродов. Наиболее широкое распространение нашли трубчатые электроды.

При проектировании работ по электромеханическому креплению с применением трубчатых электродов, как правило, приходится решать следующие задачи: 1) в случае имеющейся энергетической мощности установки N, *квт*, т. е. известной силе тока I, *а*, напряжении U, *в*, и заданной плотности тока j, *ма/см²*, необходимо определить максимально возможную длину электрода L, *м*; 2) или, наоборот, задаваясь определенной длиной электрода и плотностью тока, требуется найти параметры энергетической установки.

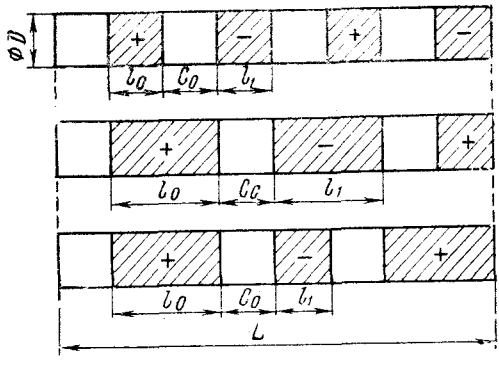


Рис. 1. Варианты компоновки полюсов трубчатых электродов

Для решения поставленных задач необходимо знать также техническую характеристику электрода: величину его наружного диаметра, размеры полюсных патрубков и характер их расположения.

Расположение полюсных патрубков в трубчатых электродах бывает различным и определяется в основном постоянством размера изолирующего кольца между полюсами. Мы предлагаем несколько вариантов компоновки электрода, отличающихся размерами полюсных патрубков, а также характером их расположения (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что в первом случае $l_0=l_1=C_0$, во втором $2C_0=l_0=l_1$ и в третьем $l_0=2l_1=2C_0$, т. е. в основу компоновки заложен принцип постоянства и кратности величины C_0 по отношению к l_0 и l_1. Таким образом, первому варианту соответствует условие: $l_0=$

$=C_0=l_1$, второму — $KC_0=l_0=l_1$ и третьему — $KC_0=Kl_1=l_0$, где коэффициент K может колебаться от 1 до 5.

В каждом из предлагаемых вариантов при одной и той же длине электрода сумма площадей полюсных патрубков будет различной. Она нами названа *рабочей площадью электрода*, которая, в отличие от общей площади электрода $F_{эл}=2\pi RL=\pi DL$, может быть определена в первом и втором случаях по формуле

$$F_р=2nF_а=2nF_к$$

и в третьем случае

$$F_р=n\,(1+K)\,F_0,$$

где L—длина электрода, *см*; D—его наружный диаметр, *см*; n—число полюсных патрубков, анодных или катодных; $F_а$, $F_к$—площади анодного и катодного полюсных патрубков, *см*^{2}; F_0—площадь изолирующего кольца, *см*^{2}.

С целью установления определенных границ и возможности сравнения различных электродов мы условились считать оптимальным по рабочей площади такой электрод, у которого размеры полюсных и изолирующих колец равны, т. е. соблюдается равенство $l_0=C_0=l_1$. Тогда для оптимального электрода

$$F_р=2nF_а=2nF_к=2nF_0.$$

Несущая площадь электрода

$$F_{эл}=2nF_{а\,(к)}+2nF_0=4nF_{а\,(к)}=4F_0n,$$

откуда

$$n=\frac{F_{эл}}{4F_0}\;;\quad F_{а\,(к)}=\frac{F_{эл}}{4n}\;;$$

$$F_{эл}=F_р+2nF_0.$$

Полученные выражения для определения $F_{эл}$, $F_{а\,(к)}$ и n не являются исчерпывающими для решения поставленных задач, так как они не отражают связи с токовыми параметрами источника энергии и электрода, т. е. с плотностью тока j и силой тока I. Для выведения необходимых формул, выражающих эту связь, воспользуемся известным выражением, по которому вычисляется плотность тока

$$j=\frac{I}{F},$$

где j—плотность тока, *ма*/*см*^{2}; I—сила тока, *ма*; F—рабочая площадь анодных полюсов, *см*^{2}. Все величины здесь известны, в частности, величина F представляет собой суммарную площадь анодных или катодных полюсов, т. е. $F=\Sigma F_{а\,(к)}=nF_{а\,(к)}$.

Следовательно, плотность тока

$$j=\frac{I}{nF_{а\,(к)}};\quad F_{а\,(к)}=\frac{I}{nj};\quad F_р=2nF_а=\frac{2I}{j},$$

откуда

$$j=\frac{2I}{F_р}=\frac{2I}{F_{эл}-2nF_0}.$$

Для проведения дальнейших операций, при помощи которых можно прийти к определению длины электрода, нами вводится поня-

тие *относительной,* или *условной плотности тока* i, которая означает величину тока, приходящуюся на единицу общей несущей площади электрода, и выражается

$$i=\frac{I}{F_{эл}}=\frac{I}{F_р+2nF_а}=\frac{I}{\frac{2I}{j}+\frac{2I}{j}}=\frac{I}{4}.$$

На основании условий для оптимального электрода

$$F_{эл}=4nF_{а\,(к)}=\frac{I}{i}=\frac{4I}{j}.$$

Располагая данными о силе и плотности тока, можно определить максимальную для данных условий длину электрода

$$L=\frac{F_{эл}}{\pi D}=\frac{4I}{\pi Dj}=c\frac{4I}{Dj},$$

где $c=\frac{1}{\pi}=0{,}78$.

Приведенные выше зависимости, как уже было сказано раньше, отвечают условию оптимального электрода, т. е. когда $C_0=l_0=l_1$. Однако наиболее общим условием является $l_0=l_1=KC_0$. В этом случае анодные и катодные полюсные кольца, полярность которых в процессе работы меняется, больше изолирующих в K раз. Следовательно, в этом случае

$$F_р=n(F_а+F_к)=n(KF_0+KF_0)=2KnF_0;$$

$$F_{эл}=F_р+2nF_0=2n(K+1)F_0;$$

$$F_0=\frac{F_а}{K}=\frac{F_{эл}}{n2(1+K)};\quad F_{а\,(к)}=\frac{KF_{эл}}{2n(1+K)}.$$

Плотность тока на катоде и аноде

$$j_{а\,(к)}=\frac{I}{\Sigma F_{а\,(к)}}=\frac{In(2K+2)}{nKF_{эл}}=i\left(2+\frac{2}{K}\right).$$

Длина электрода

$$F_{эл}=\frac{I}{i}=\frac{I(2+2K)}{Kj_{а\,(к)}};\quad L=\frac{F_{эл}}{\pi D}=c\frac{I(2+2K)}{Kj_{а\,(к)}}.$$

В третьем варианте, как видно из рис. 1, длина одного из полюсов в K раз больше длины изолирующего кольца и отрицательного полюса. В этом случае соблюдается следующее равенство: $l_0=KC_0=Kl_1$. Здесь мы можем написать, что

$$F_р=n(F_к+F_а)=nF_0(1+K).$$

Общая несущая площадь

$$F_{эл}=F_р+2nF_0=nF_0(3+K),$$

тогда

$$F_0=F_к=\frac{F_{эл}}{(3+K)n}.$$

Исходя из условия $l_0=Kl_1=KC_0$, можно написать

$$F_а=\frac{KF_{эл}}{(3+K)n}.$$

В этом случае плотность тока на катоде и аноде

$$j_к=\frac{I}{\Sigma F_к}=\frac{In(3+K)}{nF_{эл}}=i(3+K);$$

$$j_а=\frac{I}{\Sigma F_а}=\frac{In(3+K)}{KF_{эл}n}=i\left(1+\frac{3}{K}\right).$$

Относительная плотность тока

$$i=\frac{I}{F_{эл}}=\frac{I}{F_р+2nF_0}=\frac{I}{nF_0(3+K)},$$

или

$$i=\frac{I}{nF_к(3+K)}=\frac{I}{n\frac{I}{nj_к}(3+K)}=\frac{j_k}{3+K}.$$

Длина электрода

$$L=\frac{F_{эл}}{\pi D};\quad F_{эл}\frac{I}{i}=\frac{I(3+K)}{j_к},$$

следовательно,

$$L=c\frac{I(3+K)}{j_кD},$$

где $c=0{,}78$.

Электрическая схема соединения полюсов в электроде представляется как ряд расположенных друг за другом сопротивлений. Это значит, что в данном случае мы имеем дело с параллельным соединением полюсов электрода, замыкающихся через раствор электролита. Как известно, при параллельном соединении ряда одинаковых сопротивлений эквивалентное сопротивление $R_{экв}$ определится соотношением [1]

$$\frac{1}{R_{экв}}=m\frac{1}{R};\quad R_{экв}=\frac{R}{m},$$

где R—омическое сопротивление, *ом*; m—число одинаковых сопротивлений, $m=2n-1$; n—число анодных или катодных полюсов. Следовательно,

$$R_{экв}=\frac{R}{2n-1}. \qquad (1)$$

Для упрощения дальнейших расчетов будем условно считать, что

$$I_1=I_2=I_3=\ldots=I_n=\frac{I}{n}. \qquad (2)$$

Данное допущение отходит от истинного распределения тока в электроде, так как экспериментальные исследования показывают, что в действительности не наблюдается равенства сопротивлений между полюсами и ток в электроде распределяется неравномерно. Ввиду того, что при расчете $R_{экв}$ мы учитываем только общую картину распределения тока, равенство (2), очевидно, вполне допустимо.

В формуле (1) неизвестными являются две величины: n и R. Число анодных или катодных полюсов n находится по вышеприведенным формулам, при определении R следует исходить из следующих известных положений.

Электропроводящей средой при электрохимическом закреплении является грунт, насыщенный раствором электролита. Основой электропроводящей среды в грунте является раствор электролита или грунтовая вода. Проводимость минеральной части грунта незначительна и ею при расчетах можно пренебречь. В результате многочисленных исследований установлено, что удельное сопротивление ρ зависит от состава минеральной части грунта, качества грунтовой воды и главным образом от влажности грунта (рис. 2 [2]).

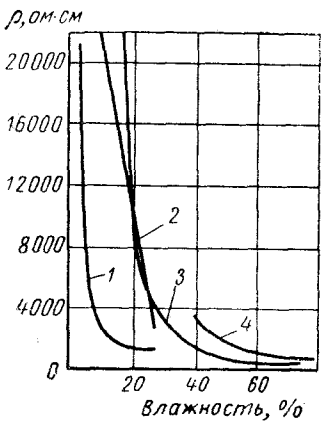


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления грунтов от влажности
1—суглинок; *2*—песок; *3*—глина; *4*—ил

Поскольку при работе с трубчатым электродом мы используем для крепления различные консистентные смеси с влажностью 70—80% и выше, то, следовательно, и удельное сопротивление, как это видно на рис. 2, у них будет в пределах 1000 *ом·см*.

На основе известной величины удельного омического сопротивления вычисляется R омическое

$$R=\frac{\rho l}{F},$$

где ρ—удельное омическое сопротивление, *ом·см*; R—омическое сопротивление, *ом*; l—длина между катодом и анодом, *см*; F—площадь взаимодействия полюсов, *см*^{2}.

При расчете омического сопротивления следует иметь в виду, что в процессе электрохимического крепления происходит разогревание грунта. Следовательно, удельная электропроводность γ_0 повысится до определенной величины. Как известно, в пределах от 0 до 100°С существует линейная зависимость между γ_0 и температурой

$$\gamma_{0T_2}=\gamma_{0T_1}[1+\alpha(T_2-T_1)],$$

где α—температурный коэффициент.

При работах на значительной глубине к сопротивлению $R_{экв}$ еще прибавится сопротивление подводящей магистрали, и тогда общее омическое сопротивление будет равно

$$R_{маг}+R_{экв}=R_{маг}+\frac{R}{2n-1},$$

где $R_{маг}$—сопротивление магистрали, *ом*; R—омическое сопротивление электрода, *ом*.

Приведенные расчетные формулы показывают, что омическое сопротивление в области электрода может колебаться в пределах от нескольких *ом* до десятых долей ома в зависимости от длины электрода. Это имеет значение для выбора типа источника постоянного тока, способного обеспечить необходимый электрорежим крепления.

В заключение приведем примеры расчетов длины электрода диаметром 110 *мм* для заданной мощности источника тока $N=11$ *квт*, $U=110$ *в*, $I=100$ *а*, плотность тока на полюсах электрода $j=30$ *ма/см*^{2}.

1. Расчет длины электрода для первого варианта компоновки полюсных колец

$$L_1=\frac{F_{эл}}{\pi D}=\frac{4I}{\pi jD}=\frac{4\cdot10^5}{3{,}14\cdot11\cdot30}\approx386\ см.$$

Число анодных или катодных колец-полюсов

$$n=\frac{F_{эл}}{4F_0}=\frac{4I}{j}\cdot\frac{1}{4F_0}=\frac{4\cdot10^5}{30}\cdot\frac{1}{4\cdot5\cdot34{,}5}\approx19{,}3\ шт.,$$

т. е. в электроде должно быть примерно 19·2=38 колец, ширина каждого в этом случае равна межполюсному расстоянию 5 *см*.

2. Расчет длины электрода для второго варианта компоновки полюсных колец

$$L_2=\frac{F_{эл}}{\pi D}=\frac{1}{\pi D}\cdot\frac{2I\,(1+K)}{Kj}=\frac{2\cdot10^5\cdot(1+4)}{3{,}14\cdot11\cdot4\cdot30}\approx246\ см,$$

K=4, т. е. полюсное кольцо в четыре раза больше межполюсного расстояния.

Число анодных или катодных колец-полюсов

$$n=\frac{F_{эл}}{2F_0\,(1+K)}=\frac{2I\,(1+K)}{Kj}\cdot\frac{1}{2\cdot5\cdot34{,}5\,(K+1)}=\frac{2\cdot10^5\cdot5}{4\cdot30\cdot2\cdot172{,}5\cdot5}\approx5\ шт.$$

3. Расчет длины электрода для третьего варианта компоновки полюсов

$$L_3=\frac{F_{эл}}{\pi D}=\frac{1}{\pi D}\cdot\frac{I\,(3+K)}{2j_к}=\frac{1}{3{,}14\cdot11}\cdot\frac{10^5\cdot\,(3+4)}{2\cdot30}\approx348\ см.$$

Число катодных колец-полюсов

$$n=\frac{F_{эл}}{(3+K)\,F_к}=\frac{I\,(3+K)}{2\,(3+K)\,j_кF_к}=\frac{10^5\cdot7}{2\cdot7\cdot30\cdot172{,}5}\approx9\ шт.$$

4. Определим $R_{экв}$ электрода при длине полюсов 250 *мм* и диаметре 110 *мм*. Число полюсных колец 9 *шт*., ρ=100 *ом·см*

$$R=\frac{\rho l}{F}=\frac{100\cdot25}{830}\approx4\ ом;\qquad R_{экв}=\frac{R}{2n-1}=\frac{4}{2\cdot9-1}\approx0{,}2\ ом.$$

Выводы

1. Между параметрами трубчатого электрода: рабочей площадью, длиной, плотностью тока—существуют определенные зависимости, которые выражаются удобными для расчетов формулами.

2. Рабочая площадь электрода определяется как размерами, так и характером расположения полюсов. Оптимальный электрод имеет минимальную рабочую площадь.

3. Максимально возможная длина по сравнению с другими электродами при прочих равных условиях (т. е. силе тока I, плотности тока j) будет наибольшей у оптимального электрода.

4. Омическое сопротивление в электроде вычисляется, как для цепи с параллельным соединением сопротивлений.

5. С увеличением длины электрода электрическое сопротивление уменьшается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин А. С., Перекалин М. А. Электротехника. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.

2. Коржуев А. С., Титков Н. И. Электрохимический метод закрепления грунтов и перспективы его применения при бурении скважин. Изд-во АН СССР, М., 1959.

3. Ржаницин Б. А. Электроосушение глинистых грунтов. Искусственное закрепление грунтов. М., Стройиздат, 1954.