

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЫПАРНОЙ АППАРАТУРЫ С ПРЯМЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ НАГРЕВОМ

В. П. ПИЩУЛИН

(Представлена научно-методическим семинаром кафедры процессов,
машин и аппаратов химических производств)

Электрическая энергия является наиболее эффективным и перспективным теплоносителем в различных процессах и аппаратах химической технологии. Разработка ряда конструкций аппаратов с прямым электрическим нагревом требует методики расчета аппаратуры. В настоящем сообщении основное внимание уделено методике расчета выпарной аппаратуры с прямым электрическим нагревом, поскольку при прямом электронагреве тепло выделяется непосредственно в самом нагреваемом материале за счет прохождения электрического тока через материал, служащий сопротивлением, то есть при прямом электронагреве полностью отсутствует теплопередача через стенку. При этом возможно выделение большого количества энергии в определенных объемах с высокой скоростью нагрева и получение вследствие этого любых температур. Коэффициент полезного превращения электрической энергии в тепловую составляет 95—98%, упрощается теплоподвод и, естественно, тепловой расчет аппаратуры. Электротермические установки компактны и просты по конструкции.

Необходимое количество тепла и мощность нагревателя для проведения процесса нагревания или выпаривания растворов рассчитываются из теплового баланса аппарата. Это тепло выделяется при прохождении переменного электрического тока через систему электрод — раствор — электрод согласно закону Джоуля — Ленца

$$Q = k I U \tau = k I^2 R \tau, \quad (1)$$

где I — сила тока, a ;

U — рабочее напряжение, v ;

R — сопротивление, $ом$;

τ — время;

k — коэффициент пропорциональности.

В системе электрод — раствор — электрод электроды обладают электронной проводимостью, нагреваемый или выпариваемый раствор — ионной проводимостью, а сопротивление системы будет складываться из сопротивления электродов, раствора и двух сопротивлений на границе электрод — раствор, определяемых сопротивлением двойного электрического слоя и химическими реакциями на поверхности электродов. Поскольку сопротивление электродов — величина относительно малая, можно считать, что сопротивление раствора и граничные сопротивления определяют общее сопротивление системы и процесс выделения тепла.

Для определения сопротивления раствора необходимо знать удель-

ную электропроводность раствора, расстояние между электродами, их форму, расположение, газонаполнение электролита.

$$R_p = K_r \cdot K \cdot \frac{1}{z} \cdot \frac{\delta}{F}, \quad (2)$$

$$K_r = \frac{1}{1 - 1,78\Gamma + \Gamma^2}, \quad (3)$$

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_r + V_p}, \quad (4)$$

где z — удельная электропроводность раствора, $ом^{-1} \cdot см^{-1}$;

δ — расстояние между электродами, $см$;

F — рабочая поверхность электродов, $см$;

K_r — коэффициент, учитывающий газонаполнение электролита [1],

K — коэффициент, учитывающий форму и расположение электродов;

Γ — газонаполнение;

V_r — объем газа в смеси;

V_p — объем раствора в смеси.

Величина граничного сопротивления определяется удельным граничным сопротивлением и рабочей поверхностью электродов. Удельное граничное сопротивление зависит от материала электрода, состава и концентрации раствора, температуры процесса и плотности тока на поверхности электрода и определяется экспериментально

$$R_{гр} = \frac{R_{уд. гр}}{F}, \quad (5)$$

где $R_{уд. гр}$ — удельное граничное сопротивление, $ом \cdot см^2$.

Сила тока определяется плотностью тока и рабочей поверхностью электрода. Оптимальная плотность тока выбирается экспериментально для каждого процесса в зависимости от электрофизических и коррозионных свойств в системе электрод — раствор — электрод. По выбранным на основе экспериментальных данных плотности тока и соотношениям геометрических размеров, конфигурации электродов определяется электрическое сопротивление в системе, линейные размеры, рабочее напряжение и сила тока для плоскопараллельных электродов при совместном решении уравнений (6—12), для цилиндрических коаксиальных электродов по уравнениям (13—20).

$$I = i \cdot F, \quad (6)$$

$$R = K_r \cdot K \cdot \frac{1}{z} \cdot \frac{\delta}{F} + 2 \frac{R_{уд. гр}}{F} = \frac{K_r \cdot K}{z \cdot n \cdot m \cdot \delta} + 2 \frac{R_{уд. гр}}{n \cdot m \cdot \delta^2}, \quad (7)$$

$$U = IR = i \left(\frac{K_r \cdot K \cdot \delta}{z} + 2R_{уд. гр} \right), \quad (8)$$

$$N = I U = i^2 \cdot F \left(\frac{\delta \cdot K_r \cdot K}{z} + 2R_{уд. гр} \right) = i^2 \cdot \delta^2 \cdot m \cdot n \left(\frac{\delta \cdot K_r \cdot K}{z} + 2R_{уд. гр} \right), \quad (9)$$

$$F = a \cdot b = n \cdot m \cdot \delta^2, \quad (10)$$

$$a = n \cdot \delta, \quad (11)$$

$$b = m \cdot \delta, \quad (12)$$

где i — плотность тока, $а/см^2$;

a — ширина электрода, $см$;

b — длина электродов, $см$;

n — коэффициент соотношения ширины электрода и расстояния между электродами;

m — коэффициент соотношения длины электрода и расстояния между электродами.

$$I = i \cdot F_{\text{ср}} = i \cdot 2\pi \cdot n \cdot r_{\text{в}} \frac{r_{\text{в}}(m-1)}{\ln m}, \quad (13)$$

$$F_{\text{ср}} = 2\pi \cdot r_{\text{ср}} H, \quad (14)$$

$$r_{\text{ср}} = \frac{r_{\text{н}} - r_{\text{в}}}{\ln \frac{r_{\text{н}}}{r_{\text{в}}}}, \quad (15)$$

$$H = n \cdot r_{\text{в}}, \quad (16)$$

$$r_{\text{н}} = m \cdot r_{\text{в}}, \quad (17)$$

$$R = R_{\text{р}} + R_{\text{гр. н}} + R_{\text{гр. в}} = \frac{1}{2\pi n \cdot r_{\text{в}}} \left(\frac{K_{\text{н}} \cdot K}{z} \ln m + \frac{R_{\text{гр. н}}}{m \cdot r_{\text{в}}} + \frac{R_{\text{гр. в}}}{r_{\text{в}}} \right), \quad (18)$$

$$U = I \cdot R = i \cdot r_{\text{в}} \cdot \frac{m-1}{\ln m} \cdot \left(\frac{K_{\text{н}} \cdot K}{z} \cdot \ln m + \frac{R_{\text{гр. н}}}{m \cdot r_{\text{в}}} + \frac{R_{\text{гр. в}}}{r_{\text{в}}} \right), \quad (19)$$

$$N = I \cdot U = 2\pi n \cdot i^2 \cdot r_{\text{в}}^3 \left(\frac{m-1}{\ln m} \right)^2 \cdot \left(\frac{K_{\text{н}} \cdot K}{z} \ln m + \frac{R_{\text{гр. н}}}{m \cdot r_{\text{в}}} + \frac{R_{\text{гр. в}}}{r_{\text{в}}} \right), \quad (20)$$

где $F_{\text{ср}}$ — средняя поверхность прохождения тока, см^2 ;
 $r_{\text{ср}}$ — средний радиус межэлектродного пространства, см ;
 $r_{\text{н}}$ — радиус наружного электрода, см ;
 $r_{\text{в}}$ — радиус внутреннего электрода, см ;
 n — коэффициент соотношения длины электродов и радиуса внутреннего электрода;
 m — коэффициент соотношения радиусов наружного и внутреннего электродов;
 $R_{\text{гр. н}}$ — удельное граничное сопротивление наружного электрода, $\text{ом} \cdot \text{см}^2$;
 $R_{\text{гр. в}}$ — удельное граничное сопротивление внутреннего электрода, $\text{ом} \cdot \text{см}^2$;
 причем $R_{\text{гр. н}}$ и $R_{\text{гр. в}}$ выбираются при соответствующей плотности тока

$$i_{\text{н}} = \frac{r_{\text{н}} - r_{\text{в}}}{r_{\text{н}} \cdot \ln \frac{r_{\text{н}}}{r_{\text{в}}}} \cdot i = \frac{m-1}{m \ln m} \cdot i, \quad (21)$$

$$i_{\text{в}} = \frac{r_{\text{н}} - r_{\text{в}}}{r_{\text{в}} \cdot \ln \frac{r_{\text{н}}}{r_{\text{в}}}} \cdot i = \frac{m-1}{\ln m} \cdot i. \quad (22)$$

Проверка расчета в лабораторных условиях показала, что отклонение мощности, выделявшейся в аппарате во время исследования, от расчетной составляло до $\pm 5\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. П. Федотьев [др.]. Прикладная электрохимия. «Химия», 1967.
2. Исследование в области промышленного электронагрева. Труды ВНИИЭТО. Вып. 2. Под ред. А. П. Альтгаузена и Л. Е. Никольского. «Энергия», 1967.