

ПРОДОЛЬНАЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОЛОКАХ

Заболотский А.В.

ООО «Группа «Магнезит», zabolotsky@bk.ru

При прохождении электрического тока в металлических проволоках происходит выделение теплоты, что приводит к разогреву проволоки. Данный факт важен для успешного проектирования электрохимической аппаратуры для определения оптимальных геометрических размеров токоподводов (для того чтобы обеспечить допустимую температуру проводников). Расчет температуры проводника постоянного сечения находящегося в однородной среде многократно был описан в литературе [1]. В том случае, если сечение проводника переменное, либо разные участки проводника находятся в разных условиях теплообмена с окружающей средой, существенной становится теплопередача внутри самого проводника. Примером проводника, участки которого находятся в разных условиях теплообмена, могут служить вводы проводников внутрь аппаратуры (как правило, проводники в таких местах окружены дополнительной изоляцией и крепежом) или границы изолированных и неизолированных участков. В реальных условиях равновесные температуры таких соседних участков могут отличаться на несколько десятков градусов, что, естественно не наблюдается при экспериментальной проверке, вследствие перераспределения тепла внутри самого проводника.

Температура проволоки, по которой проходит электрический ток, в стационарном режиме может быть определена при решении следующего уравнения:

$$Q_{\text{п}}=P, \quad (1)$$

где P – теплота выделяемая в проволоке, а $Q_{\text{п}}$ – тепловые потери с поверхности проволоки. После подстановки и преобразований получается следующее выражение для определения температуры проволоки:

$$T_s=T_a+R \cdot I^2/(\alpha \cdot S_{\text{п}}), \quad (2)$$

где T_s – температура поверхности проволоки (ввиду высокой теплопроводности металлов допустимо считать, что перепад температуры по сечению проволоки невелик), T_a – температура воздуха, R – электрическое сопротивление проволоки, I – электрический ток в проволоке, α – коэффициент теплоотдачи от поверхности проволоки в окружающую среду, $S_{\text{п}}$ – площадь поверхности проволоки. Трудность вызывает расчет коэффициента теплоотдачи α , который зависит от многих факторов, в частности от температур поверхности проводника и окружающей среды, геометрических размеров и положения проволоки (горизонтальное или вертикальное) и т. д. Общий коэффициент теплоотдачи является суммой коэффициентов лучистой ($\alpha_{\text{л}}$) и конвективной теплоотдачи ($\alpha_{\text{к}}$):

$$\alpha=\alpha_{\text{л}}+\alpha_{\text{к}}. \quad (3)$$

В свою очередь коэффициент лучистой теплоотдачи определяется через температуры поверхности проволоки и окружающей среды:

$$\alpha_{\text{л}}=5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon_{\text{п}} \cdot (T_s^4-T_a^4) \cdot (T_s-T_a)^{-1}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_{\text{п}}$ – степень черноты поверхности проводника. Коэффициент конвективной теплоотдачи определяется методами теплового подобия, которые подробно изложены в [1]. Таким образом, могут быть получены исходные данные для расчета температуры поверхности при наличии продольной теплопередачи – температуры на участках с постоянным характером теплообмена с окружающей средой.

Алгоритм расчета температуры поверхности проводника следующий:

1. Определяется температура на всех участках проводника в зависимости от изоляции и условий их работы – выражения (2)-(4). Влияние соседних участков проводника не учитывается.

2. На следующем этапе необходимо определить площадь поверхности теплообмена и толщину теплового сопротивления между соседними участками проводника. Предположим, что излучающей тепло поверхностью является граница областей проводника находящихся в разных условиях обмена с окружающей средой; для простоты рассмотрим проводник круглого сечения и будем пользоваться цилиндрическими координатами. Тепловой поток от каждой точки излучающей поверхности равномерно распределяется ко всем точкам поверхности «холодного» участка проводника. Таким образом, нам надо найти среднее расстояние от сечения разделяющего «горячий» и «холодный» участки до наружной поверхности «холодного» участка и среднюю площадь, через которую происходит теплопередача. Средняя площадь теплопередачи может быть определена как среднее геометрическое площади сечения проводника и площади поверхности «холодного» участка:

$$S_c = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot d^3 \cdot l_c}{4}}, \quad (5)$$

где d – диаметр проводника, l_c – длина «холодного» участка проводника. Расстояние от произвольной точки теплоизлучающего сечения до произвольной точки поверхности «холодного» участка рассчитывается по формуле:

$$\delta_i = l^2 + \frac{d^2}{4} + r^2 - d \cdot r \cdot \cos(\beta - \alpha), \quad (6)$$

где r – расстояние от точки излучающего сечения до его центра, β – угловая координата точки на поверхности «холодного» участка, α – угловая координата точки на излучающем сечении, l – расстояние от точки на «холодной» поверхности до излучающего сечения. Величины, входящие в соотношение (6) показаны на рис. 1 (произвольные точки излучающей поверхности и внешней поверхности «холодного» участка обозначены А и В соответственно).

Среднее расстояние между теплоизлучающим сечением и поверхностью холодного участка (рассеивающей поверхностью) соответственно может быть сосчитано следующим образом:

$$\delta = \frac{1}{2 \cdot \pi^2 \cdot d \cdot l_c} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{d}{2}} \left(l^2 + \frac{d^2}{4} + r^2 - d \cdot r \cdot \cos(\beta - \alpha) \right) dr dl d\alpha d\beta, \quad (7)$$

3. Полученные из расчета по зависимостям (5) и (7) величины и температуры «холодного» и «горячего» участков, рассчитанные по формуле (2) используются для определения теплового потока между этими участками проводника:

$$q = \frac{\Delta T \cdot S_c}{\delta}, \quad (8)$$

где q – количество теплоты, переходящее от «горячего» участка к «холодному» в единицу времени, ΔT – разность температур между участками.

4. Следующим шагом корректируются равновесные тепловые потери для участков проволоки:

$$Q_n = P \pm q, \quad (9)$$

Знак «плюс» применяется к «холодному» участку, получающему дополнительную теплоту. «Минус» – к «горячему» (теряющему теплоту) участку соответственно.

5. Далее уточняются коэффициенты теплоотдачи, при необходимости электрическое сопротивление и выделяемая теплота в участках проводника и вновь рассчитываются температуры.

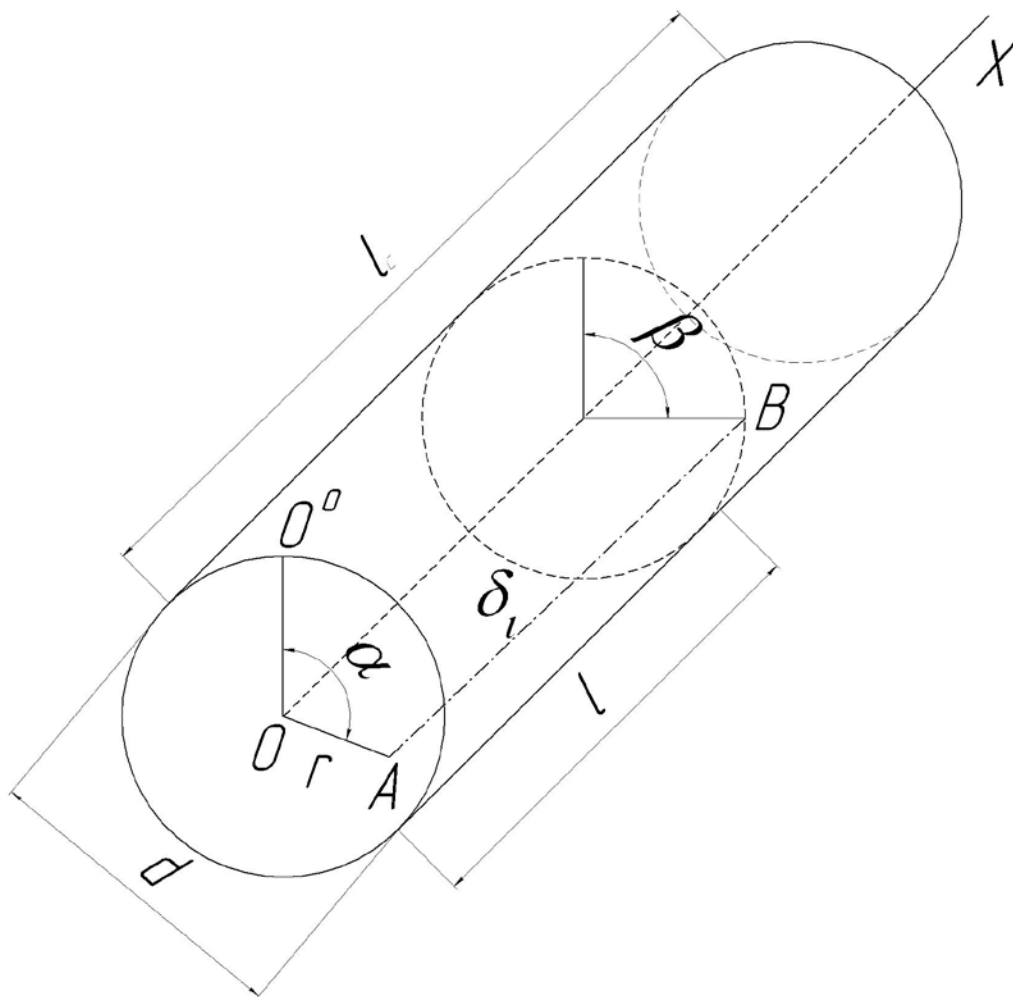


Рис. 1. Схема к расчету расстояния между поверхностями теплообмена

Процедура повторяется до тех пор, пока разность между предыдущим и последующим значением температур не станет меньше заданной точности расчета. Предложенный метод эффективен при отношении длины участка проводника к его диаметру не превышающему 50. В случае большей длины проводника следует дополнительно разделять «горячую» и «холодную» зоны на участки меньшей длины и аналогичным образом рассматривать их взаимное влияние. Этим же способом, разделяя проводник на участки малой длины и рассматривая их влияние друг на друга, возможно построить поле температур по длине проводника.

Методика расчета была проверена при исследовании разогрева металлических проволок электрическим током с участками, имеющими различную тепло- и электроизоляцию и разную степень черноты поверхности (разный коэффициент теплоотдачи соответственно). Расчетные результаты показали высокую степень корреляции с измеренными значениями.

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М., «Химия», 1971.