УДК 519.7

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЯЧЕЙКЕ МАГНИЕВОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА

Пьяных А.А., Махов Д.И., Дербенев С.С.
Научный руководитель – профессор Скуратов А.П.
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

На сегодняшний день остро стоит проблема в производстве высококачественного и недорогого магния. Однако проблема энергосбережения при производстве магния остается весьма актуальной. Большинство существующих электролизеров уже устарело, и нуждаются в модернизации, а принципиально нового электролизера в промышленности пока нет. Эмпирические методы исследования в данной области требуют большого количества ресурсов, поэтому на начальном этапе создания магниевого электролизера новой конструкции предпочтительнее использовать численные методы моделирования.

В работе проводится численное моделирование теплофизических процессов в модели ячейки магниевого электролизера. Процесс получения магния в электролизере осуществляется следующим образом: объем ванны электролизера заполняется электролитом, в электролит погружаются электроды из разных материалов, к которым подводится постоянный электрический ток. Один из электродов служит анодом, другой – катодом. В процессе электрохимических реакций на катоде выделяется жидкий магний, на аноде, в зависимости от состава расплава, побочный продукт. Побочный продукт и магний раздельно удаляются из объема электролизера. При обеднении электролита, производят его искусственное обогащение.

Математической постановкой задачи является система уравнений теплопроводности и граничных условий. При разработке математической модели принято, что распределение температур в рабочем объеме электролизера подчиняется двумерному уравнению теплопроводности, представленному в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial x_1}\left(\lambda(x_1,T)\cdot\frac{\partial T}{\partial x_1}\right)+\frac{\partial}{\partial x_2}\left(\lambda(x_2,T)\cdot\frac{\partial T}{\partial x_2}\right)+q_v(x_1,x_2)=0, \quad (1)$$

где q_v – объемная плотность внутренних источников теплоты, задаваемая в межполюсном расстоянии, Вт/м^3.

Расчетная область имела форму прямоугольника, представляющего собой конструкцию электролизера в поперечном сечении.

На поверхностях расчетной области принималось граничное условие третьего рода (уравнение Ньютона – Рихмана) с учетом лучистой составляющей теплового потока:

$$-\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_c=\alpha_к\left(T_n-T_{окр}\right)+\ \varepsilon c_0\left[\left(\frac{T_n}{100}\right)^4-\left(\frac{T_{окр}}{100}\right)^4\right], \quad (2)$$

где $\alpha_к$ – коэффициент конвективной теплоотдачи, $Вт/(м^2\cdot K)$; ε – степень черноты; $c_0=5{,}6687\cdot10^{-8}$ – излучательная способность абсолютно черного тела, $Вт/(м^2\cdot K^4)$; T и $T_{окр}$ – температура наружной поверхности и окружающей среды соответственно, К.

На оси симметрии модели использовалось граничное условие второго рода (адиабатическая поверхность):

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0. \tag{3}$$

Дискретизация уравнения (1) проводилась с использованием центрально-разностной равномерной сетки с шагом h_1 по направлению x_1 и шагом h_2 по направлению x_2. В результате была получена пятиточечная система нелинейных уравнении. Пятиточечный шаблон дискретизации дифференциального уравнения представлен на рисунке 1.

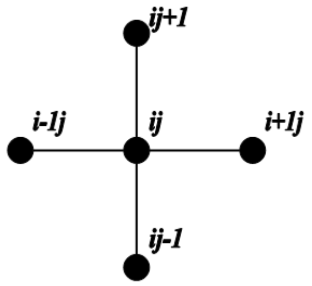

Рис. 1. Центрально-разностный пятиточечный шаблон (крест)

Уравнение (1) в результате дискретизации принимает вид сеточного уравнения:

$$-a_{ij} \cdot T_{i-1j} - b_{ij} \cdot T_{ij-1} + d_{ij} \cdot T_{ij} - a_{i+1j} \cdot T_{i+1j} - b_{ij+1} \cdot T_{ij+1} = 0; \\ i = 1,2,\dots,N_1 - 1, j = 1,2,\dots,N_2 - 1, \tag{4}$$

где N_1, N_2 – количество узлов в расчетной области по горизонтали и по вертикали.

Решение сеточной системы уравнений (4) проводилось итерационным методом сопряженных градиентов с выбором сеточного оператора согласно методу приближенной факторизации.

Анализ литературных источников показывает, что для проведения расчетов теплового состояния магниевых электролизеров можно ограничиться стационарным уравнением теплопроводности с внутренними источниками теплоты. При этом влияние гидродинамики электролита и расплавленного металла на теплоперенос можно учесть путем введения эффективного коэффициента теплопроводности.

На рисунках 2 и 3 представлены результаты моделирования теплофизических процессов на упрощенной модели магниевой ячейки, построенной в программном комплексе Ansys. Результаты расчета температурных полей и электрического потенциала в электролизной ячейке в целом соответствуют рекомендуемым рабочим характеристикам магниевых электролизеров с хлоридными расплавами. Максимальная температура в междуполюсном пространстве, полученная за счет джоулевой теплоты, обуславливается перепадом напряжения в этой области. Соответственно, из рисунка 3 видно, что падение напряжения, полученное на математической модели, сконцентрировано в межэлектродном пространстве. В реальных условиях распределение электрического потенциала в рабочем пространстве электролизера будет, очевидно, не таким идеальным, так как разность потенциалов возникает не только в полезной для получения магния области, но и в футеровке и местах соприкосновения токоподводов и токоотводов.

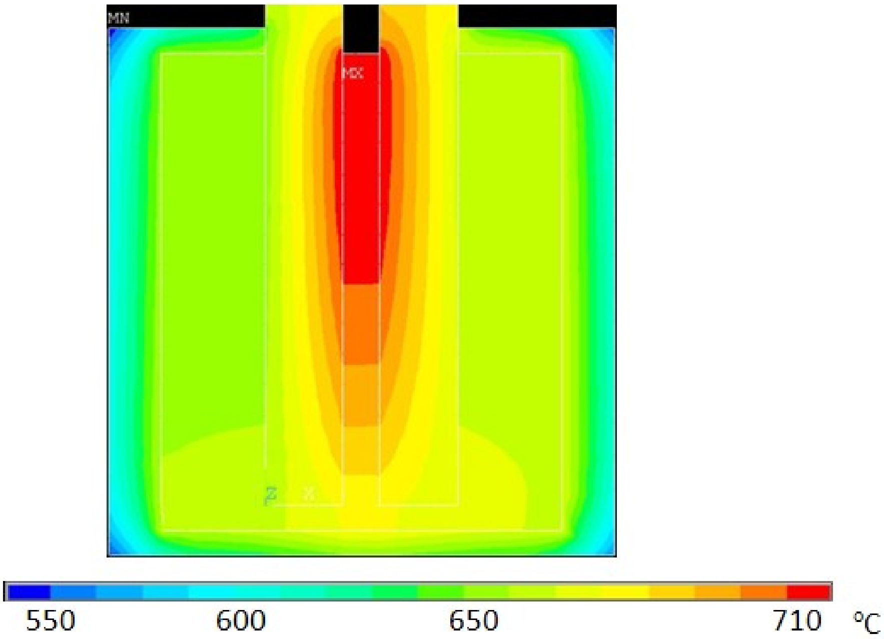

Рис. 2. Температурное поле электролизной ячейки

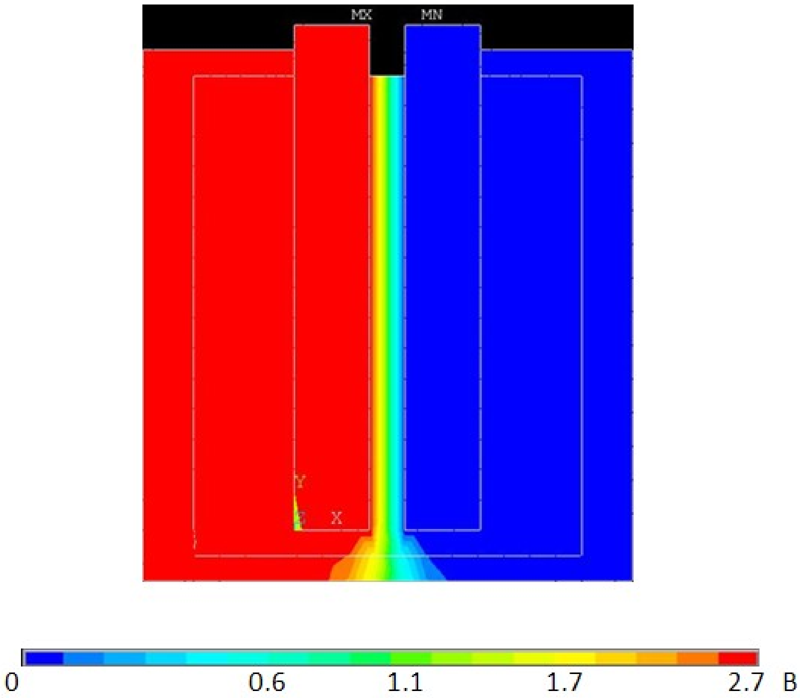

Рис. 3. Электрический потенциал электролизной ячейки

В разработанной математической модели учтены свойства материалов электродов, футеровки и электролита коэффициентом теплопроводности и электропроводности. Отметим, что в реальных условиях работы электролизной установки протекает множество процессов, которые будут интегрированы в математическую модель в процессе дальнейших исследований. Поэтому результатом моделирования должна стать полноценная математическая модель, в которой будут учтены все физико-химические процессы, протекающие в электролизере.