

*ассистент Эссельбах В.С.,  
к.т.н., доц. Эссельбах С.Б.,  
к.т.н., доц. Куберский С.В.,  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОБРАБОТКЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ РАСПЛАВОВ**

*Розроблена математична модель розрахунку основних конструктивних параметрів електромагнітів, які використовуються для обробки високотемпературних розплавів у схрещених магнітному та електричному полях.*

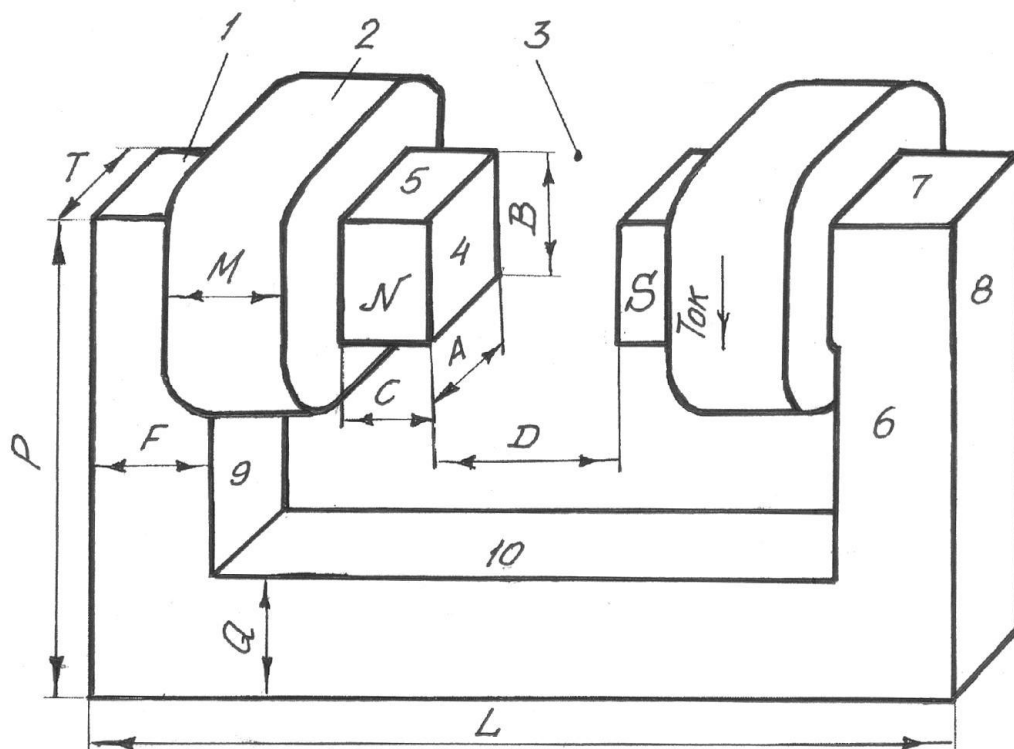
Электромагниты постоянного тока широко распространены в устройствах приборов и автоматики. Магниты постоянного тока бывают уникальными сооружениями, как, например, в Дубне, где магнит содержит 7 тысяч тонн железа, 400 т меди и создает в зазоре шириной 0,6 м индукцию величиной 1,2 тесла. В металлургии магниты постоянного тока применяются в технологических установках, действующих по принципу кондукционного электромагнитного насоса. Электромагнитным способом транспортируют, перемешивают, дозируют, сепарируют жидкие металлы и другие электропроводные жидкости. Есть сведения о разработках движителей кораблей на принципе кондукционного электромагнитного насоса.

В черной металлургии применение электромагнитов постоянного тока имеет некоторые особенности [1, 2].

Высокотемпературные расплавы черной металлургии должны обрабатываться в футерованной емкости. В пространстве между полюсными наконечниками магнита, кроме обрабатываемого расплава, необходимо разместить неферромагнитный металлический корпус емкости, его футеровку и предусмотреть постановочный зазор. С этой точки зрения, размеры полюсных наконечников и расстояние между ними для металлурга желательно иметь по возможности больше. С другой стороны, промышленный магнит должен иметь приемлемые габариты, материалоемкость и потреблять по возможности меньшую мощность.

Методики расчета электромагнитов с Ш-образными и С-образными железными сердечниками основаны на модели тороида с равномерно распределенной обмоткой возбуждения. Для электромагни-

та, изображенного на рисунке 1, который применен для лабораторной, а затем и промышленной установки, модель тороида с узким зазором оказалась недостаточной, и была выбрана модель расчета индукции в рабочем зазоре по магнитным проводимостям [3].



1 – магнитопровод; 2 – обмотки возбуждения;  
3 – рабочий зазор; 4-10 – поверхности электромагнита

Рисунок 1 – Схема электромагнита использованного для обработки высокотемпературных расплавов

Модель рассматривает магнитный поток  $\Phi$ , проходящий по магнитопроводу 1, созданный соленоидом 2, и образующий магнитную индукцию в рабочем зазоре 3. Магнитный поток выходит из “северного” торца соленоида 2 и входит в “южный” торец соленоида, расположенного на противоположном полюсе магнитопровода 1. Часть магнитного потока проходит по рабочему зазору 3 между поверхностями 4 и образует его “рабочую” часть. Эта часть создает силовое воздействие на находящийся внутри зазора 3 расплав, если по расплаву проходит ток. Остальной магнитный поток проходит между поверхностями 5, ребрами магнитопровода и по воздуху вокруг зазора. Конфигурация магнитного потока в рабочем зазоре и вокруг него эллипсоидальная (рис. 2).

В связи с тем, что создать однородное магнитное поле в электромагните невозможно, дополнительно было проведено исследование бочкообразности магнитного поля в рабочем зазоре. Выполнялись измерения индукции магнитного поля  $B$  в рабочем зазоре и вокруг зазора электромагнита. Размер зазора и результаты измерений представлены на рисунке 2.

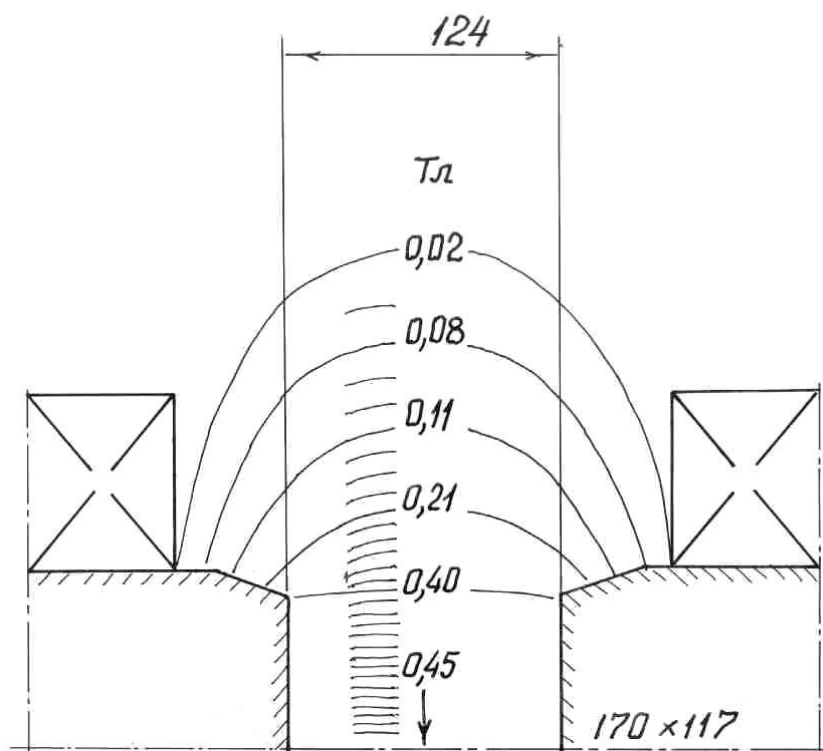


Рисунок 2 – Топография магнитного поля

Общий магнитный поток, созданный обмотками возбуждения 2 (рис.1), составляет, А·Гн (ампер-генри):

$$\Phi = I \cdot \omega \cdot G,$$

где  $I$  – сила тока в обмотке возбуждения, А;  $\omega$  – число витков обмотки;

$G$  – магнитная проводимость пространства между “северным” и “южным” торцами соленоидов, Гн.

Магнитный поток состоит из потока, проходящего по зазору и долей общего потока, проходящего по воздуху вне рабочего зазора:

$$\Phi = \Phi_{\text{зая}} + \sum \Phi_{\text{в}} + \Phi_{\text{д}},$$

где  $\Phi_{\text{д}}$  – диссипативная доля в окружающем магнит пространстве;

$\sum \Phi_{\text{в}}$  – доля магнитных потоков между боковыми поверхностями 5 и ребрами полюсов.

Магнитная проводимость  $G$  пространства между торцами обмоток возбуждения является свойством данного конкретного электромагнита и зависит от его конструкции, размеров и силы тока  $I$ , причем проводимость зазора и вокруг него постоянна, а рассеяние зависит от силы тока, поэтому переменна вся величина  $G$ .

Согласно способу расчета по магнитным проводимостям [3], магнитный поток  $\Phi$  распределяется по отдельным воображаемым путям пропорционально их проводимостям. Линии магнитной проводимости в рабочем зазоре близки к нормальям к плоскости 4 (рис. 1). Между параллельными плоскостями линии проводимости представлены полуокружностями, центр которых расположен на оси рабочего зазора 3, а интенсивность определяется расстоянием до зазора, отсчитываемым от торца соленоида. Проводимость между пересекающимися плоскостями также рассматривается по дугам окружностей, центры которых находятся в точке пересечения плоскостей. Расчеты магнитных проводимостей выполняли по формулам из [3].

Проводимость между торцами полюсов в рабочем зазоре, Гн:

$$G_1 = \mu_0 \cdot \left[ \frac{A \cdot B}{D} + 0,58 \cdot \sqrt{A \cdot B} + \frac{0,14 \cdot \sqrt{A \cdot B}}{\ln(1,05 + D/\sqrt{A \cdot B})} \right], \quad (1)$$

где  $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$  Гн/м (магнитная постоянная).

Между боковыми поверхностями наконечников:

$$G_2 = \mu_0 \cdot \frac{0,14 \cdot C \cdot (A + B) \cdot 2}{0,17 \cdot D + 0,4 \cdot C}. \quad (2)$$

Между ребрами:

$$G_3 = \mu_0 \cdot \frac{A_p \cdot B_p}{D}, \quad (3)$$

причем:  $A_p = A + D \cdot (2g_{p,T} + g'_A + g''_A)$ ,  $B_p = B + D \cdot (2g_{p,T} + g'_B + g''_B)$ .

Величины  $g_{p,T}$ ,  $g'$  и  $g''$  представляют собой удельные проводимости с ребер торца и боковых поверхностей, ( $g_{p,T}=0,4$ ;  $g'$ ,  $g''=0,2$ ).

Если кромки полюсных наконечников выполнены на скос, то проводимость между скосами:

$$G_4 = \mu_0 \cdot \frac{b}{\varphi} \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}, \quad (4)$$

где  $b$  – ширина скоса;

$\varphi$  – угол между плоскостями скосов;

и  $R_2$  – радиусы дуг с центром в точке пересечения проекций плоскостей скосов.

Все величины  $G_i$  находят из конструктивных данных.

Напряженность магнитного поля  $H$ , созданная обмотками возбуждения, образует в участке магнитопровода внутри соленоида поток магнитной индукции  $B = J + \mu_0 \cdot H = \mu_0 \cdot \mu \cdot H = I \cdot \omega / l$ . Здесь  $\mu$  – магнитная проницаемость материала магнитопровода;  $l$  – длина средней линии магнитопровода. Намагниченность материала магнитопровода  $J$  составляет около 1,8 Тл при  $H \approx 10^4$  А/м.

Магнитный поток, созданный обмотками возбуждения в сердечнике с площадью сечения  $S$ , равен  $\Phi = B \cdot S$ .

Вся проводимость электромагнита  $G = B \cdot S / (I \cdot \omega)$  оказывается больше, чем сумма отдельных проводимостей  $\sum G_i$ , потому что существуют еще потери магнитной энергии в виде потоков рассеяния “на фон”. Эту долю проводимости можно найти по разности:

$$G_5 = \frac{B \cdot S}{I \cdot \omega} - (G_1 + G_2 + G_3 + G_4). \quad (5)$$

Составляющая проводимости  $G_5$  зависит от силы тока в обмотке возбуждения, в отличие от величин  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  и  $G_4$ , которые от силы тока не зависят.

“Полезная” доля проводимости, или КПД электромагнита составляет:

$$\eta = \frac{G_1}{G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5} = \frac{G_1 \cdot I \cdot \omega}{B \cdot S}. \quad (6)$$

Доля магнитного потока, проходящая по рабочему зазору, А·Гн:

$$\Phi_{\text{заз}} = \Phi \cdot \eta, \quad (7)$$

Индукция магнитного поля в рабочем зазоре, Тл:

$$B_{\text{заз}} = \frac{\Phi \cdot \eta}{A \cdot B}. \quad (8)$$

Используя данный расчет, моделированием на ЭВМ определяют оптимальные конструктивные параметры электромагнита для конкретных условий электромагнитной обработки высокотемпературных расплавов.

*Разработана математическая модель расчета основных конструктивных параметров электромагнитов используемых для обработки высокотемпературных расплавов в скрещенных магнитном и электрическом полях.*

*The mathematical model of calculation of basic structural is developed parameters of electromagnets in-use for treatment high temperature fusions in the crossed magnetic and electric fields.*

**Библиографический список.**

- 1. Верте Л.А. Электромагнитная разливка и обработка жидкого металла / Л.А. Верте. – М.: Металлургия, – 1967. – 208с.*
- 2. Повх И.Л. и др. Магнитная гидродинамика в металлургии. / И.Л. Повх., А.Б. Капуста, Б.В. Чекин. – М.: Мет., 1974. – 240с.*
- 3. Любчик М.А. Силовые электромагниты аппаратов и устройств автоматики постоянного тока. / М.А. Любчик. – М. Энергия. – 1968. – 214с.*

*Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Петрушовым С.Н.*