

Академик АН ЛатвССР И. М. КИРКО, Г. Е. МАЛЫГИНА

ГИДРОТЕРМОМАГНИТ

Гидромагнитом называется обычно магнитогидродинамическая система, использующая механическую энергию движущихся проводящих сред для возбуждения или усиления магнитного поля в данном объеме. Как своеобразные магниты могут быть использованы установка в опыте по возбуждению э.д.с., описанная Штеенбеком и др. (1), или «механический электромагнит», описанный нами (2).

Кольм и др. (3-7) описывают гидрсомагнит, основанный на использовании радиального течения жидкого металла, стекающего от внешней поверхности цилиндра к его оси, для создания в некотором внутреннем цилиндрическом объеме радиуса r_2 сильного магнитного поля

$$H = H_0 (r_1 / r_2)^{R_m}, \quad (1)$$

где $R_m = f \sigma \mu_0$ — магнитное число Рейнольдса; $f = rv = \frac{1}{2\pi} Ql^{-1}$ — число, пропорциональное расходу жидкого металла на единицу длины цилиндра; H_0 — напряженность магнитного поля, создаваемого специальным подмагничивающим соленоидом во внешнем цилиндре радиуса r_1 ($r_1 > r_2$).

В гидромагните такого типа расходуется мощность на гидравлическое сопротивление внутри магнита и во внешних трубопроводах

$$W_{\text{гидр}} = \pi l \rho f^3 (1/r_2^2 - 1/r_1^2) + C \rho f^2 / 2r_1^2, \quad (2)$$

на сопротивление, вызванное взаимодействием индукционных токов с магнитным полем,

$$W_{\text{инд}} = \pi l f^2 \frac{\sigma_0^2 H_0^2}{R_m} \left[\left(\frac{r_1}{r_2} \right)^{2R_m} - 1 \right] \quad (3)$$

и на подмагничивание

$$W_{\text{магн}} = \frac{H_0^2}{g_1^2} \frac{r_1}{\lambda \sigma_1}, \quad (4)$$

где $g_1 = 0,23$ — безразмерный формфактор соленоида (4); σ — проводимость жидкого металла; σ_1 — проводимость меди обмотки; λ — коэффициент заполнения обмотки.

В случае больших полей можно пренебречь (2) и считать, что расход мощности в гидромагните с учетом формул (1), (3), (4) пропорционален квадрату напряженности создаваемого магнитного поля.

$$W \cong H^2 \left\{ \pi l f^2 \frac{\sigma_0^2}{R_m} \left[1 - \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{2R_m} \right] + \frac{r_1}{g_1^2 \lambda \sigma} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{2R_m} \right\}. \quad (5)$$

Для обычного соленоида, построенного по оптимальной геометрии (4), расход мощности связан с полем по формуле (4), где H_0 следует заменить более сильным полем H , а r_1 — на r_2 .

Гидромагнит можно считать конкурентноспособным по сравнению с соленоидами для создания сильных полей, если отношение (5) к (4) будет меньше единицы, т. е.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma} \left\{ b R_m \left[1 - \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{2R_m} \right] + \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{2R_m - 1} \right\} < 1, \quad (6)$$

где

$$b = \pi l_1 \lambda g_1^2 r_3^{-1}. \quad (7)$$

Легко показать, что при любом $R_m > 0$ это неравенство не выполняется для реальных значений входящих в него величин. Например, для отношения $l_1 r_3^{-1} = 4$, $\lambda = 0,75$, $g_1 = 0,23$, $\sigma_1 / \sigma = 24$, где σ_1 — проводимость

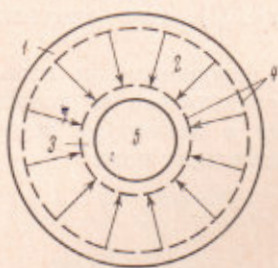


Рис. 1. 1 — внешняя труба, по которой ферромагнитная жидкость поступает в гидромагнит, двигаясь перпендикулярно к плоскости рисунка; 2 — область радиального течения ферромагнитной жидкости; 3 — область продольного стекания; 4 — трубы с перфорированными стенками; 5 — высокотемпературная область, в которой необходимо создать сильное магнитное поле

меди, σ — проводимость NaK, левая часть неравенства (6) будет заведомо больше единицы.

Таким образом, гидромагнит Кольма нецелесообразен энергетически, что, конечно, не исключает возможности его использовать, исходя из конструктивных или эксплуатационных соображений.

Положение коренным образом изменяется, если в гидромагните Кольма использовать ферромагнитную жидкость⁽⁸⁻¹²⁾ и создать интенсивный радиальный поток тепла в направлении, противоположном радиальному потоку жидкости. Тогда потоки ферромагнитной жидкости будут представлены согласно рис. 1. Жидкость, протекая вдоль области 4, будет сильно нагреваться и может становиться неферромагнитной.

Предположим, что поле H_0 в гидротермомагните столь велико, что намагниченность жидкости $M = I_s$ — намагниченности насыщения, а $\mu_r \approx 1$. Тогда перепад давлений между областями 1 и 3 можно записать следующим образом:

$$-\mu_0 I_s H_0 \left(\frac{r_1}{r_3} \right)^{\mu_0 c f} + \frac{\mu_0 H_0^2}{2} \left[\left(\frac{r_1}{r_3} \right)^{2\mu_0 c f} - 1 \right] + \frac{\rho f^2}{2} \left(\frac{1}{r_3^2} - \frac{1}{r_1^2} \right) + \frac{C \rho f^2}{2 r_1^2} = \Delta p_n, \quad (8)$$

где первый член представляет собой перепад давлений, вызванный втягиванием полем магнитной жидкости. В левой части выражения (8) стоит перепад давления, обусловленный насосом.

Полную мощность, которая расходуется при работе гидротермомагнита, можно представить в виде

$$W_{\text{полн}} = \frac{r_1 H_0^2}{g_1^2 \lambda \sigma_1} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{2\mu_0 c f} + \Delta p_n Q, \quad (9)$$

Область, в которой гидротермоманнит будет конкурентноспособным по сравнению с соленоидом для создания сильных полей, определится отношением (9) к (4) с соответствующей заменой в (4) поля H_3 на H и r_1 на r_3 , причем величина этого отношения должна быть меньше единицы.

Используя (8), а также полагая, что $r_3 \ll r_1$, отношение (9) к (4) записывается так:

$$2(\sigma_1 \sigma^{-1} R_m g_1^2 \pi l \lambda r_3^{-1}) (-I_s/H + 1/2) < 1, \quad (10)$$

или, подставляя численные значения λ , g_1 , $l r_3^{-1}$ и $\sigma_1 \sigma^{-1}$, получаем

$$R_m < 0,083H / (H - 2I_s). \quad (11)$$

Для того чтобы коэффициент усиления поля, равный $(r_1/r_3)^{R_m}$, был по возможности большим, магнитное число Рейнольдса должно быть больше 1. Из (11) получаем, что это выполняется всегда, если $2I_s < H < 2,2I_s$.

Таким образом, применение ферромагнитных жидкостей может превратить гидромагнит в энергетически целесообразное сооружение для получения магнитных полей с индукцией примерно до одного тесла в больших объемах. При больших значениях индукции индукции гидротермоманнит явится также серьезным конкурентом гидромагнита Кольма.

Благодарим А. Гайлитиса за обсуждение настоящей работы.

Латвийский государственный университет
им. П. Стучки
Рига

Поступило
5 XI 1969

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ М. Штеенбек, И. М. Кирко и др., ДАН, 180, № 2, 326 (1968). ² И. М. Кирко, ДАН, 188, № 2, 330 (1969). ³ Henry H. Kofm, Osman K. Mawardi, J. Appl. Phys., 32, 7 (1961). ⁴ В. Р. Карасик, Физика и техника сильных магнитных полей, «Наука», 1964. ⁵ А. И. Бертинов, Д. А. Бут, В. Н. Калугин, Магнитная гидродинамика, № 2, 97 (1969). ⁶ А. И. Бертинов, Д. А. Бут и др., VI Рижское совещ. по магнит. гидродинамике, 3, 1968, стр. 133. ⁷ А. И. Бертинов, Д. А. Бут, В. И. Читечян, Теплофиз. высоких температур, 6, № 5, 943 (1968). ⁸ J. L. Neuringer, R. Rosensweig, Phys. Fluids, 7, № 12, 1927 (1964). ⁹ R. E. Rosensweig, Nature, 210, 5036, 613 (1966). ¹⁰ Е. Л. Реслер мл., Р. Е. Розенцвейг, Ракетная техника и космонавтика, № 2 (1964). ¹¹ М. Н. Григорьев, И. М. Кирко, ЖТФ, 26, в. 7 (1956). ¹² И. М. Кирко, М. В. Филиппов, ЖТФ, 30, в. 9 (1960).