

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ, ОРИЕНТАЦИИ И ПРОВОДИМОСТИ ТЕЛ НА ИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВЫТАЛКИВАНИЕ ИЗ ПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ

А. В. Андреев, У. Ц. Андрес

(Харьков, Москва)

В связи с проблемой сепарации минеральных зерен по удельным весам в проводящей жидкости с током в магнитном поле [1, 2] представляет интерес исследование влияния формы, ориентации и проводимости разделяемых зерен на величину испытываемой ими электромагнитной выталкивающей силы.

1. Как известно, на проводящую жидкость, в которой протекает ток плотностью j , помещенную в магнитное поле с индукцией B , действует объемная электромагнитная сила (в динах)

$$f = kj \times B \quad (1.1)$$

Здесь k — коэффициент, зависящий от выбора единиц и равный 0.1, если B измеряется в тесла и j — в a/m^2 .

Эта сила вызывает перераспределение давлений в жидкости и приводит к эффективному «утяжелению» (или «облегчению») жидкости. В отсутствие инородных тел в жидкости уравнение равновесия имеет вид

$$-\nabla p + \rho g + f = 0 \quad (1.2)$$

где p , ρ и g — давление, плотность жидкости и ускорение силы тяжести.

В присутствии тела с проводимостью, отличной от проводимости жидкости, в результате перераспределения плотности тока объемная электромагнитная сила будет, вообще говоря, вихревой, и жидкость придет в движение. Будем считать, что вдали от тела ток в жидкости имеет постоянную плотность j_0 , а магнитное поле B в ближайшей окрестности тела однородно.

При заданных j и B (т. е. заданной силе f) уравнения магнитной гидродинамики для установившегося движения сводятся к уравнениям

$$\rho(v \nabla)v = -\nabla p + \rho g + f_0 + f_- + \nu \rho \nabla^2 v, \quad \nabla v = 0 \quad (f_0 = kj_0 \times B) \quad (1.3)$$

Здесь v и ν — скорость и кинематическая вязкость жидкости, f_0 — объемная электромагнитная сила, f_- переменная составляющая силы, зависящая от параметра r/a и быстро убывающая по мере удаления от поверхности тела; r — радиус-вектор, a — характерный линейный размер тела.

Единственным безразмерным параметром, определяющим течение жидкости, распределение давлений, отношение проводимостей жидкости и тела и выталкивающую силу, приложенную к телу, служит [3]

$$A = \delta j_0 B a^3 / \rho \nu^2 \quad (1.4)$$

Здесь δ — коэффициент, зависящий от отношения проводимостей тела σ_0 и жидкости σ .

В работе [4] дается общее выражение для электромагнитной выталкивающей силы, действующей на тело объема V

$$F = -\delta f_0 V \{1 - \Phi(A)\} \quad (1.5)$$

Как показывают вычисления [2, 4], для непроводящей сферы ($\delta = 1$) в случае $A \gg 1$ безразмерная функция $\Phi(A) = 0$, в случае $A \ll 1$ в [3] дается $\Phi(A) = 0.25$.

Для несферических тел сила F , кроме параметра A , зависит еще от формы тела и его ориентации по отношению к направлениям тока в жидкости и магнитной индукции. Как показано в работе [3], при $A \ll 1$ для бесконечного цилиндра, ориентированного своей осью по направлению тока $F = jBV(\sigma - \sigma_0)/\sigma$; по направлению действия электромагнитной выталкивающей силы $F = jBV(\sigma - \sigma_0)/(\sigma + \sigma_0)$ по направлению магнитной индукции $F = 0$, тогда как для сферы $F = 3/2 jBV(\sigma - \sigma_0)/(2\sigma + \sigma_0)$. Эти выводы не противоречат результатам экспериментов, описанным в работе [5].

В связи с тем, что сепарируемые минеральные зерна имеют резко различающуюся форму, проведено измерение величины электромагнитной выталкивающей силы для нескольких обтекаемых и острогранных тел правильной геометрической формы, различным образом ориентированных по отношению к направлениям электрического тока и магнитной индукции. Из выражения (1.5) видно, что величина электромагнитной выталкивающей силы зависит от отношения проводимостей жидкости и тела.

При погружении проводящего тела в электролит, в котором протекает ток, в результате электрохимических процессов на поверхности тела, связанных с поляризацией, адсорбцией и т. п., картина распределения тока существенно отличается от расчетной и нестационарна.

Для оценки влияния электрохимических процессов на поверхности проводящих тел проведено измерение электромагнитной выталкивающей силы, действующей на латунную сферу, погруженную в раствор медного купороса.

2. Измерения. В качестве мерных тел были взяты: сфера, вытянутый эллипсоид вращения, цилиндр, конус, правильная четырехугольная пирамида и куб. Тела изготовлены из непроводящего материала плотностью $\rho \sim 3.00 \text{ г/см}^3$.

Измерения [6] сводились к гидростатическому взвешиванию на аналитических весах типа АДВ-1 (точность $2 \cdot 10^{-4} \text{ г}$) мерных тел, подвешенных на капроновой нити диаметром 100 μ в растворе медного купороса, залитого в кювету размерами $10 \times 10 \times 10 \text{ см}$ и снабженную медными пластинчатыми электродами размерами $10 \times 10 \times 0.15 \text{ см}$. Питание электролитической ячейки осуществлялось от селенового выпрямителя типа ВСА-5. Кювета помещалась в межполюсном зазоре электромагнита (полюса — цилиндрические, диаметром 25 см, $B \sim 0.4$ тесла), обмотки возбуждения которого питались от мотор-генератора. Весы экранировались от воздействия магнитного поля железной плитой толщиной $\sim 5 \text{ см}$.

Величина электромагнитной выталкивающей силы определялась как разность веса тела в жидкости при отсутствии в ней электрического тока (магнит при этом включен) и при наличии тока в жидкости (также при включенном магните). Такой способ измерений позволяет исключить влияние теплового расширения жидкости и поверхностного натяжения по периметру нити — подвески на зеркале жидкости.

3. Влияние формы и ориентации тела. Как показано в [4], при малых значениях числа А скорость течения жидкости, возникающего от перераспределения тока при наличии инородного тела, по порядку величины $v \sim \delta f_0 a^2 / \rho v$, а в случае больших чисел А порядок скорости $v \sim (\delta f_0 a / \rho)^{1/2}$.

На фиг. 1 показаны зависимости $F = F(j_+)$ (сплошными линиями) и $f = f(j_+)$ (пунктирными) для тел перечисленных выше форм, где F — электромагнитная выталкивающая сила, действующая на единицу объема тела, f — объемная электромагнитная сила, действующая на жидкость в отсутствие тела, j_+ — плотность тока. При этом

$$F = \frac{G_0 - G_-}{V}, \quad f = k j_+ B, \quad (3.1)$$

$$i_+ = \frac{i}{S - S_0} \quad (3.2)$$

Здесь G_0 и G_- — вес тела в жидкости при отсутствии и при наличии в ней тока, S и S_0 — площади перпендикулярных направлению тока сечений электролитической ячейки и тела.

Из графиков фиг. 1 легко определяется величина безразмерной силы

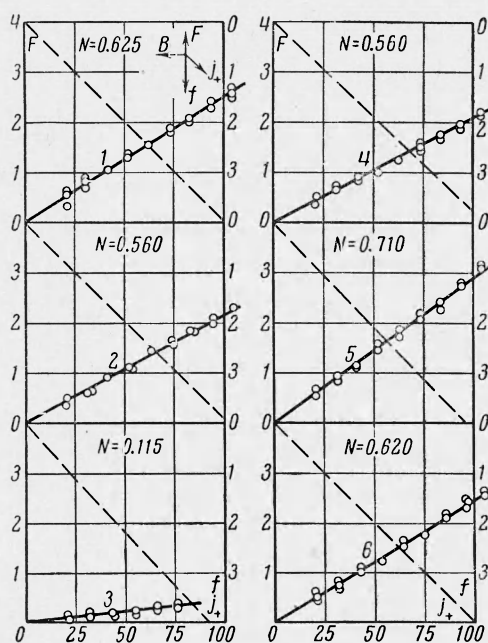
$$N = F / f \quad (3.2)$$

как отношение тангенсов углов наклона прямых $F = F(j_+)$ и $f = f(j_+)$ к оси абсцисс.

Безразмерная сила N используется в качестве меры полноты передачи электромагнитной составляющей гидростатического давления от жидкости к телу. Полученные величины N лежат в пределах от 0.115 для длинного цилиндра до 0.710 для пирамиды. Отношение безразмерных сил составляет 0.16.

На фиг. 2 показаны графики зависимостей $F = F(j_+)$ и $f = f(j_+)$ для исследованных тел, по-разному ориентированных относительно направлений тока и магнитной индукции.

Из графиков фиг. 1, 2 видно, что влияние ориентации тела сказывается слабее, чем влияние формы. Так для вытянутого эллипсоида вращения безразмерные силы при разных его ориентациях относятся как 0.627 : 0.560, для цилиндра 0.616 : 0.565, для конуса 0.700 : 0.560, для пирамиды 0.710 : 0.560. Следует отметить, что для большинства тел значения N близки по величине, а для одинаково ориентированных тел



Фиг. 1. При $A_+ \sim 10^4$:

1 — сфера, диаметр $d = 2.20 \text{ см}$; 2 — вытянутый эллипсоид вращения, полуоси $a = b = 1.00 \text{ см}$, $c = 1.43 \text{ см}$, $c \parallel B$ и $\perp j_+$; 3 — цилиндр, диаметр основания $d = 1.50 \text{ см}$, высота $h = 6.05 \text{ см}$; $h \parallel B$ и $\perp j_+$; 4 — конус, обращенный вершиной вверх, диаметр основания $d = 3.05 \text{ см}$, высота $h = 2.50 \text{ см}$; 5 — правильная четырехугольная пирамида, обращенная вершиной вниз, сторона основания $a = 2.70 \text{ см}$, высота $h = 2.50 \text{ см}$; 6 — куб, ребро $a = 1.82 \text{ см}$.

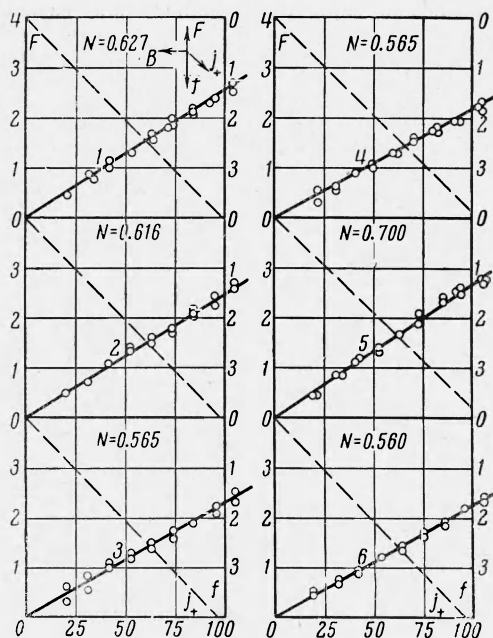
сходной формы (эллипсоид вращения и цилиндр, пирамида и конус) одинакового объема почти совпадают.

Приведенные значения безразмерной силы N определены при условии $A \sim 10^4$. Зависимость $N = f(A_+)$ является автомодельной в более широком диапазоне значений безразмерного параметра A_+ (исследовался диапазон $A_+ \sim 10^2 \div 10^5$). При этом

$$A_+ = \delta j_+ BV / \rho v^2 \quad (V - \text{объем тела})$$

Анализируя результаты (фиг. 1, 2), можно выделить три группы тел, отличающиеся значениями безразмерной силы N . От среднего значения $N = 0.622$ две другие группы отклоняются в разные стороны на примерно равную величину

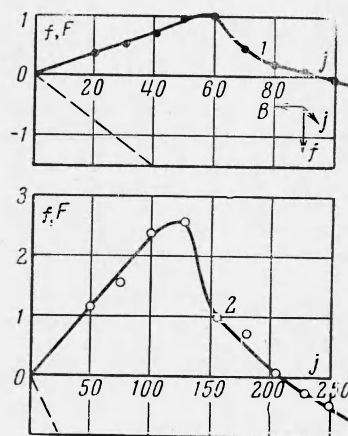
на примерно равную величину $0.06 \div 0.08$. Следовательно, среднюю величину $N = 0.622$ с достаточной точностью можно полагать равной полусумме максимального и минимального значений безразмерной выталкивающей силы.



Фиг. 2

Фиг. 2. При $A_+ \sim 10^4$:

1 — вытянутый эллипсоид вращения, $c \perp B$ и $\perp j$; 2 — цилиндр, диаметр основания $d = 1.75$ см, высота $h = 2.50$ см, $h \perp B$ и $\perp j$; 3 — тот же цилиндр, $h \parallel B$ и $\perp j$; 4 — тот же цилиндр, $h \perp B$ и $\parallel j$; 5 — конус, обращенный вершиной вниз; 6 — правильная четырехугольная пирамида, обращенная вершиной вверх



Фиг. 3

Фиг. 3. Зависимости $F = F(j)$ и $f = f(j)$:

1 — в диапазоне изменений j от 0 до 100 a/m^2 ; 2 — в диапазоне изменений j от 0 до 250 a/m^2

Учитывая, что процесс сепарации минералов происходит в условиях развитой турбулентности потока в рабочей зоне сепаратора, можно предполагать, что средним статистическим вариантом величины выталкивающей силы будет величина N , определенная для тел, отношение размеров которых по трем осям близко к единице. Очевидно, что сепарация таких тел будет происходить лишь по удельным весам, а константой, зависящей от формы тела, в исследованных случаях можно считать $N = 0.622$.

Эти выводы должны быть проверены при сепарации массы зерен, так как величина испытываемой зернами электромагнитной выталкивающей силы зависит от их концентрации.

Заметим, что изменение параметра A_+ осуществлялось за счет добавок глицерина в раствор медного купороса, что увеличивало его кинематическую вязкость.

4. Влияние проводимости тела. В случае, когда проводимость тела σ_0 больше проводимости жидкости σ , плотность тока внутри тела выше, чем в окружающей жидкости, и проводящее тело испытывает электромагнитную силу противоположного знака по отношению к силе, действующей на непроводящее тело. В работе [3] даются

значения электромагнитных сил при $A \ll i$: для проводящей сферы $F = -\frac{3}{2}jBV$, для непроводящей сферы $F = \frac{3}{4}jBV$.

На фиг. 3 приведены графики зависимостей $F = F(j)$ и $f = f(j)$ для полированной латунной сферы диаметром 2.25 см. В качестве проводящей жидкости использовался насыщенный раствор медного купороса в воде. Сила F определялась по формуле (3.1), а сила

$$f = kjB \quad (j = i/S) \quad (4.1)$$

Из графика фиг. 3 (кривая 1) видно, что при значениях плотности тока $j < 100$ а/м² электромагнитная выталкивающая сила F имеет то же направление, что и в случае непроводящих ($\sigma_0 = 0$) или слабо проводящих тел ($\sigma_0 \ll \sigma$). Точка пересечения кривой $F = F(j)$ с осью абсцисс при значении $j \sim 95$ а/м² соответствует моменту, когда плотности тока внутри тела и в окружающей жидкости равны между собой и тело не испытывает электромагнитной выталкивающей силы ($F = 0$, так как $\sigma_0 = \sigma$). При $j > 100$ а/м² σ_0 становится больше σ и сила F меняет свое направление.

На фиг. 3 (кривая 2) приведены результаты аналогичных измерений в диапазоне j от 0 до 250 а/м². Изменение направления силы соответствует значению $j \sim 210$ а/м².

Такое нестабильное поведение проводящей сферы указывает на известную сложность сепарации проводящих материалов.

Поступила 2 IX 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. Micheletti T. Un nuovo metodo megneto-elettrico di preparazione dei minerali. *Industria Mineraria*, 1959, 10, No. 8.
2. Андрес У. Ц., Зарубин Л. С., Полак Л. С., Тодес О. М., Юровский А. З. Магнитогидродинамическая сепарация углей и других полезных ископаемых. *Уголь*, 1963, № 7.
3. Leenov D., Kolín A. Theory of Electromagnetorhoresis. I. Magnetohydrodynamic Forces Experienced by Spherical and Symmetrically Oriented Cylindrical Particles. *J. Chem. Phys.*, 1954, 22, 683.
4. Андрес У. Ц., Полак Л. С., Сыроватский С. И. Электромагнитное выталкивание сферического тела из проводящей жидкости. *Ж. техн. физ.*, 1963, т. XXXIII, вып. 3.
5. Kolín A. An Electromagnetokinetic Phenomen Involving Migration of Neutral Particles. *Science*, 1953, vol. 117, 134.
6. Андрес У. Ц. Измерение выталкивающей электромагнитной силы в проводящей жидкости. *Измерительная техника*, 1963, № 5.

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В ПОТОКЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ ПРИ МАЛЫХ ЗНАЧЕНИЯХ МАГНИТНОГО ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА

И. И. Новиков, Л. Д. Пичахи

(Новосибирск)

Процессы теплопередачи в электропроводящей жидкости, движущейся в магнитном поле, оказываются значительно более сложными по сравнению с теплопередачей в обычном потоке жидкости. Это усложнение связано с тем, что в движущейся в магнитном поле электропроводящей жидкости возникают индукционные токи, приводящие к выделению джоулева тепла. Соответственно этому распределение скоростей и температур в жидкости, а следовательно, и поток тепла, будут иными, чем в отсутствие магнитного поля.

Задача о теплообмене между твердым телом и обтекающим его потоком жидкости сводится в конечном счете к определению распределения температур в жидкости вблизи поверхности твердого тела. Действительно, если распределение температуры в этой области известно, то количество тепла (а также и коэффициент теплопередачи) нетрудно определить путем вычисления плотности потока тепла

$$q = -\lambda (\partial T / \partial n)$$

на границе раздела жидкость — твердое тело (λ — коэффициент теплопроводности).