

Магнитное поле электромагнитных сепараторов М. В. N. 6 (с кольцевыми магнитами) и М. Д. 4 (с реверсивными магнитными полюсами) и теория расчета электромагнитных систем сепараторов этих типов

Преп. А. Я. Сочнев

Le champ magnétique des séparateurs M. B. N. 6 (à magnets annulaires) et M. D. 4 (à magnets reversifs) et la théorie du calcul des systèmes électromagnétiques des séparateurs de ces types

A. J. Sotchneff

„В настоящее время совсем не считается искусством строить технически безупречные машины, но и теперь, как и раньше, большое искусство заключается в том, чтобы строить их по возможности дешевле“.

Проф. Милан Видмар

„Научные основы электротехники“, гл. XII.

До настоящего времени ни в русской ни даже в заграничной литературе не имеется изложения теории расчета электромагнитных систем магнитных сепараторов, без которой, разумеется, немисливо создание экономических аппаратов для электромагнитного обогащения полезных ископаемых.

В настоящей статье сделана первая попытка создания такой теории.

Базой для построения теории служит экспериментальный материал по изучению магнитных полей сепараторов, полученный в 1932 г. в Магнитной лаборатории Института «Механобр» автором совместно с А. Н. Барановым и И. О. Максимовым.

I. Общий принцип построения теории расчета электромагнитных систем сепараторов.

Магнитное поле в рабочем пространстве любого сепаратора должно удовлетворять следующим основным требованиям:

а) Магнитная сила, действующая в рабочем пространстве на зерно магнитного материала, должна быть по возможности одинакова на любом возможном пути следования зерна через рабочее пространство (условие равномерности).

б) Магнитная сила в рабочем пространстве сепаратора должна быть достаточно велика, чтобы произвести разделение минералов и направить магнитный минерал в приемник концентрата (условие достаточной интенсивности).

в) Это достаточно большое значение магнитной силы должно достигаться при минимальной затрате числа ампервитков в обмотке электромагнита сепаратора (условие максимальной экономичности).

Этими общими требованиями, предъявляемыми к электромагнитному сепаратору, определяется порядок построения теории расчета его электромагнитной системы.

Величина магнитной силы в рабочем пространстве сепаратора в общем случае является функцией точки (т. е. текущих координат x, y, z) в этом пространстве, различных параметров $a, b, c, \dots$ ¹⁾, которыми определяется характер магнитного поля сепаратора в рабочем пространстве, и числа ампервитков A , которым, вместе с факторами $a, b, c, \dots$, определяется интенсивность этого поля.

Выбором надлежащих соотношений между параметрами $a, b, c, \dots$ может быть удовлетворено первое требование, предъявляемое к сепаратору — требование однородности магнитной силы в рабочем пространстве сепаратора. После выбора этих соотношений число независимых параметров уменьшается.

Оставшиеся независимые параметры определяются из условия максимума величины магнитной силы при постоянном числе ампервитков в обмотке электромагнита сепаратора.

После этого из условия необходимости достаточно большой величины магнитной силы (эта величина определяется в каждом отдельном случае совокупностью прочих сил, действующих в рабочем пространстве на зерна обрабатываемого материала, и скоростью прохождения последнего через рабочее пространство) определяется необходимое число ампервитков в обмотке электромагнита сепаратора и далее производится расчет обмотки.

Таков должен быть общий порядок построения теории расчета электромагнитных систем сепараторов. Построение теории расчета какого-нибудь сепаратора требует таким образом знания магнитной силы во всем рабочем пространстве сепаратора, как функции параметров, определяющих характер магнитного поля сепаратора и числа ампервитков в обмотке его электромагнита.

Теоретическое изучение магнитной силы в зависимости от этих факторов не представляется возможным. Поэтому построение теории расчета электромагнитных систем сепараторов требует предварительного экспериментального изучения магнитного поля в зависимости от формы и взаимного расположения полюсных наконечников, которыми определяются характер и интенсивность магнитного поля²⁾.

Непосредственное изучение магнитной силы по экспериментальным соображениям не представляется удобным.

Однако как величина, так и направление магнитной силы определяются напряженностью магнитного поля и скоростью изменения этой напряженности в пространстве. Поэтому анализ магнитной силы может быть сделан на основе данных экспериментального изучения напряженности магнитного поля.

В следующей главе изложены общие сведения, необходимые при выполнении такого анализа и при построении теории расчета сепараторов.

II. Теоретические предпосылки

1. О силе, действующей в магнитном поле на зерно магнитного вещества.

Сила, действующая в магнитном поле на зерно магнитного вещества, отнесенная к единице массы зерна, при условии достаточной малости зерна, чтобы в объеме, им занимаемом, изменение напряженности поля было незначительным, равняется

$$F = \frac{1}{2} \chi' \text{ grad } H^2, \quad 3) \quad (1)$$

¹⁾ Этими параметрами могут быть например расстояние между полюсными наконечниками, угол среза полюсных наконечников и пр.

²⁾ Отсутствием данных такого изучения магнитного поля и объясняется повидимому отсутствие до последнего времени теории расчета электромагнитных сепараторов.

³⁾ $\text{grad } H^2$ (читается: градиент H^2) — векторная производная функции H^2 . Она представляет собой вектор, составляющие которого по координатным осям равняются: $\frac{\partial H^2}{\partial x}$, $\frac{\partial H^2}{\partial y}$ и $\frac{\partial H^2}{\partial z}$.

где H — напряженность магнитного поля в центре зерна и κ' — так называемая кажущаяся удельная магнитная восприимчивость зерна.

Составляющая силы F по какому-нибудь направлению ξ равняется следовательно

$$F_{\xi} = \frac{1}{2} \kappa' \frac{dH^2}{d\xi} = \kappa' H \frac{dH}{d\xi} \quad (2)$$

и является пропорциональной таким образом, во-первых, напряженности магнитного поля H и, во-вторых, скорости изменения напряженности H в рассматриваемом направлении.

Кажущаяся удельная магнитная восприимчивость κ' зависит от истинной удельной магнитной восприимчивости κ вещества зерна и от формы зерна таким образом, что

$$\kappa' = \frac{\kappa}{1 + \varphi \delta \kappa}, \quad (3)$$

где

δ — плотность (удельный вес) вещества зерна,

φ — так называемый фактор размагничивания зерна, зависящий от его формы ¹⁾.

Из (3) следует, что с достаточной степенью точности,

$$\kappa' = \kappa \quad (4)$$

при достаточно малых значениях κ и

$$\kappa' = \frac{1}{\varphi \delta} \quad (5)$$

при достаточно больших значениях κ .

В случае шаровой формы зерна $\varphi = \frac{4\pi}{3}$ и следовательно:

$$\kappa' = \frac{3\kappa}{3 + 4\pi\delta\kappa}, \quad (6)$$

а для достаточно-больших κ

$$\kappa' = \frac{3}{4\pi\delta}. \quad (7)$$

Из (5) и (7) можно видеть, что в области больших значений κ величина κ' , а следовательно и силы, действующей на магнитное зерно, практически не зависит от κ .

Сказанное иллюстрируется кривой (рис. 1), представляющей графическое изображение зависимости κ' (для случая шарового зерна при $\delta=5$. Как видно из этой кривой, уже при $\kappa=1$ величина κ' отличается от предельного значения, определяемого формулой (7), не более чем на 5%.²⁾

¹⁾ Кажущаяся объемная магнитная восприимчивость κ' представляет коэффициент пропорциональности между величиной намагничения I вещества зерна и напряженностью H внешнего поля, в котором помещено зерно. Истинная объемная магнитная восприимчивость κ представляет коэффициент пропорциональности между величиной I и напряженностью H_i внутреннего магнитного поля в зерне.

Внутреннее магнитное поле H_i складывается из внешнего магнитного поля H и обратно направленного собственного магнитного поля намагниченного зерна H_r . При этом $H_r = \psi I$, что, вместе с равенствами $I = \kappa' H$, $I = \kappa H_i$ и $H_i = H - H_r$, дает $\kappa' = \frac{\kappa}{1 + \varphi \delta \kappa}$ или, переходя к удельным восприимчивостям,

$$\kappa' = \frac{\kappa}{1 + \varphi \delta \kappa}$$

²⁾ Этим объясняется невозможность отделения электромагнитным способом зерен сильно-магнитных веществ (например железа и магнетита) друг от друга.

2. 0 графическом изображении магнитного поля

Обычный способ графического изображения магнитного поля заключается в вычерчивании силовых линий с густотой, пропорциональной в каждой точке поля напряженности поля в этой точке ¹⁾).

Этот способ графического изображения магнитного поля не представляет большого интереса при изучении магнитных полей электромагнитных сепараторов, так как картина силовых линий магнитного поля, позволяя легко проследить характер изменения величины и направления напряженности поля в пространстве, не дает наглядного представления о характере изменения величины и направления магнитной силы, действующей в магнитном поле на зерна магнитного материала, которая, как было выяснено выше, зависит не только от напряженности поля, но также от скорости изменения напряженности в пространстве.

Поэтому для графического изображения магнитного поля автором был принят другой способ, заключающийся в вычерчивании кривых равной напряженности магнитного поля с постоянным интервалом между значениями квадрата напряженности в смежных кривых.

При таком способе изображения магнитного поля направление магнитной силы в какой-либо точке поля перпендикулярно к направлению линии равной напряженности в этой точке ²⁾, а величина силы пропорциональна густоте линий равной напряженности вблизи этой точки ³⁾.

Картина линий равной напряженности, вычерчиваемая таким образом, получившая в обиходе работы магнитной лаборатории название топографии магнитного поля, позволяет следовательно легко проследить характер изменения величины и направления магнитной силы, действующей в магнитном поле на зерна магнитного материала.

3. 0 зависимости между напряженностью магнитного поля электромагнита и числом ампервитков его обмотки

Обычная формула электротехники для расчета магнитных цепей, представляющая выражение частного случая закона Ома для магнитного потока,

$$\Phi = \frac{M}{R_m} = \frac{0,4\pi A}{R_m} \quad (8)$$

где

Φ —магнитный поток в максвеллах, циркулирующий в цепи,

M —магнитодвижущая сила электромагнита,

A —число ампервитков обмотки,

R_m —магнитное сопротивление цепи, равное сумме магнитных сопротивлений железной части цепи и воздушного зазора между магнитными полюсами, не может

¹⁾ Картина силовых линий магнитного поля, так называемый магнитный спектр поля, может быть получена непосредственно путем внесения в магнитное поле картона с рассеянным по нему тонким слоем магнитного порошка. Как известно, при встряхивании картона зерна магнитного порошка образуют цепочки, направление которых совпадает с направлением силовых линий.

²⁾ Это следует из того, что производная от H по направлению линии равной напряженности, а следовательно и величина составляющей магнитной силы по этому направлению, равняется нулю.

³⁾ Это следует из того, что величину магнитной силы можно, согласно (2), считать приближенно равной отношению постоянного по условию приращения H^2 при переходе между смежными линиями равной напряженности к расстоянию между этими линиями.

применяться при расчете электромагнитов магнитных сепараторов, так как в этих последних величина воздушного промежутка между полюсами значительна (и кроме того неодинакова по сечению цепи), вследствие чего имеет место значительное расхождение силовых линий, лишаящее определенности самое понятие магнитной цепи.

Поэтому при расчете электромагнитных сепараторов необходимо исходить из общего выражения закона Ома для магнитного потока

$$\varphi = \frac{M}{\int \frac{dl}{\mu \delta S}}, \quad (9)$$

где

φ — магнитный поток отдельной элементарной силовой трубки,

δS — площадь сечения силовой трубки, являющаяся функцией расстояния по длине трубки l ,

μ — магнитная проницаемость среды, носителя магнитного потока, в общем случае являющаяся также функцией l ,

причем интеграл в знаменателе берется по всему контуру силовой трубки.

В случае, когда величина воздушного межполюсного промежутка значительна, что имеет место в электромагнитных сепараторах для сильно-магнитных руд, магнитное сопротивление железного участка магнитной цепи очень мало в сравнении с магнитным сопротивлением воздушного промежутка; поэтому без большой погрешности (порядок величины которой может быть в каждом отдельном случае легко определен) можно пренебрегать первым, рассматривая лишь второе.

Для этого случая формула (9) принимает вид

$$\varphi = \frac{M}{L \int_0^L \frac{dl}{\delta S}} \quad (10)$$

причем интеграл в знаменателе берется лишь по длине L силовой трубки в межполюсном воздушном пространстве.

Напряженность магнитного поля в каком-либо сечении δS_1 элементарной силовой трубки равняется

$$H = \frac{\varphi}{\delta S} = \frac{M}{\delta S \int_0^L \frac{dl}{\delta S}} \quad (11)$$

В частном случае, когда площадь сечения δS силовой трубки одинакова по всей длине трубки, что имеет место очевидно в однородном магнитном поле, из (11) вытекает, что

$$H = \frac{M}{L} \quad (12)$$

где L , как уже упоминалось, длина силовой трубки в межполюсном воздушном промежутке.

В общем случае, когда δS меняется по длине трубки, согласно теореме интегрального исчисления о среднем:

$$\int_0^L \frac{dl}{\delta S} = \frac{1}{\delta S^*} \int_0^L dl = \frac{L}{\delta S^*} \quad (13)$$

где δS^* — площадь некоторого среднего сечения силовой трубки.

Из (11) и (13) следует, что в общем случае напряженность магнитного поля в каком-либо сечении силовой трубки равняется

$$H = \frac{M}{L} \cdot \frac{\partial S^*}{\partial S_1} \quad (14)$$

Полагая в (14) $\partial S_1 = \partial S^*$, получим (12). Следовательно выражение (12) в общем случае дает величину напряженности магнитного поля для некоторого сечения трубки, промежуточного между сечениями максимальной и минимальной площади.

III. Магнитное поле сепаратора типа М. В. Н. 6

1. Экспериментальные данные изучения магнитного поля сепаратора М. В. Н. 6

Сепаратор типа М. В. Н. 6 относится к разряду шкивных сепараторов.¹⁾

Рис. 2 представляет схематический чертеж магнитного барабана сепаратора в разрезе по осевой плоскости, с указанием полярности образующихся между обмотками кольцевых магнитных полюсов.

Магнитное поле этого барабана обладает очевидно аксиальной (осевой) симметрией с осью симметрии, совпадающей с осью барабана. Поэтому изучение поля в в какой-либо одной осевой плоскости дает полную характеристику поля барабана.

В магнитной лаборатории ин-та Механобр было изучено магнитное поле магнитного барабана, у которого радиус $R=175$ мм, толщина железных дисков, образующих магнитные полюсы, $b=30$ мм, ширина пазов (для обмотки) между дисками $a=60$ мм, число пазов (секций обмотки) $N=3$ и число витков в обмотке каждого паза $n=1400$.

В табл. 1 приведены данные экспериментального изучения магнитного поля барабана в осевой плоскости, причем через H_2 обозначена составляющая напряженности магнитного поля H по направлению радиуса барабана, через H_1 — составляющая H в направлении образующей барабана,²⁾ через h и l — расстояния точки, в которой измеряется H , соответственно от поверхности барабана и от центральной плоскости AA' (см. рис. 2) барабана.³⁾ Все измерения напряженности магнитного поля производились при силе тока в обмотке сепаратора $I=3,5$ ампер.⁴⁾

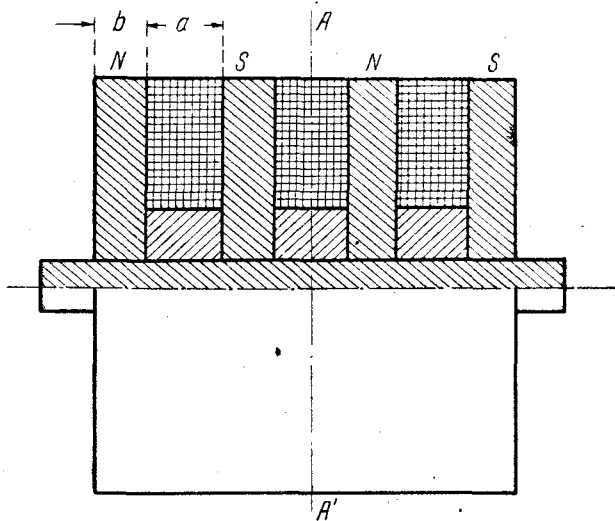


Рис. 2. Схематический чертеж барабана сепаратора М. В. Н. с разрезом по осевой плоскости.

¹⁾ Фотографию и описание сепаратора см. в журнале „Горнообогатительное дело“, № 6, 1932 г.

²⁾ Третья составляющая напряженности магнитного поля, в направлении направляющей барабана, равняется очевидно нулю.

³⁾ Так как магнитное поле барабана очевидно симметрично относительно центральной плоскости AA' (см. рис. 2) барабана, изучена только одна половина магнитного поля.

⁴⁾ Измерение напряженности магнитного поля производилось индукционным методом с баллистическим гальванометром Siemens u. Halske и зондовыми катушками, монтированными и градуированными в магнитной лаборатории ин-та Механобр. Точность этих измерений около 20 гаусс.

Таблица 1

Данные экспериментального изучения магнитного поля магнитного барабана сепаратора
М. В. X. 6

h см	l см	H_1 гаусс	H_2 гаусс	H гаусс	h см	l см	H_1 гаусс	H_2 гаусс	H гаусс
0,5	0	795	0	795	0,5	9	790	50	800
1,5	0	575	0	575	1,5	9	565	0	565
2,5	0	410	0	410	2,5	9	435	0	435
3,5	0	255	0	255	3,5	9	320	20	320
4,5	0	190	0	190	4,5	9	235	0	235
5,5	0	135	0	135	5,5	9	185	0	185
0,5	1	795	210	825	0,5	10	820	165	840
1,5	1	550	230	600	1,5	10	555	210	600
2,5	1	425	200	475	2,5	10	415	145	445
3,5	1	255	100	280	3,5	10	320	65	330
4,5	1	165	80	185	4,5	10	230	65	240
5,5	1	115	60	135	5,5	10	180	45	190
0,5	2	770	525	935	0,5	11	740	420	855
1,5	2	485	425	640	1,5	11	510	320	605
2,5	2	320	300	445	2,5	11	365	235	435
3,5	2	220	180	275	3,5	11	295	165	340
4,5	2	130	135	190	4,5	11	155	115	195
5,5	2	95	100	140	5,5	11	175	85	195
0,5	3	540	935	1090	0,5	12	400	770	905
1,5	3	350	540	650	1,5	12	380	485	620
2,5	3	210	415	470	2,5	12	260	305	405
3,5	3	205	265	335	3,5	12	235	230	330
4,5	3	75	180	200	4,5	12	50	145	155
5,5	3	30	100	110	5,5	12	140	110	180
0,5	4	130	1050	1070	0,5	13	130	730	750
1,5	4	115	680	700	1,5	13	230	495	55
2,5	4	65	480	490	2,5	13	185	360	405
3,5	4	50	310	320	3,5	13	165	250	300
4,5	4	0	220	220	4,5	13	140	140	200
5,5	4	0	135	135	0,5	14	90	650	660
0,5	5	130	1075	1100	1,5	14	105	450	470
1,5	5	90	665	680	2,5	14	90	345	360
2,5	5	75	475	485	3,5	14	95	245	265
3,5	5	65	320	335	4,5	14	90	190	210
4,5	5	65	190	200	5,5	14	85	145	165
5,5	5	65	50	165	0,5	15	180	715	745
0,5	6	585	920	1100	1,5	15	0	385	385
1,5	6	505	390	690	2,5	15	25	305	310
2,5	6	345	300	485	3,5	15	40	235	240
3,5	6	260	185	340	4,5	15	70	200	215
4,5	6	190	180	210	5,5	15	70	155	170
5,5	6	135	95	160	0,5	16	190	350	400
0,5	7	740	565	940	1,5	16	70	305	315
1,4	7	505	390	640	2,5	16	0	270	170
2,5	7	345	300	465	3,5	16	0	220	220
3,5	7	260	185	320	4,5	16	30	65	75
4,5	7	190	180	265	5,5	16	45	180	170
5,5	7	135	95	165	0,5	17	155	255	300
0,5	8	780	255	825	1,5	17	65	250	260
1,5	8	530	200	570	2,5	17	45	220	230
2,5	8	410	140	435	3,5	17	15	180	180
3,5	8	310	115	330	4,5	17	0	180	180
4,5	8	230	75	245	5,5	17	30	140	145
5,5	8	160	50	170					

На основании этих данных построена топография (см. выше) магнитного поля, изображенная на рис. 3. Вследствие аксиальной симметрии магнитного поля барабана направление магнитной силы, действующей на магнитное зерно в этом поле, лежит в осевой плоскости.¹⁾

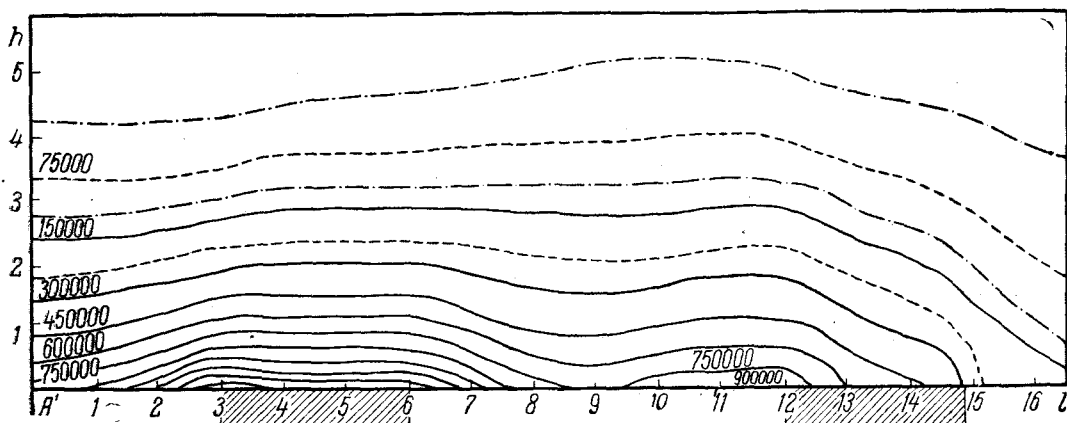


Рис. 3. Топография магнитного поля.

Направление линий топографии, будучи перпендикулярным в каждой точке к направлению магнитной силы, определяет направление этой силы, а густота линий топографии — ее величину (рис. 3).

2. Анализ экспериментальных данных

Непосредственное рассмотрение топографии магнитного поля барабана позволяет сделать следующие заключения:

а) Направление магнитной силы во всей области магнитного поля почти перпендикулярно к поверхности барабана.

б) Величина магнитной силы довольно быстро убывает с удалением от поверхности барабана.

в) Величина магнитной силы, при заданном расстоянии от поверхности барабана, несколько изменяется при движении в направлении образующей барабана: над средними полюсами она несколько больше, чем над крайними полюсами и между полюсами.

г) Отношение максимального значения величины магнитной силы к минимальному, при заданном расстоянии от поверхности барабана, уменьшается с удалением от поверхности барабана, будучи равным (если отвлечься от крайних значений) приблизительно 3 у поверхности барабана и $1\frac{1}{2}$ уже на расстоянии 1,5 см от поверхности.

Количественный анализ величины магнитной силы может быть сделан на основе анализа напряженности магнитного поля.

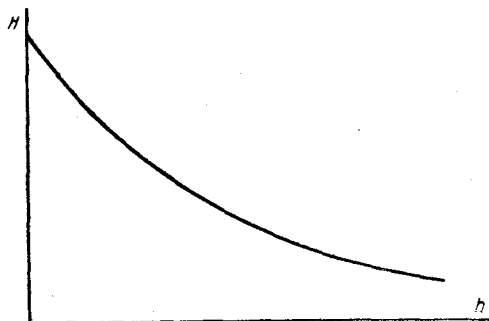


Рис. 4. График зависимости H от h .

¹⁾ Это следует из того, что составляющая магнитной силы в направлении перпендикулярном к осевой плоскости пропорциональна производной от напряженности магнитного поля по этому направлению, а эта производная, вследствие аксиальной симметрии магнитного поля барабана, равняется нулю.

Графическое изображение зависимости напряженности H магнитного поля от расстояния h от поверхности барабана имеет в обычной координатной плоскости вид кривой, изображенной на рис. 4.

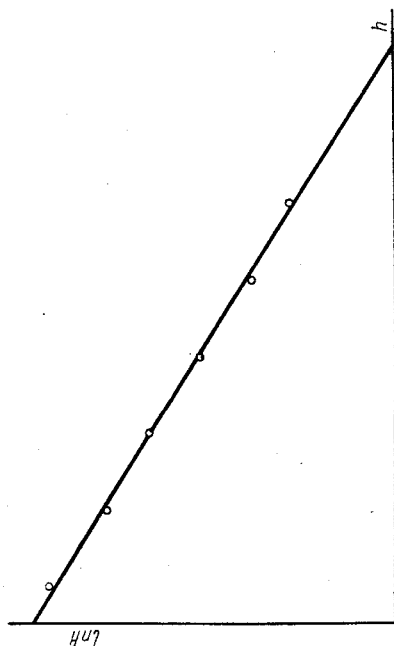


Рис. 6. График зависимости $\ln H$ от h , при $l=4$

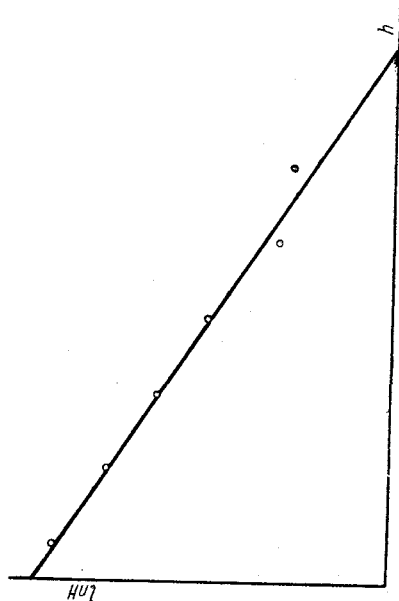


Рис. 8. График зависимости $\ln H$ от h , при $l=13$

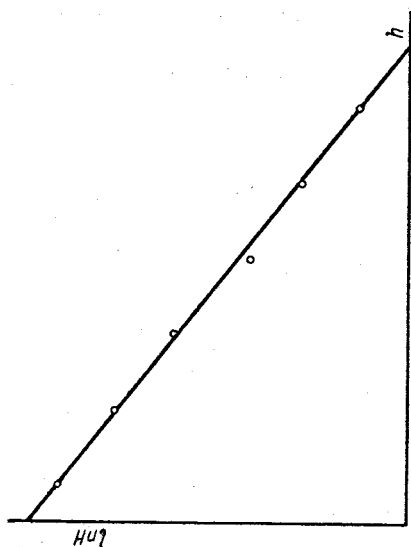


Рис. 5. График зависимости $\ln H$ от h , при $l=0$

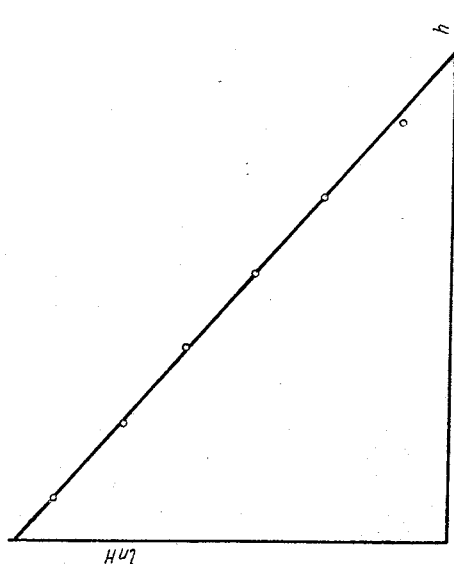


Рис. 7. График зависимости $\ln H$ от h , при $l=9$.

Это позволяет предположить логарифмический характер зависимости H от h т. е. положить:

$$H = H_0 e^{-\alpha h}, \quad (15)$$

где

H_0 — напряженность магнитного поля на поверхности барабана,
 α — постоянная, зависящая, как и H_0 , от l .

Если (15) имеет место, то должно быть:

$$\ln H = \ln H_0 - \alpha h, \quad (16)$$

т. е. должна выполняться прямолинейная зависимость между $\ln H$ и h .

Прямолинейный характер зависимости $\ln H$ от h действительно, с достаточной степенью точности, имеет место при всех значениях l . Для иллюстрации на рис. 5 — 8 изображены выбранные наугад графики зависимости $\ln H$ от h для значений l , равных 0, 4, 9 и 13. Следовательно (15) действительно имеет место.

Величины H_0 и α могут быть определены по графикам зависимости $\ln H$ от h ; H_0 — как начальная ордината прямой $\ln H = \ln H_0 - \alpha h$; α — как тангенс угла наклона этой прямой, взятый с обратным знаком и умноженный на отношение масштабов h и $\ln H$.

В табл. 2 приведены определенные таким образом величины H_0 и α для различных значений l .

Таблица 2

Значение параметров H_0 и α формулы (15) для различных значений l

l см	H_0 гаусс	α	l см	H_0 гаусс	α
0	950	0,354	9	895	0,290
1	1 020	0,376	10	970	0,313
2	1 150	0,406	11	935	0,297
3	1 320	0,435	12	1 000	0,317
4	1 290	0,396	13	845	0,303
5	1 290	0,396	14	740	0,285
6	1 280	0,392	15	565	0,242
7	1 100	0,344	16	430	0,193
8	950	0,312			

Из (15) следует, что:

$$\frac{dH}{dh} = -\alpha H_0 e^{-\alpha h} = -\alpha H. \quad (17)$$

Составляющая магнитной силы F по направлению, перпендикулярному к поверхности барабана, согласно (2) равняется ¹⁾

$$F_h = x' H \frac{dH}{dh}, \quad (18)$$

что, вместе с (15) и (17), дает

$$F_h = x' \alpha H^2 = x' \alpha H_0^2 e^{-2\alpha h} \quad (19)$$

Формула (19), вместе с данными табл. 2, позволяет в каждом случае, когда известна кажущаяся удельная магнитная восприимчивость зерна x' , определить величину составляющей магнитной силы F_h в любой точке магнитного поля барабана.

В табл. 3 приведены относительные значения F_h , вычисленные в предположении $x' = 0,01$. Чтобы определить абсолютные значения F_h , необходимо следовательно в каждом отдельном случае приведенные в таблице значения умножать на x' зерна и на 100.

Рассмотрение данных табл. 3 подтверждает и уточняет выводы, сделанные на основании непосредственного рассмотрения топографии магнитного поля барабана.

¹⁾ Необходимо помнить, что в этой формуле, как и во всех следующих рассуждениях, величина магнитной силы F_h отнесена к единице массы зерна. Чтобы перейти к полной силе, действующей на какое-нибудь зерно, необходимо следовательно умножать F_h на массу этого зерна.

Таблица 3

Относительные значения составляющей магнитной силы F_h в различных точках магнитного поля

$l \backslash h$	0	1	2	3	4	5
0	3 180	1 560	770	380	210	90
1	3 950	1 860	880	420	190	90
2	5 390	2 400	1 070	470	210	90
3	9 300	3 910	1 630	670	280	120
4	6 630	3 010	1 410	610	270	80
5	6 630	3 010	1 410	610	270	80
6	4 780	2 180	990	460	210	90
7	4 180	2 130	1 080	540	270	140
8	2 800	1 430	740	380	190	100
9	2 330	1 310	740	420	230	130
10	2 960	1 590	920	470	240	130
11	2 590	1 440	800	440	240	140
12	3 150	1 690	900	480	250	140
13	2 180	1 200	650	360	200	110
14	1 560	1 120	500	300	160	90
15	770	480	370	100	110	70
16	350	240	160	110	80	50

IV. Теория расчета электромагнитной системы сепараторов типа М. В. N. 6 (с кольцевыми магнитами)

1. Общие замечания

Данные изучения магнитного поля одного сепаратора типа М. В. N. 6 в магнитной лаборатории ин-та Механобр, изложенные в предыдущей главе, оказываются достаточными для построения, с достаточным приближением, теории расчета электромагнитной системы сепараторов рассматриваемого типа.

Характер и интенсивность магнитного поля магнитного барабана сепаратора М. В. N. 6 определяется очевидно следующими параметрами: радиусом R барабана, толщиной b железных дисков, образующих магнитные полюсы, и расстоянием a между этими дисками (см. рис. 2)¹⁾.

Так как высота области практического распространения магнитного потока мала в сравнении с радиусом барабана, можно, не делая большой погрешности, пренебречь зависимостью магнитного поля от радиуса барабана и считать, что магнитное поле вполне определяется параметрами a и b и числом ампервитков в обмотке барабана.

2. Выбор соотношения между параметрами a и b

Согласно первому из основных требований, предъявляемых к магнитному полю каждого электромагнитного сепаратора и указанных в начале настоящей статьи — требованию однородности магнитной силы в рабочем пространстве сепаратора, — при конструировании сепараторов рассматриваемого типа необходимо установить такое соотношение между параметрами a и b , чтобы величина магнитной силы была по возможности одинакова во всех точках магнитного поля барабана, равно удаленных от поверхности барабана, т. е. чтобы она возможно менее зависела от расстояния l по направлению образующей барабана.

Характер зависимости величины магнитной силы от l определяется, очевидно, величиной отношения a к b .

¹⁾ При применении полюсных наконечников (в виде железных колец) за параметр b следует принимать ширину полюсных наконечников, а за параметр a — расстояние между ними. Вопрос о выборе в этом случае оптимальной толщины железных дисков будет рассмотрен особо, в связи с вопросом расчета обмотки.

Как следует из непосредственного рассмотрения топографии магнитного поля (рис. 3) сепаратора М. В. N. 6, изученного в Магнитной лаборатории, и из анализа цифр табл. 3, при отношении $a : b = 2$, имеющем место в этом сепараторе, требование возможно меньшей зависимости величины магнитной силы от расстояния по образующей барабана достаточно хорошо выполняется.

Поэтому это отношение

$$a : b = 2 \quad (*)$$

может быть положено в основу построения теории расчета. (Очевидно, что требование независимости величины магнитной силы от l удовлетворялось бы еще лучше, если бы относительная толщина средних железных дисков была несколько больше величины, определяемой отношением (*), при неизменной относительной толщине крайних дисков.¹⁾)

Задача построения теории расчета электромагнитной системы сепараторов рассматриваемого типа сводится таким образом к выводу условий для определения наилучшего значения параметра a и для определения числа ампервитков обмотки барабана сепаратора, необходимых при выбранном значении a для создания заданной величины магнитной силы в рабочем пространстве сепаратора.

Для решения этой задачи необходимо прежде всего выразить зависимость величины магнитной силы от параметра a .

3. Выражение зависимости величины магнитной силы от параметра a

Так как при работе сепаратора рассматриваемого типа играет роль только нормальная к поверхности барабана составляющая магнитной силы, в дальнейшем изложении, говоря о величине магнитной силы, будем подразумевать величину ее нормальной составляющей. (Вследствие того, что направление магнитной силы во всей области магнитного поля при выбранном соотношении между a и b , как было показано выше, почти нормально к поверхности барабана, величина нормальной составляющей магнитной силы лишь незначительно отличается от величины магнитной силы).

Тогда согласно установленной в предыдущей главе формуле (19), величина магнитной силы в магнитном поле барабана с параметром $a = a_1 = 6$ см равняется

$$F = x' a_1 H_{01}^2 e^{-2\alpha_1 h} \quad (20)$$

(H_0 и α взяты с индексом 1, чтобы показать, что они относятся к магнитному полю барабана с параметром $a = a_1$), причем в табл. 2 были приведены значения H_{01} и α_1 для различных l .

Игнорируя зависимость F от l (см. стр. 199), можно считать H_{01} и α_1 постоянными.

При этом α_1 можно положить равным среднему из значений, приведенных в табл. 2, т. е., округляя, считать:

$$\alpha_1 = \frac{1}{3} \quad (21)$$

(О выборе значений H_{01} — ниже, в связи с вопросом о зависимости напряженности магнитного поля от числа ампервитков в обмотке барабана).

Из общего принципа подобия следует, что при сохранении постоянным отношения a к b выражение зависимости магнитной силы от h сохраняет свой вид, так что в общем случае

$$F = x' a H_0^2 e^{-2\alpha h}, \quad (22)$$

¹⁾ Хотя эту поправку для толщины средних дисков можно было бы подсчитать и учесть, автор в настоящей статье воздержался от этого: введение третьего параметра несколько усложнило бы построение теории расчета, что не представлялось автору желательным, так как он считал, что первая работа по построению новой теории должна представлять главным образом методологический интерес и потому быть по возможности более простой.

причем H_0 и α могут зависеть от параметра a и этой зависимостью определяется зависимость от a магнитной силы.

Ниже, при выводе зависимости H_0 от числа ампервитков в обмотке барабана, будет показано, что при заданной глубине обмотки, т. е. при постоянном числе ампервитков, приходящемся на единицу длины обмотки, H_0 не зависит от параметра a .

Что касается α , то из принципа подобия вытекает очевидно, что α обратно пропорционально параметру a ¹⁾.

Следовательно

$$\alpha = \frac{\alpha_1}{a} \alpha_1. \quad (23)$$

Из (22) и (23) следует, что

$$F = x' \frac{\alpha_1}{a} \alpha_1 H_0^2 e^{-2 \frac{\alpha_1}{a} \alpha_1 h}. \quad (24)$$

Подставляя в формулу (24) значения $\alpha_1 = 6$ и $\alpha_1 = 1/3$, получим окончательно:

$$F = 2 \frac{x'}{a} H_0^2 e^{-4 \frac{h}{a}}. \quad (25)$$

Такова зависимость величины магнитной силы от параметра a .

4. Вывод условия определения оптимального значения параметра a

Формула (1), а следовательно и вытекающая из нее формула (25), как было отмечено в главе II, строго справедливы лишь при условии достаточной малости зерна, на которое действует магнитная сила, чтобы в объеме, занимаемом зерном, величина напряженности магнитного поля менялась незначительно, причем коэффициент x' , входящий в эти формулы, зависит от формы зерна.

Между тем сепараторы рассматриваемого типа применяются лишь при обработке крупного материала; при этом форма зерен обрабатываемого материала — самая разнообразная.

Нетрудно видеть однако, что шаровая форма зерна является наименее выгодной в отношении притяжения зерна к барабану и величина магнитной силы, действующей на большое шаровое зерно, отнесенная к единице массы зерна, больше величины магнитной силы (также отнесенной к единице массы), действующей на достаточно малое зерно, помещенное в центре большого зерна.

Поэтому, ведя расчет из предположения шаровой формы зерен и пользуясь при расчете формулой (25), относим точку приложения магнитной силы, вычисленной по

¹⁾ Согласно принципу подобия, отношение значений напряженности поля в двух точках какого-либо магнитного поля равняется отношению значений напряженности в соответственных точках другого, подобного первому, поля.

Следовательно для двух полей, определяемых значениями параметра a , равными α_1 и α_2 , имеем

$$\frac{H_0' e^{-\alpha_1 h_1}}{H_0'} = \frac{H_0'' e^{-\alpha_2 h_2}}{H_0''},$$

откуда $\alpha_1 h_1 = \alpha_2 h_2$, где h_1 и h_2 — расстояния от поверхности барабана двух соответственных точек подобных полей.

Но очевидно, что

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2},$$

а следовательно

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}.$$

Обратная пропорциональность, имеющая место между величинами α и a , является очевидно следствием того, что размерность величины α обратна размерности величины a .

этой формуле, к центру зерна, на которое она действует, мы делаем ошибку в ту сторону, что обеспечиваем гарантию надежности расчета¹⁾.

После этих общих замечаний нетрудно вывести условие определения оптимального значения параметра a .

Пусть c — расстояние от поверхности барабана центра зерна, находящегося в наименее выгодных условиях в отношении притяжения к барабану (это расстояние определяется в каждом отдельном случае из заданной производительности сепаратора, от которой зависит толщина слоя материала на ленте, и из характера обрабатываемого материала).

Оптимальным значением параметра a очевидно является такое значение, при котором величина магнитной силы F' на расстоянии c от поверхности барабана достигает максимального значения.

Подставляя $h = c$ в формулу (25), будем иметь:

$$F' = 2 \frac{z'}{a} H_0^2 e^{-4 \frac{c}{a}}. \quad (26)$$

Из условия максимума функции $F' = f(a)$, беря производную от F' по a и приравнявая ее нулю, получим

$$a = 4c. \quad (**)$$

Таким образом определяется оптимальное значение параметра a .

Так как при конструировании сепараторов длина барабана обычно задается, величина a не может быть произвольной, если задано отношение a к b , так как она связана с длиной барабана L соотношением

$$Na + (N + 1)b = L, \quad (27)$$

где N — число секций (пазов) обмотки барабана — должно выражаться, очевидно, целым числом. Так как согласно (*) $a:b = 2$, из (27) вытекает:

$$a = \frac{2L}{3N + 1}. \quad (***)$$

Следовательно параметр a может принимать лишь дискретные значения, определяемые из условия (**), где N — любое целое число.

Определив в каждом отдельном случае из (**) оптимальное значение параметра a , необходимо следовательно из ряда возможных значений a , определяемых условием (***), выбрать значение, наиболее близкое к оптимальному, и положить его в основу дальнейшего расчета.

Так как однако даже небольшое отклонение от оптимального значения a значительно понижает экономичность сепаратора, требуя для создания достаточно большой величины магнитной силы в рабочем пространстве сепаратора значительно большего числа ампервитков в обмотке его, следует рекомендовать там, где это представляется возможным, не «подгонять» величину a к длине барабана, а наоборот, задавать длину барабана L из условия (**).

Чтобы завершить построение теории расчета, необходимо вывести условие для определения числа ампервитков в обмотке барабана. Но для этого необходимо установить зависимость между числом ампервитков и H_0 .

5. Вывод зависимости H_0 от числа ампервитков в обмотке барабана

В главе II было установлено, что, при условии достаточной малости магнитного сопротивления железной части магнитной цепи, напряженность магнитного поля в любой точке равняется

$$H = \frac{M}{L} \cdot \frac{\partial S^*}{\partial S_1}, \quad (14)$$

1) Опыты, проведенные автором в лаборатории магнитного обогащения Ленинградского горного ин-та показали к тому же, что эта ошибка — весьма незначительна. Сообщение об этих опытах подготавливается автором к печати.

где L — длина (в воздухе) элементарной силовой магнитной трубки, проходящей через рассматриваемую точку,

M — магнитодвижущая сила, равная числу ампервитков, сцепляющихся с этой трубкой, умноженному на $0,4 \pi$,

δS_1 — сечение силовой трубки в рассматриваемой точке,

δS^* — некоторое среднее сечение силовой трубки.

Нетрудно видеть, что в магнитном барабане рассматриваемого типа магнитное сопротивление железной части магнитной цепи очень мало в сравнении с магнитным сопротивлением воздушного межполюсного пространства. Поэтому с достаточной степенью точности имеет место (14).

Следовательно

$$H_0 = \frac{M}{L} \cdot \frac{\delta S^*}{\delta S_1}. \quad (28)$$

Но из общего принципа подобия следует, что при сохранении постоянным отношения a к b длина силовой трубки L пропорциональна параметру a , а отношение $\frac{\delta S^*}{\delta S_1}$ не зависит от a .

Следовательно

$$H_0 = \beta \frac{M}{a}, \quad (29)$$

где β — некоторая постоянная.

Так как $M = 0,4 \pi A$, где A — число ампервитков в одной секции (пазе) обмотки, то

$$H_0 = 0,4 \pi \beta \frac{A}{a} \quad (30)$$

или, обозначая отношение $\frac{A}{a}$, т. е. число ампервитков на единицу длины обмотки, через A_1 , а выражение $0,4 \pi \beta$ — через γ ,

$$H_0 = \gamma A_1 \quad (31)$$

где γ — некоторая постоянная¹⁾.

Из (31) следует между прочим отмеченное выше положение, что при заданном числе ампервитков на единицу длины обмотки H_0 не зависит от параметра a .

Для определения значения постоянной γ воспользуемся данными табл. 2, содержащей значения H_{01} напряженности магнитного поля на поверхности изученного барабана, у которого $a = 6$ см, $n = 1400$ витков, при силе тока в обмотке $I = 3,5$ ампера.

Игнорируя при расчете зависимость H_{01} от расстояния l , необходимо очевидно, для обеспечения надежности расчета, приписать H_{01} минимальное значение из приведенных в таблице, т. е., округляя, положить $H_{01} = 840$ э).

Число ампервитков на единицу длины обмотки изученного барабана равняется

$$A_{11} = \frac{1400 \cdot 3,5}{6} = 820.$$

Подставляя значения H_{01} и A_{11} в формулу (31), определим значение γ .

$$\gamma = \frac{H_{01}}{A_{11}} = \frac{840}{820} = 1,002.$$

Округляя это значение γ и подставляя в (31), получим

$$H_0 = A_1. \quad (32)$$

Следовательно H_0 численно равняется числу ампервитков на единицу длины обмотки барабана.

¹⁾ Так как длина силовой трубки в железной части магнитной цепи барабана также обычно увеличивается пропорционально a , формула (31) оправдывается очевидно значительно более точно, нежели исходная формула (14). При выводе ее автор исходил несмотря на это из формулы (14), а не из более общей формулы (11), чтобы не усложнить вывода.

²⁾ При этом игнорируются крайние значения H_{01} , соответствующие $l = 14, 15, 16$, так как на краях барабана можно допустить меньшую величину магнитной силы, вследствие того что обычно по краям барабана обрабатываемый материал идет более тонким слоем.

6. Вывод условия для определения числа ампервитков

Из (25) и (32) следует, что

$$F = 2 \frac{z'}{a} A_1^2 e^{-4 \frac{h}{a}}. \quad (33)$$

Для того чтобы магнитное зерно могло быть притянуто к барабану и перенесено в приемник концентрата, необходимо, чтобы величина магнитной силы, действующей на него, была больше или по крайней мере равна сумме величин силы тяжести F_g и центробежной силы F_c ¹⁾.

Величина силы тяжести F_g , отнесенной к единице массы зерна, равняется 980 единицам (все расчеты ведутся в абсолютных единицах).

Величина центробежной силы F_c , также отнесенной к единице массы зерна, вычисляется по формуле

$$F_c = \omega^2 R, \quad (34)$$

где R — радиус барабана и ω — угловая скорость вращения барабана.

Если n — число оборотов вращения барабана в минуту, то

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30} \quad (35)$$

и следовательно

$$F_c = \frac{\pi^2}{900} n^2 R. \quad (****)$$

Обозначая попрежнему через c — расстояние от поверхности барабана центра зерна, находящегося в наименее выгодных условиях в отношении притяжения к барабану, и через F' — величину магнитной силы, действующей на это зерно, имеем следующее условие удовлетворительной работы сепаратора²⁾

$$F' = F_g + F_c. \quad (36)$$

Подставляя в (36) значения F_g , равное 980, и F_c , определяемое из формулы (33), будем иметь:

$$2 \frac{z'}{a} A_1^2 e^{-4 \frac{c}{a}} = 980 + F_c. \quad (*****)$$

z' определяется в каждом отдельном случае из свойств материала, для обработки которого предназначается рассчитываемый сепаратор.

Таким образом формула (*****) позволяет определить в каждом случае число ампервитков в обмотке барабана.

Расчет обмотки барабана, по определенному таким образом числу ампервитков, может производиться обычным способом³⁾. Комплекс формул (*), (**), (***), (****) и (*****) является таким образом вполне достаточным для расчета электромагнитной системы сепараторов рассматриваемого типа, причем пользование этими формулами не только дает гарантию надежности работы сепараторов, но, самое главное, обеспечивает их экономичность, т. е. при прочих равных условиях позволяет свести до минимума количество меди, идущей на обмотку, и величину потребляемой сепараторами энергии.

¹⁾ В тех случаях, когда шиббер, разделяющий поток магнитного продукта от потока немагнитного продукта, может быть установлен не в осевой (вертикальной) плоскости, как обычно, а ближе к краю барабана, может учитываться не полная сила тяжести, но лишь нормальная к поверхности барабана, в точке над шиббером составляющая ее.

²⁾ Строго говоря, должно быть $F' > F_g + F_c$. Но так как, полагая при расчете магнитную силу, действующую на большое зерно, равной силе, действующей на бесконечно малое зерно, помещенное в центре большого зерна (см. выше), мы тем самым вводим в расчет некоторый „коэффициент запаса“, можно задавать $F' = F_g + F_c$.

³⁾ Автором настоящей статьи разработан оригинальный метод расчета обмоток магнитных сепараторов, в основу которого положено условие максимальной экономичности обмотки. Этому вопросу посвящается специальная статья.

Последнее обуславливается не только возможностью отказа при точном расчете от большого «запаса» в обмотке проектируемых сепараторов, но главным образом возможностью выбора оптимального числа секций (пазов) обмотки, определяемого величиной параметра a .

Предложенный метод расчета может применяться также при расчете сепараторов несколько отличных от рассмотренной конструкции, например в том случае, когда магнитный барабан имеет вместо железных дисков железные сектора и т. п.

В заключение, для иллюстрации, приведем примерный расчет электромагнитной системы сепаратора рассмотренного типа.

7. Пример расчета электромагнитной системы сепаратора М. В. N. 6

Требуется рассчитать магнитный барабан для извлечения случайных железных деталей из фрезерного торфа.

Дается:

а) производительность $Q = 120 \text{ м}^3/\text{час}$,

б) максимальный вес железной детали $P = 0,5 \text{ кг}$ (форма деталей произвольная),

в) скорость вращения барабана $n = 40 \text{ об/мин}$,

г) диаметр барабана $D = 800 \text{ мм}$,

е) длина барабана $L = 750 \text{ мм}$,

ж) толщина ленты, охватывающей барабан, $d = 10 \text{ мм}$,

Так как форма извлекаемых кусков — произвольная, расчет следует вести для шаровой формы.

При расчете в первую очередь необходимо определить расстояние c от поверхности барабана центра детали, находящейся в наименее благоприятных условиях в отношении притяжения его к барабану. Это расстояние складывается из толщины ленты, толщины постели под деталью и радиуса детали.

Деталью, наименее сильно притягиваемой к барабану, в данном случае является, очевидно, наиболее крупная деталь, расположенная целиком над слоем обрабатываемого материала.

Толщина ленты по заданию равняется $d = 10 \text{ мм} = 1,0 \text{ см}$.

Толщина постели определяется из заданной производительности барабана, длины барабана и скорости движения ленты, охватывающей барабан.

Так как по заданию длина барабана $L = 75 \text{ см}$, производительность барабана $Q = 120 \text{ м}^3/\text{час} = 2 \cdot 10^6 \text{ см}^3/\text{мин}$ и скорость движения ленты $v = \pi D n = \pi 800 \cdot 40 \text{ мм/мин} = 10^4 \text{ см/мин}$, толщина слоя материала на ленте равняется

$$d_1 = \frac{Q}{L \cdot v} = \frac{2 \cdot 10^6}{75 \cdot 10^4} = 2,7 \text{ см}.$$

Радиус детали d_2 определяется из заданного максимального веса детали и удельного веса железа. Так как последний равняется $\delta = 7,8$ и максимальный вес детали по заданию равняется $P = 0,5 \text{ кг} = 0,5 \cdot 10^3 \text{ г}$, радиус детали равняется:

$$d_2 = \sqrt[3]{\frac{3P}{4\pi\delta}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 0,5 \cdot 10^3}{4\pi \cdot 7,8}} = 2,3 \text{ см}.$$

Следовательно

$$c = d_1 + d_2 + d_3 = 1,0 + 2,7 + 2,3 = 6 \text{ см}.$$

Определив величину c , из условия (**) находим оптимальное значение параметра a :

$$a = 4c = 4 \cdot 6 = 24 \text{ см}.$$

Так как длина барабана равняется $L = 75 \text{ см}$, оптимальное число секций равняется очевидно $N = 3$. Значение параметра a , соответствующее $N = 3$ из формулы (***), равняется 15.

Из условия (*) определяется соответствующее значение параметра b

$$b = \frac{a}{2} = \frac{15}{2} = 7,5 \text{ см.}$$

Остается определить необходимое число ампервитков в обмотке барабана.

Подставляя в (****) значения $c = 6 \text{ см}$ и $a = 15 \text{ см}$, будем иметь

$$0,027 A_1^2 \cdot x' = 980 + F_c \quad (a)$$

F_c определяется по формуле (****)

$$F_c = \frac{\pi^2 n^2}{900} R = \frac{\pi^2 \cdot 40^2 \cdot 40}{900} = 700.$$

Так как магнитная восприимчивость железа велика, x' — определяется по формуле (7)

$$x' = \frac{3}{4\pi^2} = \frac{3}{4\pi \cdot 7,8} = 0,031.$$

Подставляя значения $F_c = 700$ и $x' = 0,031$ в (a), будем иметь

$$0,00084 A_1^2 = 1680,$$

откуда $A_1 = 1400$.

Полное число ампервитков в обмотке барабана равняется очевидно

$$A = NaA_1 = 63\,000 \text{ ампервитков.}$$

(Продолжение следует)

Résumé

Cet article est une première tentative pour créer la théorie du calcul des systèmes électromagnétiques des séparateurs magnétiques.

Au commencement de l'article est décrit le principe général de la théorie, fondée sur de l'étude expérimentale du champ magnétique, et sont donnés les renseignements généraux, nécessaires pour la construction de cette théorie.

Plus loin sont donnés les résultats de l'étude du champ magnétique d'un séparateur М. В. N. 6 (à magnets annulaires) et une formule pour la détermination de la grandeur de la force magnétique dans les divers points du champ.

A l'aide de la loi de la similitude mécanique, la formule reçue devient générale pour tous les cas d'un séparateur quelconque du type étudié (à magnets annulaires). Cette généralisation permet de poser les conditions pour la détermination des valeurs optimales des paramètres, déterminants le champ magnétique d'un séparateur de ce type, et du nombres d'ampères-tours dans la bobine du séparateur, ce qui constitue le problème de la théorie du calcul.

Les résultats définitifs sont (*), (**), (***) et (****).

A la fin de la première partie de l'article est donné un exemple du calcul du système électromagnétique d'un séparateur du type considéré.