Записки Ленинградского Горного института, т. IX, вып. 1, 1935
Annales de l'Institut des Mines à Leningrade, vol. IX, livr. 1, 1935

Сравнение работы магнитных сепараторов на постоянном и переменном токе

(Предварительное сообщение)

А. Я. Сочнев

Comparison of a direct current and an alternating current magnetic separators

A. J. Sotchnev

1. Введение

Удельная магнитная сила F, действующая в магнитном поле на зерно магнитного вещества, равняется, как известно,

$$F = k'Hgrad\ H$$

k' — кажущаяся магнитная восприимчивость зерна,
H — напряженность магнитного поля.

Как показывает это выражение, направление магнитной силы не зависит от направления напряженности магнитного поля.

Следовательно магнитные сепараторы обычных конструкций, в которых разделяющим руду на компоненты фактором является магнитная сила F и которые питаются обычно постоянным током, принципиально могут работать также на переменном токе. Более того, в силу специфического вращения зерен в переменном магнитном поле, при питании сепаратора переменным током, обогащение должно быть более эффективным (меньшее механическое увлечение зерен), нежели при питании его переменным током.

Для приспособления сепаратора обычной конструкции к питанию переменным током необходимо и достаточно, во-первых, изготовлять магнитную цепь сепаратора из листового (динамного или трансформаторного) железа, чтобы свести до минимума токи Фуко в железе, во-вторых, включать последовательно с обмоткой сепаратора компенсатор фаз для уменьшения ее безваттного сопротивления и улучшения косинуса φ.

С точки зрения экономичности, питание сепараторов обычных конструкций переменным током имеет ряд недостатков в сравнении с питанием их постоянным током, но имеет также ряд преимуществ. К числу недостатков способа питания сепараторов переменным током следует отнести: дополнительные потери энергии в железе магнитной цепи сепаратора на гистерезис и токи Фуко (эти потери к тому же увеличивают нагревание электромагнитной системы сепаратора и могут привести в некоторых случаях к необходимости искусственного охлаждения ее), несколько бóльшие потери энергии в обмотке электромагнита сепаратора (вследствие необходимости при питании сепараторов переменным током давать несколько бóльшую силу тока) и

относительную дороговизну изготовления магнитной цепи сепаратора из листового железа.[1] Преимуществом этого способа питания следует считать возможность отказа от преобразователей переменного тока в постоянный, необходимых при питании сепараторов постоянным током, отсутствие потерь энергии (до 30%) в этих преобразователях, а также возможность получения более чистых концентратов при питании сепараторов переменным током.

В литературе отсутствуют указания на работы по сравнению способов питания сепараторов постоянным и переменным током и экономичности этих способов. Поэтому есть основание полагать, что внедрение в обогатительную практику способа питания сепараторов постоянным током объясняется скорее историческими, нежели экономическими причинами.

Для выяснения этого вопроса в лаборатории электромагнитного обогащения Ленинградского Горного института в 1933 г. была поставлена проблема сравнения работы и экономичности работы магнитных сепараторов на постоянном и переменном токе. В настоящем сообщении приводятся результаты предварительных опытов, поставленных на лабораторном барабанном сепараторе с кольцевыми магнитами, изготовленном в мастерских Ленинградского Горного института.

Экспериментальная часть работы выполнена, под руководством автора, сотрудниками лаборатории, тт. А. А. Теребковым, Б. Н. Дубровиным и И. И. Кошилем.

2. Характеристика материала для опытов

Чтобы отвлечься от свойств руды и сделать процесс обогащения зависящим исключительно от свойств аппарата и режима работы на нем (но не от свойств обогащаемой руды), для опытов настоящей работы были приготовлены синтетические смеси (равных по весу количеств) зерен магнетита и зерен кварца.

Зерна магнетита были получены путем многократной обработки на сепараторе с реверсивными магнитными полюсами (М. Д. 4) магнетитовой руды месторождения г. Высокой. Удельный вес взятого магнетита равнялся ~ 5,0, удельный вес кварца ~ 2,5. Магнитная восприимчивость магнетита была принята равной ~ 1,3.[2]

Кажущаяся удельная магнитная восприимчивость зерен магнетита k', вычисленная для случая шаровой формы зерна по известной формуле,

$$k' = \frac{3k}{(3 + 4\pi\gamma k)}, \qquad (2)$$

исходя из данных значений удельного веса γ и магнитной восприимчивости k магнетита, равнялась 0,040.

Опыты были поставлены при крупности материала —1 *мм* +0,15 *мм* и —6 *мм* +1 *мм*. Коэфициент разрыхления материала (смеси) оказался равным как при той, так и при другой крупности ~ 0,58.

3. Характеристика сепаратора

Рис. 1 представляет схематический рисунок лабораторного сепаратора, на котором были проведены предварительные опыты настоящей работы.

Руда подается в питатель слева и проходит по бесконечной ленте через магнитный барабан справа. Магнитные зерна притягиваются к барабану и отпадают в месте отхода ленты от барабана снизу, немагнитные зерна отбрасываются от барабана и собираются справа.

Рис. 2 представляет схематический чертеж магнитного барабана сепаратора в разрезе по осевой плоскости, с указанием основных размеров и полярности, образующихся при прохождении тока в обмотке магнитных полюсов.

Железные диски, между которыми заложены обмотки, сделаны из трансформаторного листового железа для уменьшения токов Фуко. Для той же цели железные кольца, заложенные под обмотками для замыкания магнитного потока, разрезаны на четыре сектора каждое и между отдельными секторами проложены изоляционные прокладки. Обмотка состоит из 500 витков провода ПБД диаметром 2,26 *мм*, равномерно распределенных между тремя пазами. Омическое сопротивление обмотки равняется ~ 0,45 Ω; полное сопротивление обмотки для переменного тока равняется ~ 4 Ω.

---

[1] Следует иметь в виду также необходимость установки компенсатора фаз для исправления косинуса фи.

[2] См. например «Техническая энциклопедия», Справочник, том IV, стр. 120.

В табл. 1 приведены результаты измерения напряженности магнитного поля сепаратора [1] в точках нормали к барабану над одним из средних полюсов сепаратора (H_1) и в точках нормали между средними полюсами (H_2), причем через I обозначена сила тока в обмотке барабана (в амперах), через h — расстояние точки от поверхности барабана (в сантиметрах) (H_1 и H_2 выражены в эрстедах).

Таблица 1

Результаты изучения магнитного поля сепаратора

№			H_1	
1	0,15	4	80	—
2	0,15	8	150	—
3	0,15	12	230	—
4	0,15	16	305	—
5	0,5	8	113	108
6	1,0	8	76	74
7	1,5	8	49	49

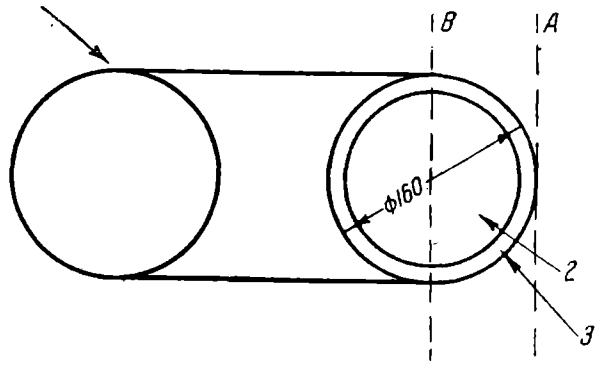


Рис. 1. Схематический чертеж магнитного сепаратора.

1 — место загрузки материала; *2* — магнитный барабан *3* — вращающийся целлюлоидный барабан.

Данные измерений 1—4 показывают, что напряженность магнитного поля H можно считать с достаточной точностью пропорциональной силе тока I в обмотке, а следовательно магнитную силу F — пропорциональной квадрату силы тока I.

Данные измерений 5—7 показывают, что интенсивность магнитного поля в достаточной мере одинакова над средними полюсами и между полюсами.

Эти данные позволяют определить постоянные H_0 и a в формуле

$$H = H_0 e^{-ah}, \qquad (3)$$

определяющей зависимость H от h в сепараторах с кольцевыми магнитами. [2]

Беря средние из значений H_1 и H_2 и подставляя эти значения вместе с соответствующими значениями h в (2), находим, что $H_0 = 165$, $a = 0{,}80$.

Подставляя вычисленные значения H_0 и a в (3), получаем

$$H = 165e^{-0{,}8h}. \qquad (3')$$

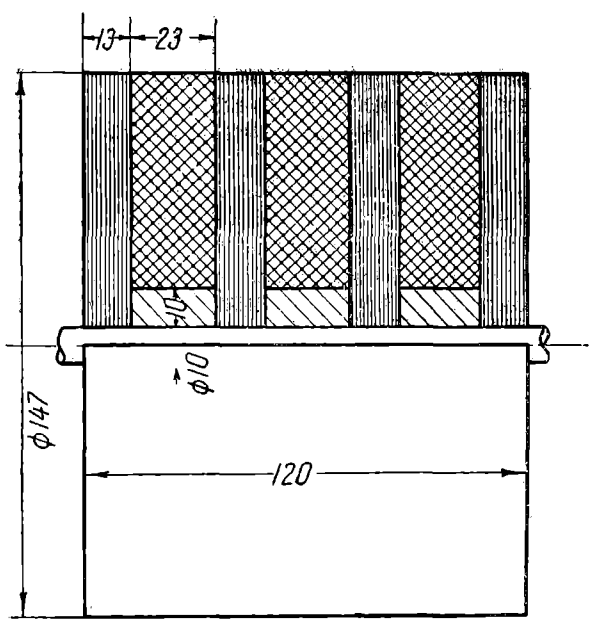


Рис. 2. Схематический чертеж магнитного барабана сепаратора с разрезом по осевой плоскости.

Выражение (3′) позволяет определить величину нормальной к поверхности барабана составляющей удельной магнитной силы F_h.

[1] Измерение напряженности магнитного поля производилось индукционным методом с баллистическим гальванометром, изготовленным экспериментальными мастерскими Ленинградского Физического института, и с зондовыми катушками, изготовленными и калиброванными в лаборатории электромагнитного обогащения Ленинградского Горного института Точность этих измерений ~ 5 гаусс.

[2] См. статью автора в «Записках Горного института», т. VIII, 1934.

Имеем из (1)

$$F_h = k'H \frac{dH}{dh} \tag{4}$$

Подставляя в (4) выражение H из (3) и вычисленное выше значение k^1 для магнетита, будем иметь:

$$F_h = 870\ e^{-1,6h}, \tag{4'}$$

Вводя в (4[1]) зависимость F от I из условия пропорциональности F квадрату I, получим выражение для определения величины удельной магнитной силы при любой силе тока в обмотке:

$$F_h = 13,5I^2e^{-1,6h}. \tag{4''}$$

4. Схема проведения опытов

Опыты обогащения на сепараторе смеси магнетит-кварц проводились в следующем порядке:

Проба смеси, весом 1 *кг*, загружалась через питатель на бесконечную ленту (см. рис. 1) и транспортировалась последней через магнитный барабан.

Для того чтобы иметь возможность оперировать с малыми пробами материала, а также чтобы обеспечить одинаковую интенсивность магнитного поля на любом возможном пути следования зерен, материал загружался не по всей ширине ленты, а лишь на средний участок ее, шириной около 6 *см*, проходя таким образом лишь над средними полюсами магнитного барабана. [1]

В приемнике, установленном под бесконечной лентой (см. рис. 1), собирались три продукта обогащения: 1) зерна, отрывающиеся от барабана под действием центробежной силы и отпадающие справа от вертикальной касательной к барабану плоскости AA' (хвосты); 2) зерна, отрывающиеся от барабана в зоне магнитного поля под действием центробежной силы и тяжести на участке между вертикальными касательной AA' и осевой BB' плоскостями (промпродукт), и 3) зерна, отрывающиеся от барабана под действием силы тяжести по выходе из магнитного поля слева от осевой плоскости BB' (концентрат).

От полученных таким образом продуктов обогащения квартованием отбирались пробы весом 10 *г* для концентратов и 50 *г* для промпродуктов и хвостов и анализировались на трубчатом анализаторе Дэвиса на содержание магнетита. Данные содержания и извлечения в продуктах обогащения магнетита служили для непосредственной оценки процесса обогащения.

Процесс обогащения на сепараторе с кольцевыми магнитами зависит от следующих факторов:

а) от скорости движения ленты, которой определяется величина центробежной силы, действующей на зерна и продолжительность пребывания зерен в магнитном поле;

б) от толщины слоя материала на ленте, которой определяется большее или меньшее механическое увлечение зерен, и

в) от силы тока в обмотке, которой определяется величина магнитной силы, действующей на зерна.

Выбор режима работы сепаратора в опытах настоящей работы был произведен на основании следующих соображений.

Скорость движения ленты была установлена такой, чтобы центробежная сила, действующая на зерна, и продолжительность пребывания зерен в магнитном поле барабана были по возможности более близкими к средним значениям этих величин в условиях работы сепараторов промышленного типа. [2]

Так как эти (последние) значения можно считать приблизительно равными соответственно 500 дин/*г* и 0,65 секунды, опыты настоящей работы были проведены при скорости движения ленты равной около 50 *см/сек* (1 оборот барабана в секунду), при которой, как показывает рас-

[1] Над крайними полюсами обычно интенсивность магнитного поля слабее, чем над средними.

[2] В виду малого диаметра барабана сепаратора в сравнении с диаметрами сепараторов промышленных типов, одновременное равенство центробежной силы и продолжительности пребывания зерен в магнитном поле в условиях опытов настоящей работы средним значениям этих величин в условиях работы промышленных сепараторов не является возможным.

чет, центробежная сила равнялась ~ 300 дин/г, а продолжительность пребывания зерен в магнитном поле — 0,5 секунды.

Так как в сепараторах с кольцевыми магнитами наблюдается очень большое механическое увлечение зерен (вследствие постоянства величины магнитной силы на всем пути следования зерен через магнитное поле), толщина слоя материала в основных опытах устанавливалась минимальной, т. е. равной ~ 1 *мм* (диаметр наиболее крупных зерен) для класса — 1 *мм* + + 0,15 *мм* и 6 *мм* для класса — 6 *мм* + 1 *мм*.

Соответствующее значение производительности сепаратора Q (в *г/сек*), вычисленное по формуле

$$Q = \vartheta \gamma l d v, \qquad (5)$$

где

l — ширина слоя материала в *см*,

d — толщина слоя материала в *см*,

v — скорость движения ленты в *см/сек*,

γ — средняя плотность материала,

ϑ — коэфициент разрыхления материала,

равнялось 65 *г/сек* для материала крупностью — 1 *мм* + 0,15 *мм* и 400 *г/сек* для материала крупностью — 6 *мм* + 1 *мм*.

Продолжительность опытов соответственно равнялась ~ 15 сек. и ~ 2,5 сек.

Кроме опытов при нормальной производительности были поставлены для сравнения два опыта с материалом — 1 *мм* + 0,15 *мм* при повышенной производительности ~ 130 *г/сек*.

Так как обогащение естественных руд даже с одинаковыми магнитными свойствами может производиться при различной интенсивности магнитного поля (в зависимости от наличия и характера сростков и от требуемого качества продуктов обогащения), были поставлены опыты при различной силе тока в обмотке сепаратора.

Минимальная сила тока, при которой ставились опыты, была определена из условия равенства величины магнитной силы сумме величин силы тяжести (равной около 1000 дин/г) и центробежной силы (равной около 300 дин/г.)

Приравнивая выражение из (4″) величины магнитной силы F_h на расстоянии 0,1 *см* от поверхности барабана сумме 1000 + 300 = 1300 дин/г, получим уравнение, из которого определим минимальную силу тока $I = 10$ А при работе сепаратора на постоянном токе. Непосредственный опыт пропускания магнетита через сепаратор подтвердил, что для направления зерен магнетита крупностью — 1 *мм* + 0,15 *мм* в приемник для концентрата, необходимо и достаточно, чтобы сила постоянного тока в обмотке равнялась около 10 А.

В соответствии с этим при работе с постоянным током на материале — 1 *мм* + 0,15 *мм* была установлена следующая шкала значений $I: I_1 = 10$ А, $I_2 = 15$ А и $I_3 = 20$ А.

Так как при питании сепаратора переменным током зерна магнетита в моменты равенства нулю мгновенной силы тока стремятся оторваться от барабана, а потому в среднем находятся на большем расстоянии от поверхности барабана, в зоне менее интенсивного магнитного поля, чем при питании сепаратора постоянным током, эквивалентными условиями работы сепаратора на постоянном и переменном токе следует считать такие, при которых эффективная сила переменного тока несколько больше соответственной силы постоянного тока.

Непосредственный опыт показал, что минимальная сила переменного тока, необходимая для того, чтобы зерна магнетита крупностью—1 *мм* + 0,15 *мм* собирались в приемник для концентрата, должна равняться 11 А, т. е. быть процентов на 10 больше, чем минимальная сила постоянного тока.

В соответствии с этим при работе с переменным током на материале крупностью — 1 *мм* 0,15 *мм* была установлена следующая шкала значений $I: I_1 = 11$ А, $I_2 = 16{,}5$ А и $I_3 = 22$ А.

Опыты с материалом крупностью — 6 *мм* + 1 *мм* были поставлены при средних значениях силы тока: 15 А (постоянный ток) и 16,5 А (переменный ток).

5. Результаты опытов

В табл. 2 приведены результаты опытов обогащения на сепараторе смеси магнетит-кварц, при питании сепаратора постоянным и переменным током.

Данные табл. 2 показывают, что при работе сепаратора на переменном токе процесс обогащения, как и следовало ожидать, протекает значительно эффективнее, чем при работе сепара-

Таблица 2

Результаты опытов обогащения на сепараторе смеси магнетит-кварц

№ опытов	Крупность материала	Род тока	Сила тока в амперах	Производительность	Концентрат: выход, г	Концентрат: выход, %	Концентрат: содержан. магн. %	Концентрат: извл. магн.	Промпродукт: выход, г	Промпродукт: выход, %	Промпродукт: содержан. магн. %	Промпродукт: извл. магн.	Хвосты: выход, г	Хвосты: выход, %	Хвосты: содержание магн. в %
А—1	—1+0,15 мм	—	10	норм.	530	53,0	87,5	92,9	120	12,0	18,5	2,2	350	35,0	следы
В—1	—1+0,15 мм	~	11	»	511	51,2	92,0	94,2	148	14,8	12,5	1,9	340	34,0	
А—2	—1+0,15 мм	—	15	норм.	645	64,8	73,2	94,8	102	10,3	следы		248	24,9	следы
В—2	—1+0,15 мм	~	16,5	»	570	57,2	85,0	97,2	138	13,8			290	29,0	
А—3	—1+0,15 мм	—	15	повыш.	709	71,1	69,6	99,0	1	1	следы		288	28,9	следы
В—3	—1+0,15 мм	~	16,5	»	598	59,8	81,9	98,4	1	1			397	39,7	»
А—4	—1+0,15 мм	—	20	норм.	649	64,9	73,5	95,4	138	13,8	следы		213	21,3	следы
В—4	—1+0,15 мм	~	22	»	566	56,7	87,1	98,7	106	10,6			327	32,7	»
А—5	—6+1 мм	—	15	норм.	500	50,0	90,2	90,2	23	2,3	—	—	477	47,7	следы
В—5	—6+1 мм	~	16,5	»	475	47,8	93,7	89,6	32	3,2			490	49,0	

[1] В этих опытах промпродукт собирался вместе с хвостами.

тора на постоянном токе: механическое увлечение немагнитных зерен в магнитный концентрат при питании сепаратора переменным током значительно меньше, вследствие чего магнитный концентрат получается значительно более чистым.

Эта разница в чистоте концентрата тем больше, чем в более интенсивном магнитном поле протекает процесс обогащения, достигая при силе тока в обмотке $I = 20$ А (опыты А—4 и В—4), соответствующей равенству величины магнитной силы учтверенной сумме величин центробежной силы и силы тяжести, более 13% (по содержанию магнетита).

При этом чрезвычайно важно отметить, что бóльшая чистота концентрата при питании сепаратора переменным током получается не за счет уменьшения извлечения магнитного минерала в концентрат; последнее остается приблизительно одинаковым при работе сепаратора как на постоянном, так и на переменном токе.

Интересно отметить, что, как показывает сравнение результатов опыта А—2 и В—3, сепаратор, работающий на переменном токе, дает более чистый концентрат, чем сепаратор, работающий на постоянном токе, даже в том случае, когда производительность сепаратора в первом случае вдвое больше, чем во втором.

Преимущества способа питания сепаратора переменным током несколько стушевываются, как показывает сравнение опытов А—5 и В—5, при работе сепаратора на более крупном материале. Это находит объяснение отчасти в том, что при обогащении крупного материала механическое увлечение зерен в концентрат сравнительно невелико даже при питании сепаратора постоянным током, отчасти же в том, что эффект вращения зерен в переменном магнитном поле, обусловливающий бóльшую чистоту концентрата при питании сепаратора переменным током, уменьшается с увеличением крупности зерен.

Заключение

Подводя итог проделанной работе, можно сделать следующие заключения:

1. Возможность питания сепараторов обычных конструкций переменным током нашла непосредственное экспериментальное подтверждение.

2. При работе сепаратора на переменном токе концентрат получается существенно более чистым, нежели при работе сепаратора на постоянном токе. Поэтому, при заданной степени чистоты концентрата, сепаратор, работающий на переменном токе, может дать значительно бóльшую производительность.

3. Извлечение магнитного минерала в концентрат одинаково при питании сепаратора как постоянным, так и переменным током.

4. Необходимая сила тока при питании сепаратора переменным током незначительно больше силы тока при питании сепаратора постоянным током. Поэтому увеличение потерь энергии в обмотке сепаратора при переходе к питанию переменным током незначительно.

Summary

In the article, of which this is an abstract, results of preliminary tests are given; these results are:

1. A possibility for magnetic separators to function on the alternating currents proved experimentally.

2. With the separator working on the alternating current, the concentrate received is of a higher purity, than the concentrate, produced by a direct current separator. Therefore, with a definite degree of concentrate quality required, — an alternating current separator will give a better output than a direct current separator.

3. The quality of extraction of the magnetic mineral from the concentrate is the same in both cases of current supply to the magnetic separator.

4. The current intensity, required for an alternating current separator, is somewhat higher, than in the case of direct current supply, but not as high as to increase too much the power losses in the windings of the separator, when the power supply is changed from direct to alternating current.

1933 г.