

Практика экспертизы промышленной безопасности средств магнитной защиты (магнитных сепараторов и колонок) производственных объектов хранения, переработки и использования растительного сырья

Ю.В. Попов (Воронежская машиноиспытательная станция)

Критерии соответствия средств магнитной защиты требованиям промышленной безопасности

Для контроля показателей средств магнитной защиты (СМЗ) при испытаниях и экспертизе необходимо располагать критериями их соответствия требованиям промышленной безопасности.

Правила промышленной безопасности для взрывоопасных производственных объектов хранения, переработки и использования растительного сырья (ПБ-14-586-03, п. 5.2.24, 5.2.25) [1] регламентируют установку СМЗ в технологических схемах опасных производственных объектов. В общем случае указанные средства на взрывопожароопасных производственных объектах хранения, переработки и использования растительного сырья имеют три назначения:

- очистка зернового и мучнистого сырья от крупных металломагнитных включений при приеме на предприятие (защита транспортного оборудования узла приема – приемных норий и транспортеров);
- защита дробильно-измельчающего и другого взрывопожароопасного оборудования технологической схемы предприятия;
- контроль готовой продукции.

СМЗ (магнитные сепараторы и колонки), установленные в технологических линиях взрывопожароопасных производственных объектов хранения, переработки и использования растительного сырья, должны соответствовать своему назначению. Критерии эффективности работы СМЗ также определяются их назначением.

Критерии эффективности работы:

- высокопроизводительных магнитных сепараторов, предназначенных для извлечения крупных ферромагнитных включений при приеме сырья с водного, железнодорожного и автомобильного транспорта, – извлечение магнитной системой и обеспечение несмываемости потоком сырья магнитных примесей крупнее 10 мм по большому линейному размеру (примеси, способные инициировать аварийное состояние норий и транспортеров узла приема сырья с водного, железнодорожного или автотранспорта). Значение критерия, при котором названный сепаратор соответс-

твует своему назначению и требованиям промышленной безопасности, – 100 %-ное извлечение и обеспечение несмываемости указанных примесей потоком сырья;

➤ магнитных сепараторов, защищающих дробильно-измельчающее оборудование (дробилки, вальцовые станки), а также обочные и вымольные машины, шелушители, прессы-грануляторы, экструдеры и другое потенциально взрывопожароопасное оборудование, – извлечение ферромагнитных примесей и обеспечение несмываемости потоком продукта магнитных примесей крупнее 2,0 мм по большому размеру (примеси, способные к искрению). Значение критерия, которое определяет соответствие СМЗ дробильно-измельчающего и другого потенциально взрывопожароопасного оборудования своему назначению и требованиям промышленной безопасности, – 100 %-ное извлечение и обеспечение несмываемости указанных примесей потоком сыпучего материала;

➤ средств магнитной очистки готовой продукции (контроль готовой продукции), устанавливаемых на выбое, – качество готовой продукции. Значение критерия эффективности работы – обеспечение показателей ГОСТов по содержанию металломагнитных примесей в готовой продукции и обеспечение полной безопасности употребления этой продукции людьми или животными. Таким образом, при экспертизе необходимо определить соответствие установленных СМЗ их назначению и критериям эффективной (надежной) работы.

Определение параметров силовых характеристик магнитного поля

Магнитная сила поля F_M , определяемая как произведение напряженности поля H и его градиента $\text{grad } H$, учитывает интенсивность и неоднородность поля:

$$F_M = H \cdot \text{grad } H = H \cdot \nabla H \quad (1)$$

Знак ∇ («набла» – оператор градиента) введен в целях удобного сокращения обозначения градиента напряженности.

Для практического исследования процесса магнитной сепарации и оценки технологических возможностей СМЗ необходимы такие характеристики поля, которые отражают его изменения в направлении движения сепарируемого материала.

Магнитная сила поля F_M , определяемая уравнением (1), является вектором, направление которого совпадает с направлением градиента напряженности ∇H . Этот вектор целесообразно разложить на составляющие по трем направлениям и рассмотреть влияние каждой составляющей на процесс сепарации и его технологические показатели. Тогда

$$F_M = F_H + F_{п.в.} + F_{п.п.}, \quad (2)$$

где составляющие магнитной силы F_M ориентированы соответственно по направлениям:

➤ нормальному к поверхности магнитной системы (F_H);



- перпендикулярному:
 - вдоль направления движения сыпучего материала ($F_{п.в.}$);
 - поперек направления движения сыпучего материала ($F_{п.п.}$).

По этим же направлениям ориентируются линии, на которых расположены измеряемые точки. Нормальная составляющая F_H направлена перпендикулярно поверхности магнитной системы и является полезной составляющей, благодаря которой металломагнитное включение извлекается на поверхность экрана (рабочий орган). Эта же составляющая удерживает извлеченное включение на поверхности и предотвращает его срыв потоком сыпучего материала. Недостаточно большая величина F_H означает, что извлеченные примеси могут частично или полностью отрываться потоком материала.

Перпендикулярная составляющая $F_{п.п.}$ в зависимости от конструкции магнитной системы может быть направлена либо по движению потока сепарированного материала, либо противоположно ему, вызывая соответственно нежелательный срыв извлеченных включений или препятствуя ему.

Перпендикулярная составляющая $F_{п.п.}$ вызывает смещение извлеченных включений поперек экрана.

Введем обозначения составляющих магнитной силы F_M по направлению осей координат x, y, z :

$$\begin{aligned} F_H &= F_1(x); \\ F_{п.в.} &= F_2(y); \\ F_{п.п.} &= F_3(z). \end{aligned}$$

Составляющие F_1, F_2, F_3 магнитной силы поля F_M представим в частных производных:

$$\begin{aligned} F_1 &= H \cdot \nabla_1 H = \frac{\partial H}{\partial x}; \\ F_2 &= H \cdot \nabla_2 H = \frac{\partial H}{\partial y}; \\ F_3 &= H \cdot \nabla_3 H = \frac{\partial H}{\partial z}. \end{aligned} \quad (3)$$

Так как аналитические выражения зависимости напряженности поля H от координат x, y, z неизвестны, то соответствующие частные производные можно заменить их приближенными значениями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial x} &\cong \frac{\Delta H}{\Delta x} = \frac{H_{x_i} - H_{x_{(i+1)}}}{x_{i+1} - x_i}; \\ \frac{\partial H}{\partial y} &\cong \frac{\Delta H}{\Delta y} = \frac{H_{y_i} - H_{y_{(i+1)}}}{y_{i+1} - y_i}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial H}{\partial z} \cong \frac{\Delta H}{\Delta z} = \frac{H_{z_i} - H_{z_{(i+1)}}}{z_{i+1} - z_i} .$$

Подставляя в уравнение (3) значения составляющих градиента, полученные в результате измерений напряженности магнитного поля, определим соответствующие величины составляющих магнитной силы поля (F_H , $F_{п.в.}$, $F_{п.п.}$).

Системы уравнений (3) и (4) дают возможность получить при необходимости полную топографию магнитного поля в рабочем объеме сепаратора.

Анализ параметров силовых характеристик магнитного поля

В экспертной практике при анализе силовых характеристик магнитного поля для оценки технологических возможностей СМЗ опасных производственных объектов по хранению, переработке и использованию растительного сырья наиболее важными являются следующие три характеристики магнитного поля:

- нормальная составляющая магнитной силы поля (F_{H0}) на поверхности магнитной системы (обеспечивает эффективность извлечения магнитных включений и удерживание их от смывающего действия потока);

- нормальная составляющая магнитной силы (F_{Hx}) на расстоянии x , соответствующем верхней границе слоя сепарируемого материала ($x = 10, 20, 30, 40, 50$ мм, в зависимости от толщины сепарируемого слоя, характеризует глубину поля и, следовательно, определяет производительность сепаратора);

- градиент напряженности магнитного поля по толщине слоя сепарируемого материала ($\text{grad } H_x$) определяет эффективность процесса извлечения магнитных включений разных классов крупности из сепарируемого слоя разной толщины.

Перечисленные характеристики определяются вдоль всей траектории движения сыпучего материала в рабочей зоне. Для их расчета измеряют:

- напряженность поля на поверхности магнитной системы (экрана) (H_0) (общепризнанный параметр, характеризующий магнитное поле сепаратора);

- напряженность поля (H_x) на удалении 10, 20, 30, 40, 50 мм (в зависимости от толщины сепарируемого слоя).

Указанные магнитные характеристики – минимально необходимые измеряемые величины для анализа и оценки СМЗ при проведении испытаний и экспертизы на соответствие требованиям промышленной безопасности.

Для более полного анализа следует учитывать и другие составляющие магнитной силы поля – $F_{п.в.}$ и $F_{п.п.}$, а также отношения этих составляющих к нормальной составляющей F_H .



Если составляющая магнитной силы поперек направления движения сепарируемого материала ($F_{п.п.}$) для подавляющего большинства конструкций СМЗ не является определяющей, то составляющая вдоль движения ($F_{п.в.}$) часто оказывается значимой.

Отношение $F_{п.в.}/F_n$ – показатель торможения извлеченного на экран магнитного включения. Значение этого отношения должно быть минимальным, если составляющая $F_{п.в.}$ имеет то же направление движения, что и сепарируемый материал, и максимальным – если обратное.

Нормальная составляющая магнитной силы поля (F_{H0}) на поверхности магнитной системы (экрана), рассчитываемая в отдельных точках вдоль движения сепарируемого материала (вдоль магнитной системы), не должна различаться более чем в 5 раз (иными словами, магнитное поле вдоль магнитной системы должно быть непрерывным). Это следует из положения, что основное влияние на процесс оказывают не отдельные точки с наибольшим эффектом торможения, а суммарное действие всех вероятных точек торможения вдоль магнитной системы. Поэтому неоднородность магнитного поля на поверхности магнитной системы (экрана) на измеряемом удалении вдоль движения сепарируемого материала является важным фактором формирования поля, влияющим на процесс извлечения примесей и удержания их на экране. Оценивать эту неоднородность нужно для каждого сепаратора.

При проведении исследовательских испытаний, связанных с оптимизацией параметров магнитной системы, а также некоторых видов контрольных испытаний оценка силового поля сепаратора по средним значениям силы на двух контрольных уровнях может оказаться недостаточной, так как при этом не учитываются характеристики поля для промежуточных значений. В этом случае вводят показатель средней интегральной магнитной силы F_{cp} в рабочем объеме сепаратора на расстоянии h_x от поверхности рабочего органа в границах зоны притяжения:

$$\bar{F}_{cp} = \frac{1}{h_x - h_0} \int_{h_0}^{h_x} F_m(x) dx \quad (5)$$

Определение соответствия средств магнитной защиты своему назначению

При оценке соответствия СМЗ своему назначению в первую очередь определяют, соответствует ли их производительность производительности технологической линии (металломангнитные примеси должны эффективно извлекаться по всей толщине слоя сепарируемого материала). Для этого оценивают магнитные характеристики силового поля сепаратора в зависимости от его назначения. Определение соответствия магнитного сепаратора производительности технологической линии сводится к определению «глубины» магнитного поля сепаратора $h_{\text{магн. поля}}$ (расстоя-

ние по перпендикуляру от рабочей поверхности до точки, в которой значения параметров поля остаются достаточными для извлечения), толщины слоя сепарируемого материала $h_{\text{сеп. слоя}}$ при прохождении его по рабочей поверхности (экрану) сепаратора и сопоставлению этих величин. При этом проверяют выполнение условия:

$$h_{\text{магн. поля}} > h_{\text{сеп. слоя}} \quad (6)$$

Толщину слоя сепарируемого материала, проходящего через рабочую зону сепаратора, измеряют непосредственно деревянной линейкой, либо рассчитывают по формуле:

$$h_{\text{сеп. слоя}} = \frac{Q}{B \cdot \gamma \cdot v_0 \cdot \delta} \quad (7)$$

где Q – производительность сепаратора; γ – плотность сепарируемого материала; v_0 – скорость движения продукта через рабочую зону сепаратора; B – ширина рабочей зоны сепаратора; δ – коэффициент заполнения слоя сыпучего материала.

«Глубину» магнитного поля сепаратора находят путем измерения нормальных составляющих напряженности магнитного поля H_0 на поверхности магнитной системы (экрана) и H_x на удалении, соответствующем верхней границе слоя сепарируемого материала, и расчета градиента напряженности поля с использованием выражения (7).

Величина $h_{\text{сеп. слоя}}$ для СМЗ (сепараторов), магнитная система которых выполнена на основе постоянных магнитов, должна ориентировочно составлять (мм):

- прием сырья, производительность 50–350 т/ч – < 50;
- защита дробильно-измельчающего оборудования, производительность 2–50 т/ч – < 20;
- контроль готовой продукции – ≤ 10 .

Толщина слоя материала, сепарацию которого производят устройствами, разработанными на базе электромагнитов, может превышать приведенные значения и определяется в зависимости от типа электромагнита.

Неравенство (6) относится к СМЗ с нижним расположением магнитов относительно очищаемого материала (СМЗ с верхней подачей).

Для устройств с нижней подачей сыпучего материала (смонтированы над ленточными конвейерами) к $h_{\text{сеп. слоя}}$ добавляется расстояние между магнитной системой и верхней границей сепарируемого слоя h_p . Неравенство (6) примет вид:

$$h_{\text{магн. поля}} > h_{\text{сеп. слоя}} + h_p \quad (8)$$



Следовательно, и глубина магнитного поля таких устройств должна быть больше, чем для средств магнитной защиты с верхней подачей.

Экспресс-оценка средств магнитной защиты

Экспериментальная экспресс-оценка извлекающей и удерживающей способности СМЗ может быть выполнена путем пропуска через рабочую зону сепаратора предметов сферической формы (шариков от подшипников качения). В связи с тем, что коэффициент размагничивания тела сферической формы $N = 1/3$, магнитная восприимчивость тела уменьшается на треть (по сравнению с длинным стержнем), отсюда – снижение намагниченности сферического тела, и, как следствие, уменьшение магнитной силы, действующей на него. Кроме того, извлеченное магнитное шарообразное тело контактирует с магнитной системой (экраном) только в одной точке, т.е. имеет наихудшие условия удерживания на рабочей поверхности после извлечения.

При экспресс-оценке необходимо проводить две серии опытов, заключающихся в пропуске сферических тел через рабочую зону сепарации:

- без продукта;
- в движущемся слое сепарируемого материала.

Для экспресс-оценки извлекающей и удерживающей способности магнитной системы используют шарики диаметром > 10 мм (для сепараторов при приеме сырья) и > 2 мм (для сепараторов защиты дробильно-измельчающего и другого потенциально взрывопожароопасного технологического оборудования).

Эффективность извлечения и удерживания шарика определяют из выражения:

$$K = 100 - \frac{P \cdot 100}{C}, \quad (9)$$

где K – коэффициент извлечения (удерживания);

C – количество включений сферической формы, пропущенных через средство магнитной защиты, шт.;

P – количество включений, извлеченных (удержанных) магнитной системой, шт.

В случае эффективного извлечения и надежного удерживания тел сферической формы на поверхности магнитной системы извлечение и удерживание ферромагнитных включений любой другой формы окажется еще более вероятным.

По значениям коэффициентов извлечения (удерживания) делают вывод о том, что критерий соответствия СМЗ удовлетворяет требованиям промышленной безопасности.

Проверка удерживающей способности магнитных систем

Второе важное условие выполнения критерия соответствия – несмываемость извлеченных включений потоком сепарируемого материала. Проверка выполнения этого условия обязательна при проведении приемочных и других контрольных испытаний.

В испытаниях используют меченые примеси. Проверяется несмываемость извлеченных включений разной формы: деталей типа вала, цилиндрической, сферической формы, а также болтов, гаек и т.п. (наиболее характерные металломагнитные примеси в зерновом и мучнистом сырье, попадающие на предприятия).

В условиях производства несмываемость извлеченных включений проверяют следующим образом: магнитные включения закрепляют на тонком диамагнитном поводке, второй конец которого фиксируют на корпусе сепаратора и помещают на экран (магнитная система). Контрольную фиксацию магнитного включения выполняют с «провисанием» диамагнитного поводка, и оценивают несмываемость деталей разной формы. Размеры деталей определяются назначением сепаратора. Эффективность магнитной системы по показателю несмываемости рассчитывают по формуле (9). Число повторностей при определении эффективности определяется по результатам предварительных экспериментов [2].

На основании результатов, которые вносят в таблицу и оформляют протоколом [3], делают вывод о соответствии (или несоответствии) СМЗ требованиям промышленной безопасности.

Контрольные значения параметров средств магнитной защиты

Принятой рабочей глубиной магнитного поля сепаратора следует считать глубину поля с градиентом, kA/m^2 , не ниже:

- 1500 для сепараторов, извлекающих крупные ферромагнитные включения (при приеме сырья на предприятие);
- 3000 для сепараторов, установленных перед дробильно-измельчающим и другим потенциально взрывопожароопасным технологическим оборудованием;
- 4000 для сепараторов, установленных на контроле готовой продукции.

Толщина слоя сепарируемого материала для СМЗ, магнитная система которых выполнена на основе постоянных магнитов, должна ориентировочно составлять, мм, менее:

- 50 для сепараторов производительностью 50–350 т/ч, установленных на приеме сырья;
- 20 для сепараторов производительностью 1–50 т/ч, защищающих дробильно-измельчающее оборудование;
- 10 для сепараторов контроля готовой продукции.



Минимальные значения магнитных сил (средние значения по точкам измерений) должны составлять, kA^2/m^3 , не ниже:

- для СМЗ, установленных при приеме сырья на предприятие:
 - $50 \cdot 10^4$ на рабочей поверхности;
 - $10 \cdot 10^4$ на верхней границе сепарируемого слоя;
- для СМЗ, установленных перед дробильно-измельчающим и другим взрывопожароопасным технологическим оборудованием:
 - $70 \cdot 10^4$ на рабочей поверхности;
 - $15 \cdot 10^4$ на верхней границе сепарируемого слоя;
- для СМЗ готовой продукции:
 - $90 \cdot 10^4$ на рабочей поверхности;
 - $30 \cdot 10^4$ на верхней границе сепарируемого слоя.

При определении длины зоны извлечения за начальную точку рабочей зоны магнитной защиты принимают точку, в которой начинается притяжение ферромагнитных включений. При этом, как показывают исследовательские испытания и практика экспертиз, длина фронта магнитных систем, выполненных на основе современных магнитных материалов – ферритов (двойные оксиды металлов), должна составлять, мм, не менее:

- 500 для СМЗ узла приема сыпучего сырья на предприятие;
- 150 для СМЗ дробильно-измельчающего и другого потенциально взрывоопасного оборудования.

Значение напряженности магнитного поля на поверхности экрана должно быть ≥ 80 kA/m по всему фронту магнитного поля (по индукции ≥ 100 мТл).

При определении длины зоны извлечения за начальную точку рабочей зоны сепаратора принимают точку, в которой начинается притяжение ферромагнитных включений.

При таких параметрах можно прогнозировать эффективное (надежное) извлечение:

- крупных (> 10 мм) примесей при приеме сырья;
- средних ($> 2,0$ мм) примесей при защите дробильно-измельчающего и другого потенциально взрывопожароопасного технологического оборудования;
- мелких примесей (крупнее «следов») на контроле готовой продукции.

Определение соответствия средств магнитной защиты общим требованиям промышленной безопасности

В ходе испытаний и экспертизы СМЗ определяют также соответствие их требованиям ГОСТов, Правил промышленной безопасности и технических условий. При определении соответствия СМЗ общим требованиям промышленной безопасности проверяют:

- соответствие конструкторской документации требованиям ЕСКД; ГОСТ 2.114; ГОСТ 2.601; ГОСТ 2.109 [4, 5, 6];

- места установки СМЗ в соответствии с требованиями ПБ 14-586–03, п. 5.2.24, 5.2.25 [1];
- соответствие рабочего места и его элементов требованиям ГОСТ 12.2.003, п. 2.2; ГОСТ 12.2.124, п. 9; ПБ 14-586–03, п. 6.7.31 [1, 7, 8];
- герметичность СМЗ на соответствие требованиям ПБ 14-586–03, п. 5.2.19 [1];
- конструкцию магнитной колонки на соответствие требованиям ПБ 14-586–03, п. 6.7.32 [1];
- качество защиты от статического электричества на соответствие требованиям ГОСТ 12.1.018 [9];
- наличие и содержание таблички маркировки в соответствии с требованиями ГОСТ 26582 [10];
- соответствие уровня шума на рабочем месте требованиям ГОСТ 12.1.003 [11];
- соответствие уровня вибрации на рабочем месте требованиям ГОСТ 12.1.012 [12];
- запыленность в рабочей зоне оператора средств магнитной защиты на соответствие требованиям ГОСТ 12.1.005 [13].

Список литературы

1. Правила промышленной безопасности для взрывоопасных производственных объектов хранения, переработки и использования растительного сырья (ПБ-14-586–03), утверждены Постановлением Госгортехнадзора России от 10.06.03 № 85.
2. Прикладная статистика. Применение методов математической статистики при планировании испытаний и обработке полученных результатов» (РТМ 8.22.06.01–79).
3. Журнал испытаний (РТМ 8.57.00–66–83).
4. ГОСТ 2.114–95 «ЕСКД. Технические условия».
5. ГОСТ 2.601–95 «ЕСКД. Эксплуатационные документы».
6. ГОСТ 2.109–73 «ЕСКД. Основные требования к чертежам».
7. ГОСТ 12.2.003 «Оборудование производственное. Общие требования безопасности».
8. ГОСТ 12.2.124 «Оборудование продовольственное. Общие требования безопасности».
9. ГОСТ 2.1.018 «Пожаровзрывобезопасность статического электричества. Общие требования».
10. ГОСТ 26582 «Машины и оборудование продовольственные. Общие технические условия».
11. ГОСТ 12.1.003 «Шум. Общие требования безопасности».
12. ГОСТ 12.1.012 «Вибрационная безопасность. Общие требования».
13. ГОСТ 12.1.005 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны».