УДК 622-1/-9:621.82 DOI: 10.21440/0536-1028-2026-5-37-49

Особенности структуры и расчета силовых магнитных систем для применения в горном деле

Болотов А. Н.[1], Яблонев А. Л.[1]*
[1] Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия
e-mail: alvovich@mail.ru

Реферат

Цель работы *– установление зависимости магнитосиловых свойств типовых магнитных систем от их геометрических размеров и магнитных свойств материалов для последующего проектирования пассивных магнитных подшипников, грузозахватов, фиксаторов и других механизмов в горном машиностроении.*

Методика. *Рассмотрены две магнитные системы с постоянными магнитами (закрытого и открытого типов), предназначенные для создания больших сил магнитного притяжения и используемые в горном машиностроении для разгрузки подшипниковых узлов, фиксации тяжелых деталей и магнитного захвата ферромагнитных грузов. Системы различаются по функциональным свойствам и максимальной силе притяжения. Использованы аналитический расчет на основе теории магнитных цепей, численное моделирование методом конечных элементов (FEMM 4.2) и экспериментальные испытания макетов; расхождение результатов не превышает 9 %.*

Результаты. *Получены приближенные формулы для расчета силы притяжения в зависимости от физических и геометрических параметров систем. Приведены простые аналитические зависимости для оценки силы притяжения при нулевом магнитном зазоре, которые получены с учетом максвелловского магнитного давления на поверхность.*

Выводы. *Для реализации максимальной силы притяжения площадь сечения полюсных наконечников должна быть такой, чтобы индукция магнитного поля в них была приблизительно на 10 % ниже индукции магнитного насыщения материала магнитопровода. Показано, что сила притяжения слабо увеличивается при толщине магнитов, превышающей удвоенную толщину оптимальных магнитных полюсных наконечников. Результаты могут быть использованы при проектировании пассивных магнитных подшипников дробилок и мельниц, магнитных грузозахватов для руды, а также устройств фиксации футеровки и элементов крепи.*

Ключевые слова: *магнитная сила притяжения; постоянные магниты; магнитная система; горное дело; разгрузка подшипников; магнитный грузозахват; пассивный магнитный подшипник; намагниченность.*

Введение. Постоянные высококоэрцитивные магниты играют важную роль в горной промышленности, позволяя создавать пассивные магнитные системы для разгрузки опор вращающихся машин, бесконтактной фиксации и перемещения ферромагнитных деталей и грузов [1–3]. Применение современных магнитов на основе редкоземельных элементов (Nd–Fe–B, Sm–Co) дало возможность существенно повысить надежность и ресурс горнотранспортного оборудования за счет снижения механического трения и контактных напряжений в подшипниковых узлах [4, 5].

Магнитные силы, источником которых являются постоянные магниты, играют определяющую роль в следующих горных машинах и устройствах: пассивные магнитные подшипники для разгрузки опор конусных и щековых дробилок, шаровых мельниц, центрифуг (снижение износа, тепловыделения и увеличение

межремонтного периода [4–7]); магнитные грузозахваты для подъема и перемещения кусков руды, чугунных чушек, футеровочных плит, скрапа в условиях карьеров и обогатительных фабрик [7]; устройства фиксации бронеплит при ремонте дробилок и мельниц (удерживание тяжелых футеровочных элементов в заданном положении без применения сварки или строповки [8–10]); магнитные системы для крепления вспомогательного оборудования – кабелей, лестниц, светильников, датчиков – на стальных поверхностях горных выработок и конструкциях дробилок без сверления отверстий (сохранение антикоррозионных покрытий и целостности металлоконструкций [11, 12]); магнитные разгружающие устройства для конвейерных роликов и барабанов (уменьшение контактных напряжений и вибрации [13]).

В литературе активно обсуждается применение пассивных магнитных подшипников в центробежных дробилках и насосах для пульпы. Механическое трение в классических подшипниках приводит к нагреву и быстрому износу в запыленной и влажной среде. Использование пассивных магнитных подшипников в качестве системы разгрузки (воспринимающей осевые и радиальные нагрузки) может повысить стабильность и безопасность работы оборудования, снижая температуру и вибрации [6, 7]. Зарубежные исследования показывают [5, 10, 12, 13], что правильно спроектированные пассивные магнитные подшипники способны воспринимать осевые нагрузки до 5–10 кН при зазорах 0,5–1,0 мм. Большую техническую, технологическую и экономическую выгоду можно получить при применении магнитных систем для разгрузки от внешних механических сил опор скольжения и качения дробилок, мельниц, грохотов [1, 3]. Магнитные разгружающие системы хорошо зарекомендовали себя для снижения контактных напряжений в подшипниковых опорах ветрогенераторов, но в горном деле они также эффективны для аккумуляторов кинетической энергии и тяжелых вращающихся элементов машин. Результатом такого использования явилось существенное повышение надежности и ресурса работы указанных устройств (на 10–20 % по данным эксплуатации) [4]. При монтаже и ремонте горного оборудования магнитная фиксация исключает необходимость сверления или сварки, сохраняется структурная целостность стальных элементов и сокращается время простоя. Например, при замене броней конусной дробилки магнитные захваты удерживают футеровочные кольца массой до 500 кг, позволяя точно позиционировать их без крана [10, 11]. В шахтах магнитные крепления используются для быстрого демонтажа и переноса кабельных лотков и лестниц по мере продвижения забоя [12]. В роботизированных горных комплексах магнитные захваты применяются для манипуляторов, обслуживающих футеровку мельниц и дробилок, где традиционные вакуумные или клеевые фиксаторы неэффективны из-за пыли и влаги [5, 12, 14]. Эффективность приведенных магнитных систем разгрузки, крепления и грузозахвата напрямую зависит от максимизации силы притяжения при оптимизации массы и стоимости магнитных материалов, что и является предметом настоящего исследования.

Одним из перспективных направлений использования постоянных магнитов в горной промышленности являются конвейеры с магнитным подвесом ленты (MagLev-конвейеры) [11]. В традиционных ленточных конвейерах лента опирается на роликоопоры, что приводит к провисанию между роликами, ударным нагрузкам при прохождении кусков груза, а также к усталостному износу ленты и ограничению скорости [3–5]. Замена роликоопор на систему постоянных магнитов позволяет удерживать ленту в воздухе без механического контакта. В конструкциях, разработанных для крупнокусковой горной массы, используются либо встроенные в ленту полосы магнитопласта или постоянные магниты, либо отдельные магнитные

опоры, взаимодействующие с ферромагнитными элементами ленты. Благодаря этому: исключается провисание ленты между опорами; снижаются динамические нагрузки и износ; повышается допустимая скорость (до 10 м/с и выше); уменьшается энергопотребление на привод (по некоторым данным на 10–15 %). Важно, что системы на постоянных магнитах не требуют постоянного подвода электроэнергии для создания подъемной силы, что делает их перспективными для взрывоопасных условий подземных рудников. Однако, как и в рассмотренных ранее магнитных системах разгрузки подшипников, сила притяжения в конвейерах ограничена фиксированными характеристиками магнитов и требует оптимизации геометрии магнитопроводов. Таким образом, конвейер с магнитным подвесом является еще одним практическим воплощением силовой пассивной магнитной системы, где сила притяжения используется для бесконтактной поддержки движущегося полотна, снижая трение и износ.

Для практического применения в горном деле наиболее интересны магниты на основе редкоземельных элементов. Магниты Sm–Co имеют остаточную индукцию 0,70–0,95 Тл и рабочий диапазон от –70 до 300 °C, что важно для оборудования на открытых карьерах. Магниты Nd–Fe–B имеют остаточную индукцию 1,00–1,35 Тл, но более узкий диапазон рабочих температур (от –60 до 180 °C) и требуют защиты от коррозии, что приемлемо для подземных условий с умеренной влажностью при наличии покрытий [4]. При решении технических задач создания новых устройств для горной техники с постоянными магнитами возникает проблема оптимизации магнитной системы. Как правило, во всех магнитосиловых устройствах используются системы, в которых постоянный магнит окружен магнитопроводом из магнитомягкого материала (сталь 10, сталь 08кп) для увеличения удельной силы (в расчете на единицу объема магнитотвердого материала). Расчет подобных систем производился приближенными методами [2, 3], универсальные закономерности не установлены. Необходимо выбрать типовые магнитосиловые системы для разгрузки опор и магнитного захвата, сформулировать рекомендации по определению основных размеров магнитов и магнитопроводов для создания заданной максимальной силы.

Цель работы – установление зависимости магнитосиловых свойств типовых магнитных систем от их геометрических размеров и магнитных свойств материалов для последующего проектирования пассивных магнитных подшипников, грузозахватов, фиксаторов и других механизмов в горном машиностроении.

Объект исследований. Исследовали две типовые магнитосиловые системы, которые широко используются на практике. Первая – это магнитосиловая система закрытого типа, приведенная на рис. 1, *а*. Система притягивается через воздушный зазор к сопряженной магнитной поверхности *3*. В этой системе весь магнитный поток, выходящий из полюсной поверхности цилиндрического или призматического магнита *1*, замыкается с помощью куполообразного магнитопровода *2*. Сила притяжения в системе закрытого типа зависит только от величины зазора, и другим способом ее регулировать затруднительно. Магнитная система закрытого типа создает слабые магнитные поля рассеяния, не искажающие работу близкорасположенных приборов, и позволяет получать несколько большие абсолютные силы притяжения, чем другая система открытого типа. Система закрытого типа с ее малыми полями рассеяния идеально подходит для пассивных магнитных подшипников, используемых в высокоскоростных шпинделях, медицинских насосах (искусственное сердце) или вакуумных технологиях, где важно не влиять на окружающее пространство и обеспечить максимальную силу.

Магнитная система открытого типа показана на рис. 1, *б*. Система состоит из постоянного магнита *1* призматической формы и двух плоских магнитопроводов *2*, примыкающих к полярным поверхностям магнита, которые концентрируют магнитный поток и направляют его в сторону магнитной поверхности *3* для создания силы притяжения к ней. Особенность системы открытого типа заключается в том, что магнитный поток в ней можно шунтировать для изменения силы притяжения почти от нуля до максимального значения. Для проведения этой процедуры в область, расположенную между плоскими магнитопроводами *2*, устанавливается

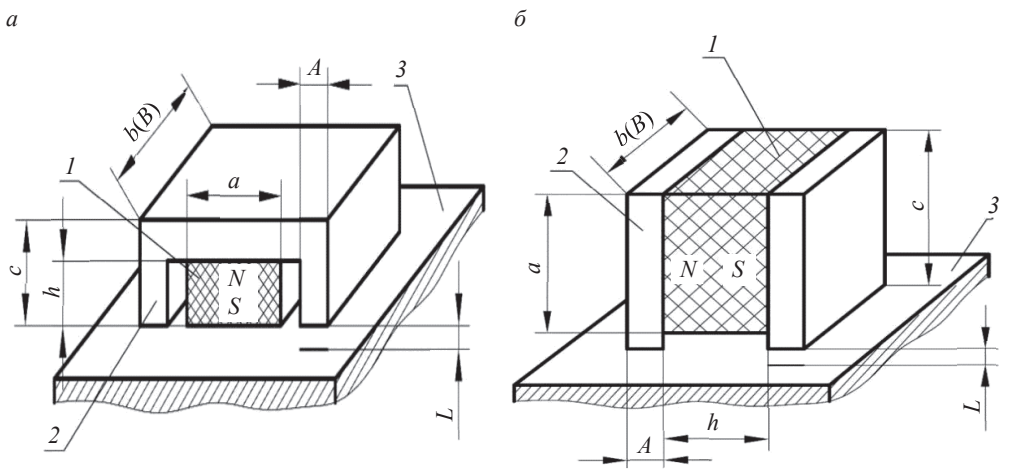

Рисунок 1. Магнитосиловые системы закрытого – *а* и открытого типа – *б*: *a*, *b* – размеры магнита; *A*, *B* – размеры магнитопровода; *c* – высота магнита с магнитопроводом, м; *h* – высота магнита, м; *L* – зазор между магнитной системой и пластиной, м; *S*, *N* – южный и северный полюс магнита, соответственно

Figure 1. Closed – *a* and open – *б* power magnetic systems: *a*, *b* – the magnet; *A*, *B* – the magnetic cores; *c* – height of the magnet with the magnetic core, m; *h* – magnet height, m; *L* – gap between the magnetic system and the plate, m; *S*, *N* – south and north poles of the magnet, respectively

перемычка из магнитомягкого материала. Недостаток рассматриваемой открытой системы заключается в том, что вокруг нее присутствуют магнитные поля, которые не всегда являются полезными. Система открытого типа с возможностью шунтирования потока – это основа для магнитных грузозахватов, магнитных плит для механической обработки и тормозных систем, где нужно регулировать усилие. В работе изучалась зависимость силы притяжения от геометрии магнитной системы, размеров магнитов и полюсных наконечников. Предполагалось, что магниты изготовлены из высококоэрцитивных материалов и характеризуются кривой размагничивания, близкой по форме к прямоугольной. Материал магнитопроводов – магнитомягкая сталь с относительной магнитной проницаемостью $\mu \sim 10^3$ и индукцией магнитного насыщения $B_S \leq 2{,}1$ Тл.

Методы исследований: аналитическое моделирование на основе теории магнитных цепей и максвелловского давления (с допущением о пренебрежимо малом сопротивлении магнитопроводов при индукции не выше $0{,}85\,B_S$, однородном поле в зазоре); численное моделирование методом конечных элементов в пакете FEMM 4.2 для плоских и осесимметричных задач (нелинейные свойства стали, сетка с локальным сгущением в зазоре, сходимость по энергии 10^{-6}); экспериментальная верификация на макетных образцах с магнитами Nd–Fe–B и сталью 10. Сила вычислялась интегрированием тензора Максвелла.

Аналитический расчет силы притяжения. Для анализа зависимости силы притяжения в магнитных системах от их физических и геометрических характеристик произведен расчет силы методом отношений как электромагнитной цепи с сосредоточенными параметрами. Магнитное сопротивление арматуры считалось равным нулю. Для открытой магнитной системы (рис. 1, *б*) выражение для расчета силы притяжения можно представить в следующем виде:

$$F_2 = \frac{B_r^2}{2\mu_0} h^2 \frac{d}{dL}\left(\frac{1}{R_0 + R_L}\right), \tag{1}$$

где B_r – остаточная индукция магнита, Тл; μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; R – магнитное сопротивление отдельных участков замкнутой магнитной цепи, Гн$^{-1}$,

$$\frac{1}{R_0} = \frac{1}{2R_1} + \frac{1}{2R_2} + \frac{1}{R_3}; \quad \frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_{1-1}} + \frac{1}{R_{1-2}} + \ldots + \frac{1}{R_{1-6}};$$

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_{2-1}} + \frac{1}{R_{2-2}} + \frac{1}{R_{2-3}} + \frac{1}{R_{2-4}}; \quad \frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_{3-1}} + \frac{1}{R_{3-2}}; \quad \frac{1}{R_L} = \frac{h}{ab}.$$

Суммарные и частные проводимости определяются следующими соотношениями:

$$R_{1-1} = \frac{Ab}{L}; \quad \frac{1}{R_{1-2}} = \frac{2b}{\pi}\ln\left(1 + \frac{c}{L}\right); \quad \frac{1}{R_{1-3}} = 1{,}04\left(A + b\right);$$

$$\frac{1}{R_{1-4}} = \frac{2b}{\pi}\ln\left(1 + \frac{c-a}{L}\right) \text{ при } L < 1{,}5(c-a);$$

$$\frac{1}{R_{1-4}} = \frac{1{,}28b}{\frac{2L}{c-a} - 1} \text{ при } L < 1{,}5(c-a);$$

$$\frac{1}{R_{1-5}} = \frac{2A}{\pi}\ln\left(1 + \frac{c}{L}\right); \quad \frac{1}{R_{1-6}} = 1{,}23L; \quad \frac{1}{R_{2-1}} = 0{,}26b;$$

$$\frac{1}{R_{2-2}} = \frac{b}{\pi}\ln\left(1 + \frac{2A}{L}\right); \quad \frac{1}{R_{2-3}} = 0{,}154h; \quad \frac{1}{R_{2-4}} = 0{,}5A;$$

$$\frac{1}{R_{3-1}} = 0{,}26\left[c + 4\left(A + h\right)\right]; \quad \frac{1}{R_{3-2}} = \frac{\left[c - 4\left(A + h\right)\right]}{\pi}\ln\left(1 + \frac{2L}{h}\right),$$

когда $c \sim 4(A + h)$, то R_{3-1}, $R_{3-2} \approx 0$, и эти сопротивления можно не учитывать.

Сравнительные расчеты показывают, что допущение о малости сопротивления плоских магнитопроводов выполняется для большинства слаболегированных сталей. В том случае, если индукция магнитного поля B_m в магнитопроводе меньше $0{,}85B_S$: $B_m = B_r \cdot A / (ab(R_1+R_4)) < 0{,}85\ B_S$. Условие $B_m < 0{,}85B_S$ для применимости аналитических формул очень важно, это гарантирует, что магнитопровод работает в линейной области кривой намагничивания с высокой магнитной

проницаемостью, что и позволяет пренебречь его магнитным сопротивлением в расчетах [2, 15]. При приближении к насыщению проницаемость резко падает, сопротивление растет, и формула (1) дает завышенный результат. Расхождение между расчетными значениями силы и определенными экспериментально в области малых зазоров L = 0–1 мм составляет 6–9 %, что для инженерных вычислений вполне допустимо.

Выбор оптимального размера полюсов магнитопроводов, максимальная сила притяжения. Рассмотрим задачу определения оптимального размера A (рис. 1) полюсов в рассматриваемых магнитных системах (другие размеры магнитных полюсов соответствуют размерам магнитов). Будем рассматривать максимальную силу притяжения, которая наступает при нулевом зазоре L. Для расчетов воспользуемся максвелловским подходом к вычислению магнитных натяжений (давлений). Рассматривая электромагнитные силы, Дж. К. Максвелл предложил формулу для удельной поверхностной силы, которую назвал натяжением, действующую на поверхность, в каждой точке которой вектор индукции определен по величине и направлению. Эту силу, действующую, например, на пластину *3* на рис. 1, можно записать так:

$$f = \frac{B_n^2}{2\mu_0}\left(\frac{1}{\mu_3} - \frac{1}{\mu_L}\right),$$

где μ_3, μ_L – магнитная проницаемость пластины *3* и пространства воздушного зазора; B_n – нормальная составляющая индукции магнитного поля около поверхности, Тл.

Сила действует по нормали к поверхности раздела двух сред с разной магнитной проницаемостью и направлена в сторону среды с меньшей магнитной проницаемостью. В нашем случае $\mu_L \sim 1$, $\mu_3 >> 1$, и тогда $f = B_n^2 / (2\mu_0)$. Интегрируя по поверхности тела максвелловское натяжение, мы получаем силу F, действующую на тело, – силу притяжения магнитной системы. Допустим, что зазор L между магнитной системой и пластиной *3* стремится к нулю, и значит, сила притяжения принимает максимальное значение. Будем пренебрегать полями рассеяния и считать, что все магнитное поле сосредоточено в узком зазоре между полюсами магнита, магнитопроводов и магнитной плоскостью. Вследствие малого размагничивающего фактора у магнитов, находящихся в замкнутой магнитной цепи, рабочая точка магнита по индукции будет близка к остаточной индукции B_r. Ввиду непрерывности силовых линий магнитного поля индукция под полюсом магнита также будет $\sim B_r$. Для нахождения индукции B магнитного поля под полюсом магнитопровода можно воспользоваться законом сохранения магнитного потока. Тогда индукция будет равна $B = B_r \cdot a / A$. Выразим максимальную силу притяжения в открытой магнитной системе: $F_{2\max} = B_r^2 \cdot A \cdot b/\mu_0 = B \cdot B_r \cdot a \cdot b / \mu_0$. Из этого выражения следует, что если размеры и свойства магнита заданы, то сила будет тем больше, чем выше значение индукции магнитного поля в полюсе магнитопровода. Значит, максимальная сила достигается, когда индукция в полюсе B_S^* приближается к индукции магнитного насыщения материала магнитопровода B_S (но не достигает ее): $B = B_S^* < B_S$. Тогда оптимальная ширина A^* полюса магнитопровода должна равняться:

$$A^* = \frac{B_r a}{B_S^*}. \qquad (2)$$

Рекомендуется принимать следующее значение индукции магнитного поля в магнитопроводе: $B_S^* = k \cdot B_S$, где k = 0,85–0,90 – коэффициент запаса. Если магнито-

проводы работали при $k = 1$, то магнитная проницаемость стали резко падает (из-за насыщения), и тогда быстро возрастает магнитное сопротивление магнитопровода, возрастают поля рассеяния, а значит, сила притяжения перестает расти с увеличением потока (эффект «насыщения»). Введение запаса $k < 1$ гарантирует, что магнитопровод работает в линейной или слабо нелинейной области кривой намагничивания, где его магнитная проницаемость еще высока, а рассеяние минимально. Это обеспечивает предсказуемость силы притяжения (отсутствие резких провалов при перегрузках), стабильность при температурных колебаниях (индукция насыщения B_S слабо падает с температурой), экономичность – не требуется чрезмерно увеличивать сечение стали, но и не допускается работа на пределе. Максимальную силу притяжения F_2 в открытой магнитной системе можно определить по формуле: $F_{2\max} = B_r \cdot B_S^* \cdot a \cdot b/\mu_0$. Эту формулу можно уточнить, если учесть в ней коэффициент рассеяния $k_\text{р}$, показывающий долю создаваемого магнитом магнитного потока, которая действительно проходит через рабочий зазор:

$$F_{2\max} = \frac{B_r B k k_\text{р}^2 ab}{\mu_0}. \tag{3}$$

Параметр $k_\text{р}$ зависит от формы, размеров магнитопроводов и их магнитных свойств. В рассматриваемом случае взаимодействия при малых зазорах он приблизительно равен 0,9. Аналогичная сила F_1 для закрытой магнитной системы:

$$F_{1\max} = \frac{B_r ab}{2\mu_0} + \frac{B_r B_S^* ab}{2\mu_0} = \frac{B_r B_S kab}{2\mu_0} \cdot \frac{B_r}{kB_S} + 1. \tag{4}$$

Рассеяние магнитных полей в этом случае можно не учитывать. Отношение максимальных сил притяжения следующее:

$$\frac{F_{1\max}}{F_{2\max}} = \frac{1}{2k_\text{р}^2}\left(1 + \frac{B_r}{kB_S}\right). \tag{5}$$

Закрытая система предпочтительнее, когда рассеяние в открытой системе велико:

$$k_p < \sqrt{\frac{\frac{1}{2}\left(1 + kB_S\right)}{B_r}}. \tag{6}$$

Для горных машин (дробилки, мельницы) с большими зазорами и неизбежными полями рассеяния закрытая система обычно дает преимущество в удельной силе притяжения. Открытая система может оказаться сильнее при очень малом рассеянии ($k_\text{р} \to 1$) и одновременно при выполнении $B_r / (k \cdot B_S) < 1$, т. е. для слабых магнитов (например, для сплава $SmCo_5$). В этом случае открытая система может развить силу, сравнимую с закрытой или даже несколько большую, при условии практически идеального замыкания потока ($k_\text{р} \approx 1$), что на практике труднодостижимо. В любом случае, выбор типа системы должен учитывать не только максимальную силу,

но и возможность регулировки (открытая система шунтируется, закрытая – нет), массу, стоимость и технологичность. Для открытой магнитной системы (рис. 1, *б*) с оптимальной геометрией полюсного наконечника A^* зависимость силы притяжения от зазора L с хорошей инженерной точностью описывается формулой, учитывающей выпучивание поля:

$$F(L) = \frac{F_{2\max}}{\left(1 + \frac{2L}{A^*}\right)^2},$$

где F_{2max} – максимальная сила при нулевом зазоре, определяемая по формуле (3).

Физический смысл множителя $(1 + 2L / A^*)$ состоит в том, что с увеличением зазора магнитный поток расширяется примерно на величину L с каждой стороны полюса, эффективная площадь зазора растет, а индукция и, следовательно, сила убывают обратно пропорционально квадрату этого множителя. Для закрытой системы (рис. 1, *а*) аналогичная аппроксимация применима лишь при условии, что под A^* понимается эффективная ширина полюса, полученная из численного моделирования. Численные расчеты методом конечных элементов подтверждают приведенную зависимость для открытой системы с погрешностью 5–7 % в диапазоне $L \leq 0{,}3A^*$. При больших зазорах ($L > 0{,}3A^*$) выпучивание поля становится существенно нелинейным, и предложенная простая формула завышает значения силы.

Численный анализ магнитных силовых систем. Численное моделирование магнитных систем проводилось с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Использовалась бесплатная программа FEMM, которая позволяет моделировать плоские или осесимметричные магнитные поля МКЭ. Программа может успешно использоваться для решения магнитостатических двумерных линейных и нелинейных задач. Изучались магнитные системы, которые содержали постоянные магниты из сплава $SmCo_5$ с остаточной намагниченностью B_r = 0,91 Тл и коэрцитивной силой по индукции H_{cB} = 719 кА/м, а магнитопроводы были выполнены из низкоуглеродистой стали SAE 1006, которая приблизительно соответствует по магнитным свойствам отечественной стали 10 и стали 08кп и имеет относительную магнитную проницаемость $\mu > 104$ и магнитную индукцию насыщения $B_S \approx 2{,}1$ Тл. Аналитическим методом для частного случая при $L \to 0$ и при пренебрежении полями рассеяния показано в (2), что существуют оптимальные размеры магнитных полюсов у магнитопроводов, при которых реализуется максимальная сила притяжения. Численное моделирование подтвердило такой значимый результат для обеих систем, представленных на рис. 1. На рис. 2, *а*, построенном в относительных координатах, видна резкая экстремальная зависимость текущей силы притяжения F_2, приведенной к максимально возможной силе F_{max} от относительной ширины магнитного полюса A / A^*.

Ширина оптимального магнитного полюса, определенного численным моделированием, хорошо совпадает с аналитическим значением при условии, что $B_S^* = 0{,}8–0{,}9B_S$. При несоблюдении этого условия появляются вредные магнитные поля рассеяния. Приведенное ограничение объясняется высоким магнитным сопротивлением полюсов при $B_S^* \to B_S$ из-за низкого значения магнитной проницаемости в области, близкой к магнитному насыщению ферромагнитных материалов. Установлено, что при правильном выборе величины A значения максимальной силы, определенные в результате численного моделирования и рассчитанные по

простым формулам (3), (4), достаточно хорошо совпадают, относительное различие не превышает 5–7 %. Формула (5), показывающая различие силовых характеристик открытой и закрытой магнитных систем, также хорошо подтверждается.

Оптимальная ширина A^* магнитного полюса слабо зависит от ширины магнита h. Однако сила притяжения от ширины магнита зависит потому, что от ширины меняется сопротивление путей рассеяния магнитного потока в системах. Численным методом исследована зависимость силы притяжения от ширины магнитов при условии сохранения оптимальной ширины полюса A. Результаты расчетов в обобщенном виде приведены на рис. 2, *б*, из которого видно, что при ширине магнита $h > 2A$ максимальная сила возрастает слабо. Увеличение толщины магнита h сверх $2A^*$ приводит к незначительному росту силы (менее 5–10 %), но требует удвоения объема дорогостоящего магнитотвердого материала, что экономически нецелесообразно.

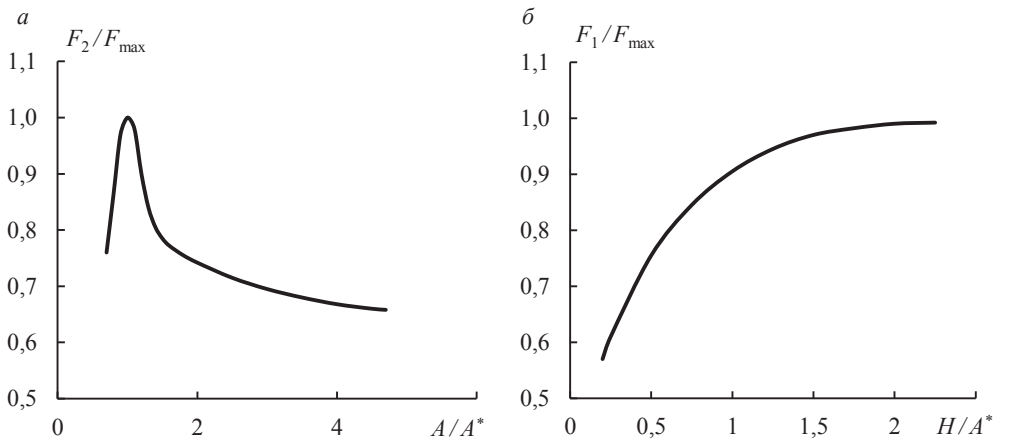

Рисунок 2. Обобщенная зависимость удельной ширины магнитного полюса A/A^* от отношения текущей силы F_2 к ее максимальному значению F_{max} – *а*; зависимость относительной силы притяжения F_1/F_{max} от удельной ширины постоянного магнита – *б*

Figure 2. Generalized dependence of the specific width of the magnetic pole A/A^* on the ratio of the current force F_2 to its maximum value F_{max} – *а*; dependence of the relative attractive force F_1/F_{max} on the specific width of a permanent magnet – *б*

Экспериментальные результаты. Испытаны макеты с магнитами $SmCo_5$ и полюсами из стали 10 (ширина A варьировалась от $0{,}5A$ до $2A^*$). Измерение силы притяжения выполнено на рычажном стенде. Стальная плита (контртело) закреплена на одном плече рычага, второй конец рычага связан с тензометрическим датчиком силы. Зазор L устанавливался с помощью набора калиброванных немагнитных прокладок. Каждое измерение повторялось не менее пяти раз, для расчета принималось максимальное значение.

Испытания макетов подтвердили справедливость формул (3)–(5): расхождение с экспериментом при нулевом зазоре составило 5–7 %, для зазоров до 3 мм погрешность формулы (6) не превышала 10 %. Подтверждено, что закрытая система дает выигрыш в силе 10–20 % по сравнению с открытой при одинаковых магнитах и оптимальных полюсах. Увеличение толщины магнита свыше $2A^*$ дает прирост силы менее 5 %.

Сравнение с альтернативами. Массивы Хальбаха могут дать выигрыш до 20–30 % при больших зазорах (>2 мм), но требуют сложной сборки из множества сегментов, намагниченных в разных направлениях, что резко удорожает конструк-

цию по сравнению с рассматриваемыми топологиями. Для зазоров ≤1 мм (типичных для подшипников) предложенные варианты оптимальны. Для грузозахватов с зазорами 2–5 мм рекомендуется гибридная схема со встречной поляризацией магнитов, снижающая рассеяние.

Заключение. Проведен силовой анализ двух магнитных систем с постоянными магнитами, предназначенных для задач магнитной разгрузки, фиксации и грузозахвата в горном деле. Закрытая система предпочтительнее в том случае, когда рассеяние в открытой системе велико. Для горных машин (дробилки, мельницы) с большими зазорами и неизбежными полями рассеяния закрытая система обычно дает выигрыш. Открытая система позволяет получить большую силу притяжения при очень малом рассеянии и использовании магнитов с низкой остаточной намагниченностью. Система открытого типа (с плоскими магнитопроводами) удобна для магнитных грузозахватов с отключаемым полем, что позволяет безопасно переносить руду, скрап и крупногабаритные детали [7, 14]. Приведены приближенные аналитические выражения для оценки силы притяжения. С использованием представлений Максвелла получены формулы для максимальной силы при нулевом зазоре (3), (4). Погрешность инженерных формул не превышает 7 %, что достаточно для проектирования [15]. Теоретически и численно обосновано существование оптимальной ширины полюса. Для повышения силы в ответственных узлах (например подшипниках тяжелых конусных дробилок) рекомендуется использовать сплав на основе Fe–Co–V (B_S до 2,4 Тл), что повышает силу на 15–20 % при тех же габаритах. Показано, что увеличение толщины магнита сверх $2A^*$ нецелесообразно. Результаты работы могут быть непосредственно использованы при разработке нового поколения пассивных магнитных подшипников для горного оборудования, магнитных систем разгрузки опор, управляемых грузозахватов для карьеров и обогатительных фабрик, а также устройств быстрой фиксации при ремонте и монтаже [10–12, 14, 16, 17]. Полученные силовые зависимости являются основой для более сложных расчетов сепарационных и защитных устройств, в дальнейшем планируется развитие моделей с учетом градиентных факторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Болотов А. Н., Хренов В. Л. Триботехника магнитопассивных опор скольжения. Тверь: ТГТУ, 2008. 124 с.

2. Постоянные магниты / под ред. Ю. М. Пятина. М.: Энергия, 1971. 486 с.

3. Верников А. Я. Магнитные и электромагнитные приспособления в металлообработке. М.: Машиностроение, 1984. 157 с.

4. Болотов А. Н., Новиков В. В., Новикова О. О. Расчет и оптимизация постоянных магнитов для специальных подшипниковых опор. Тверь: ТвГТУ, 2023. 124 с.

5. Zhu LuShan, Zheng XiongSheng. Design of a curved surface adaptive permanent magnet wall climbing robot // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2405(1). Art. 012028. DOI: 10.1088/1742-6596/2405/1/012028

6. Болотов А. Н., Бурдо Г. Б. Аналитическое моделирование взаимодействия постоянных магнитов из закритических материалов // Вестник ТвГТУ. Сер. «Технические науки». 2022. №. 2(14). С. 69–76. DOI: 10.46573/2658-5030-2022-2-69-76

7. Игнаткина Е. Л., Белослудцев А. С. Преимущества использования грузозахватных устройств подъемных кранов с магнитным принципом действия // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития. 2026. №. VIII. С. 283–287.

8. Резино-магнитная футеровка. Уральский завод футеровочных РТИ, 2023. URL: https://www.uralfrti.ru/rubber-magnetic (дата обращения: 17.06.2026).

9. Алтынников Н. А., Плащинский В. А., Иванов С. Л. Классификация футеровок шаровых барабанных мельниц // ГИАБ. 2026. № 5. С. 5–19. DOI: 10.25018/0236.1493.2026.5.0.5

10. Eriez magnetic mill liner provides unmatched performance. Austmine, 2022. URL: https://austmine.imiscloud.com/Web/Web/News-esources/Articles/2022/March/Eriez-Magnetic-Mill-Liner-Provides-Unmatched-Performan (дата обращения: 17.06.2026)

11. Гордин С. А., Захаров А. Ю., Захарова А. Г., Атрушкевич В. А. Перспективы создания конвейера с магнитным подвесом ленты для горной промышленности // Техника и технология горного дела. 2025. № 2. С. 40–62.

12. Eto H., Asada H. H. Development of a wheeled wall-climbing robot with a shape-adaptive magnetic adhesion mechanism // 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2020. P. 9329–9335. DOI: 10.1109/ICRA40945.2020.9196919

13. Samanta P., Hirani H. On the evolution of passive magnetic bearings // ASME Journal of Tribology. 2022. Vol. 144(4). P. 1–50. DOI: 10.1115/1.4051815

14. Kun Hu, Zhuo Chen, Wangqian Qian, Hao Jiang, Gang Xu. Control study on support system of permanent magnetic levitation belt conveyor with controllable magnetic circuit // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2025. Vol. 239. No. 19. P. 7728–7744.

15. Красильников А. Я., Красильников А. А. Расчет силы притяжения высококоэрцитивных постоянных магнитов в торцевых магнитных муфтах и плоских магнитных системах // Вестник машиностроения. 2010. № 6. С. 13–16.

16. Khopunov E. A., Shatailov Iu. L., Voronchikhin S. L., Shatailov A. Iu. The impact of a magnetic field on the wear of the grinding bodies, lining, and ore disintegration // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal. 2018. No. 8. P. 75–82.

17. Лапшин В. Л., Немчинова Н. В., Илизаров Д. Л., Нижегородов А. И. Трехмассная механореологическая модель процесса вибрационной сепарации минерального сырья // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16. № 3. С. 1353–1362. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1353-1362

Поступила в редакцию 7 июля 2026 года

Сведения об авторах:

Болотов Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной физики Тверского государственного технического университета. E-mail: alnikbltov@rambler.ru; https://orcid.org/0000-0003-4054-5550

Яблонев Александр Львович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидравлики, теплотехники и гидропривода Тверского государственного технического университета. E-mail: alvovich@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-9774-8557

DOI: 10.21440/0536-1028-2026-5-37-49

Features of the structure and calculation of power magnetic systems for use in mining

Alexandr N. Bolotov[1], Alexandr L. Iablonev[1]
[1] Tver State Technical University, Tver, Russia.

Abstract

Research objective *is to establish the dependence of magnetic force properties of typical magnetic systems on their geometric dimensions and on materials' magnetic properties for the subsequent design of passive magnetic bearings, load grippers, clamps and other mechanisms in mining engineering.*

Methods of research. *This paper examines two systems with permanent magnets – closed and open-designed to generate high magnetic attraction forces. These systems are used in mining engineering for unloading bearing assemblies, securing heavy components, and magnetically gripping ferromagnetic loads. The systems differ in their functional properties and maximum attractive force. Analytical calculation based on magnetic circuit theory was used, as well as numerical modeling using the finite element method (FEMM 4.2), and experimental testing of prototypes. The discrepancy between the results does not exceed 9%.*

Results. *Approximate formulas for calculating the attractive force depending on the physical and geometric parameters of the systems are obtained. Simple analytical relationships are presented for estimating the attractive force at zero magnetic gap, which are obtained taking into account the Maxwellian magnetic pressure on the surface.*

Conclusions. *To achieve maximum attractive force, the cross-sectional area of the pole pieces should be such that the magnetic field induction within them is approximately 10% lower than the saturation magnetic induction of the magnetic core material. It has been shown that the attractive force increases slightly with magnet thicknesses exceeding twice the optimal magnetic pole piece thickness. These results can be used in the design of passive magnetic bearings for crushers and mills, magnetic ore grippers, and lining and support clamping devices.*

Keywords: *magnetic attraction force; permanent magnets; magnetic system; mining; bearing unloading; magnetic gripper; passive magnetic bearing; magnetization.*

REFERENCES

1. Bolotov A. N., Khrenov V. L. *Triboengineering of magnetic passive sliding supports.* Tver: TSTU Publishing; 2008. (In Russ.)

2. Piatin Iu. M. (ed.) *Permanent magnets.* Moscow: Energiia Publishing; 1971. (In Russ.)

3. Vernikov A. Ia. *Magnetic and electromagnetic devices in metalwork.* Moscow: Mashinostroenie Publishing; 1984. (In Russ.)

4. Bolotov A. N., Novikov V. V., Novikova O. O. *Calculation and optimization of permanent magnets for special bearing supports*. Tver: TSTU Publishing; 2023. (In Russ.)

5. Zhu LuShan, Zheng XiongSheng. Design of a curved surface adaptive permanent magnet wall climbing robot. *Journal of Physics: Conference Series.* 2022; 2405(1): 012028. DOI: 10.1088/1742-6596/2405/1/012028

6. Bolotov A. N., Burdo G. B. Analytical modeling of the interaction of permanent magnets made of supercritical materials. *Vestnik TvGTU. Ser. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of Tver State Technical University. Series: Engineering Sciences.* 2022; 2(14): 69–76. (In Russ.) DOI: 10.46573/2658-5030-2022-2-69-76

7. Ignatkina E. L., Belosludtsev A. S. Advantages of using crane grippers with magnetic operating principle // *Maintenance of water transport: problems and development pathways.* 2026; 8: 283–287. (In Russ.)

8. *Rubber-magnetic lining.* Ural Rubber Lining Plant, 2023. (In Russ.) Available from: https://www.uralfrti.ru/rubber-magnetic [Accessed 17 June 2026].

9. Altynnikov N. A., Plashchinskii V. A., Ivanov S. L. Classification of ball mill linings. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal).* 2026; 5: 5–19. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236.1493.2026.5.0.5

10. *Eriez magnetic mill liner provides unmatched performance.* Austmine, 2022. Available from: https://austmine.imiscloud.com/Web/Web/News-esources/Articles/2022/March/Eriez-Magnetic-Mill-Liner-Provides-Unmatched-Performan [Accessed 17 June 2026]

11. Gordin S. A., Zakharov A. Y., Zakharova A. G., Atrushkevich V. A. Prospects for creating a conveyor for the mining industry with magnetic leaving belts. *Tekhnika i tekhnologiia gornogo dela = Journal of Mining and Geological Engineering*. 2025; 2: 40–62. (In Russ.)

12. Eto H., Asada H. H. Development of a wheeled wall-climbing robot with a shape-adaptive magnetic adhesion mechanism. In: *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2020. P. 9329–9335. DOI: 10.1109/ICRA40945.2020.9196919

13. Samanta P., Hirani H. On the evolution of passive magnetic bearings. *ASME Journal of Tribology.* 2022; 144(4): 1–50. DOI: 10.1115/1.4051815

14. Kun Hu, Zhuo Chen, Wangqian Qian, Hao Jiang, Gang Xu. Control study on support system of permanent magnetic levitation belt conveyor with controllable magnetic circuit. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science.* 2025; 239(19): 7728–7744.

15. Krasilnikov A. Ia., Krasilnikov A. A. Calculating gravitational forces of high-coercivity permanent magnets in face-type magnetic couplings and planar magnetic systems. *Vestnik mashinostroeniia = Russian Engineering Research.* 2010; 6: 13–16. (In Russ.)

16. Khopunov E. A., Shatailov Iu. L., Voronchikhin S. L., Shatailov A. Iu. The impact of a magnetic field on the wear of the grinding bodies, lining, and ore disintegration. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2018; 8: 75–82.

17. Lapshin V. L., Nemchinova N. V., Ilizarov D. L., Nizhegorodov A. I. Three-mass mechanorheological model of the process of vibrational separation of mineral raw materials. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories.* 2024; 16(3): 1353–1362. (In Russ.) DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1353-1362

Received 7 July 2026

Information about the authors:

Alexandr N. Bolotov – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of Applied Physics, Tver State Technical University. E-mail: alnikbltov@rambler.ru; https://orcid.org/0000-0003-4054-5550
Alexandr L. Iablonev – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of Hydraulics, Heat Engineering, and Hydraulic Drive, Tver State Technical University. E-mail: alvovich@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-9774-8557

Для цитирования: Болотов А. Н., Яблонев А. Л. Особенности структуры и расчета силовых магнитных систем для применения в горном деле // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2026. № 5. С. 37–49. DOI: 10.21440/0536-1028-2026-5-37-49
For citation: Bolotov A. N., Iablonev A. L. Features of the structure and calculation of power magnetic systems for use in mining. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering.* 2026; 5: 37–49 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2026-5-37-49