

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПОЛЮСНОГО НАКОНЕЧНИКА НА СРОК СЛУЖБЫ СТОЯНОЧНОГО МАГНИТОЖИДКОСТНОГО УПЛОТНЕНИЯ

С. Г. ШАРИНА¹⁾, М. С. КРАКОВ^{1), 2)}

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

²⁾Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Представлены результаты численного моделирования задачи об изменении концентрации магнитных частиц во времени в магнитоожидкостном уплотнении (МЖУ), работающем в стояночном режиме. Отмечено, что процесс переконцентрации определяется балансом магнитофореза и концентрационной диффузии. Расчеты проведены для двух наиболее распространенных геометрий полюсного наконечника – треугольной и прямоугольной. В вычислениях использованы коэффициент диффузии, зависящий от концентрации магнитных частиц, и модифицированное выражение для описания подвижности магнитных частиц. Выполнено сравнение влияния геометрий полюсного наконечника на срок службы МЖУ. Под действием высокоградиентного магнитного поля в МЖУ магнитные частицы стремятся в область большей напряженности магнитного поля. В результате этого в зазоре МЖУ концентрация магнитных частиц существенно возрастает, что влечет за собой увеличение вязкости магнитной жидкости. Чрезмерное увеличение вязкости магнитной жидкости может привести к невозможности вращения вала, т. е. выходу уплотнения из строя. Сроком службы МЖУ считается то время, за которое магнитная жидкость в зазоре МЖУ теряет текучесть. Определено, что срок службы МЖУ с треугольной геометрией полюсного наконечника превышает срок службы МЖУ с прямоугольной геометрией полюсного наконечника. При использовании вакуумного масла в качестве жидкости-основы время безотказной работы МЖУ в зависимости от его параметров может составлять от месяца до нескольких лет.

Ключевые слова: диффузия; магнитофорез; магнитная жидкость; численные методы; компьютерное моделирование.

Благодарность. Исследование выполнено в рамках научно-исследовательской работы «Динамика процессов тепло- и массопереноса в коллоидах магнитных наночастиц» (государственная программа научных исследований «Энергетические и ядерные процессы и технологии», подпрограмма «Энергетические процессы и технологии», задание 2.21 «Развитие теории массопереноса в коллоидах и суспензиях для определения режимов магнитореологической обработки, обеспечивающей повышение лучевой стойкости поверхностей элементов мощных лазерных систем»).

Образец цитирования:

Шарина СГ, Краков МС. Влияние геометрии полюсного наконечника на срок службы стояночного магнитоожидкостного уплотнения. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2025;2:19–30.
EDN: PYCLKV

For citation:

Sharyna SG, Krakov MS. The influence of pole piece geometry on the lifespan of the stationary magnetic fluid seal. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2025;2:19–30. Russian.
EDN: PYCLKV

Авторы:

Софья Григорьевна Шарина – ассистент кафедры компьютерного моделирования физического факультета.
Михаил Самуилович Краков – доктор физико-математических наук, профессор; профессор кафедры компьютерного моделирования физического факультета¹⁾, профессор кафедры ЮНЕСКО «Энергосбережение и возобновляемые источники энергии» факультета технологий управления и гуманитаризации²⁾.

Authors:

Sofiya G. Sharyna, assistant at the department of computer modelling, faculty of physics.
sharynasg@bsu.by
<https://orcid.org/0009-0009-2939-6145>
Mikhail S. Krakov, doctor of science (physics and mathematics), full professor; professor at the department of computer modelling, faculty of physics^a, and professor at the UNESCO department «Energy saving and renewable energy sources», faculty of management technologies and humanities^b.
krakov@bntu.by
<https://orcid.org/0000-0001-8458-5138>

THE INFLUENCE OF POLE PIECE GEOMETRY ON THE LIFESPAN OF THE STATIONARY MAGNETIC FLUID SEAL

S. G. SHARYNA^a, M. S. KRAKOV^{a, b}

^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^bBelarusian National Technical University, 65 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220013, Belarus

Corresponding author: S. G. Sharyna (sharynasg@bsu.by)

Abstract. The paper presents the results of a numerical simulation of the problem of changing the concentration of magnetic particles over time in a magnetic fluid seal (MFS) operating in the standby mode. It is noted that the process of reconcentration is determined by the balance of magnetophoresis and concentration diffusion. The study was performed for the two most common pole piece geometries – triangular and rectangular. The governing equations take into account the diffusion coefficient's dependence on the concentration of magnetic particles and a modified expression for the mobility of magnetic particles. A comparison of the influence of pole piece geometry on the MFS lifespan was carried out. Under the influence of a high-gradient magnetic field in the MFS, magnetic particles tend to the region of higher magnetic field strength. As a result, the concentration of magnetic particles in the gap of the MFS increases significantly, which leads to an increase the viscosity of the magnetic fluid. Excessive increase in the viscosity of the magnetic fluid may result in the shaft not being able to rotate, i. e., seal failure. The lifespan of the MFS is considered to be the time during which the magnetic fluid in the gap of the MFS loses its fluidity. It was determined that the lifespan of the MFS with a triangular pole piece geometry exceeds the lifespan of the MFS with a rectangular pole piece geometry. When using vacuum oil as the base fluid, the failure-free operation time of the MFS, depending on its parameters, can range from a month to several years.

Keywords: diffusion; magnetophoresis; magnetic fluid; numerical methods; computer simulation.

Acknowledgements. The study was carried out within the framework of the research work «Dynamics of heat and mass transfer processes in colloids of magnetic nanoparticles» (state programme of scientific research «Energy and nuclear processes and technologies», subprogramme «Energy processes and technologies», assignment 2.21 «Development of the theory of mass transfer in colloids and suspensions to determine the modes of magnetorheological processing, ensuring the radiation resistance of elements of powerful laser systems»).

Введение

Магнитожидкостные уплотнения (МЖУ) используются в различных областях промышленности, где необходимо обеспечить герметизацию подвижных частей механизмов [1]. МЖУ обладают большей надежностью по сравнению с механическими или сальниковыми уплотнениями. Они формируют герметичный жидкий барьер между разделяемыми средами и обеспечивают низкое трение между подвижными частями механизмов. МЖУ могут применяться для разделения таких сред, как жидкость [2], газ [3] или вакуум [4].

Схематически конструкция МЖУ представлена на рис. 1. Внутри корпуса, изготовленного из немагнитного материала, находятся полюс, состоящий из постоянного магнита и полюсных наконечников, магнитопроводящий вал и магнитная жидкость, являющаяся основным рабочим веществом (уплотняющим агентом) в МЖУ. Магнитная жидкость располагается в зазоре между полюсными наконечниками и валом и удерживается в нем высокоградиентным магнитным полем. Основными компонентами магнитной жидкости являются жидкость-основа и магнитные частицы, покрытые слоем стабилизатора для предотвращения их агрегации [5].

МЖУ способны работать в стояночном, низкоскоростном и высокоскоростном режимах [5]. Основным режимом работы МЖУ является низкоскоростной режим, при котором скорость поверхности вала составляет величину $u \leq 5$ м/с. При больших скоростях (высокоскоростной режим) на характеристики МЖУ начинают влиять тепловыделение из-за вязкого трения и центробежные силы, которые стремятся выбросить магнитную жидкость из рабочего зазора. Особенностью стояночного режима, рассматриваемого в настоящей работе, является отсутствие движения магнитной жидкости в зазоре на протяжении длительного периода, что приводит к изменению характеристик магнитной жидкости во времени.

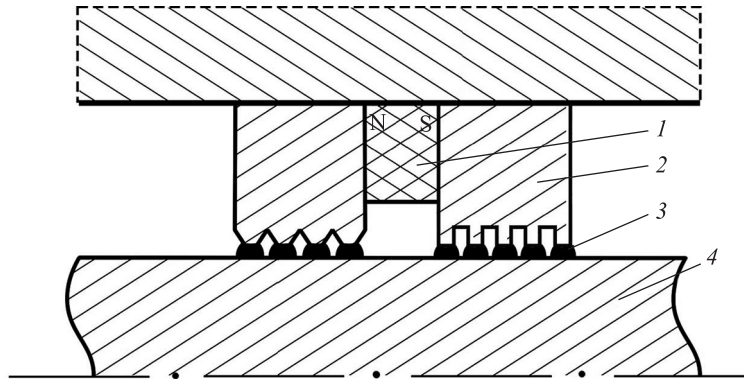


Рис. 1. Схема МЖУ: 1 – постоянный магнит; 2 – полюсные наконечники; 3 – магнитная жидкость; 4 – вал
Fig. 1. Sketch of a magnetic fluid seal: 1 – permanent magnet; 2 – pole pieces; 3 – magnetic fluid; 4 – shaft

В отсутствие внешнего магнитного поля магнитная жидкость представляет собой устойчивый коллоидный раствор. Однако в реальных МЖУ под полюсным наконечником на магнитную жидкость действует высокоградиентное неоднородное магнитное поле, под влиянием которого магнитные частицы стремятся в область с наибольшей напряженностью магнитного поля. Как следствие, в зазоре под полюсным наконечником концентрация магнитных частиц увеличивается, а в области с меньшей напряженностью магнитного поля уменьшается. Противоположно магнитофореzu действует концентрационная диффузия, стремящаяся равномерно распределить магнитные частицы в объеме магнитной жидкости [6]. Одновременно с изменением концентрации магнитных частиц изменяется вязкость магнитной жидкости, что оказывает влияние на интенсивность как магнитофореzu, так и концентрационной диффузии. Кроме того, рост вязкости магнитной жидкости при высокой концентрации магнитных частиц может привести к потере текучести магнитной жидкостью, что означает выход МЖУ из строя.

В предыдущих публикациях (см. [7–9]) коэффициент диффузии полагался постоянным. В работе [10] исследовалась диффузия магнитных частиц в МЖУ с треугольной геометрией полюсного наконечника до образования плотной упаковки частиц в зазоре. При вычислении коэффициента диффузии использовалась его зависимость от концентрации магнитных частиц, предложенная в статье [11]. Данная зависимость основывается в том числе на предположении Рассела о зависимости относительной подвижности магнитных частиц от их концентрации вида $K(c) = (1 - c)^{6,55}$, где c – безразмерная объемная концентрация магнитных частиц вместе с оболочкой ПАВ в суспензии, определяемая как отношение объема частиц в суспензии к объему самой суспензии. Однако это предположение является справедливым при небольших концентрациях магнитных частиц, но, очевидно, не работает при концентрациях, близких к плотной упаковке, когда подвижность частиц стремится к нулю. В работе [12] исследовалась диффузия магнитных частиц в МЖУ с прямоугольной геометрией полюсного наконечника. При вычислении коэффициента диффузии в этом случае использовалось модифицированное выражение для описания подвижности магнитных частиц. Данное выражение основывается на предположении о том, что магнитная жидкость теряет текучесть при нулевой подвижности магнитных частиц, которая, в свою очередь, достигается при концентрации частиц,

близкой к плотной упаковке, и имеет вид $K(c) = \left(1 - \frac{c}{0,605}\right)^{6,55 \cdot 0,605}$, где $c = 0,605$ – экспериментальное

значение концентрации магнитных частиц, при которой магнитная жидкость теряет текучесть [13].

Важным элементом МЖУ является полюсный наконечник. Геометрия полюсного наконечника влияет на степень неоднородности магнитного поля, от которой зависят интенсивность магнитофореzu в зазоре и, следовательно, срок службы МЖУ. Как отмечено выше, в работах [10; 12] проведены расчеты для разных геометрий полюсного наконечника с использованием различных выражений для вычисления коэффициента диффузии. Выполненное ранее сравнение влияния геометрий полюсного наконечника на характеристики стояночного МЖУ [14] было неполным и не учитывало модифицированное выражение для описания подвижности магнитных частиц.

Целью настоящей работы является объединение и обобщение результатов расчетов критической концентрации, при которой магнитная жидкость теряет текучесть, а также срока службы МЖУ в зависимости от величины напряженности магнитного поля под полюсным наконечником. В статье сравниваются две геометрии полюсного наконечника при использовании модифицированного выражения для описания подвижности магнитных частиц. Выполненное сравнение позволит определить, как геометрия полюсного наконечника влияет на срок службы МЖУ, и выявить, при какой геометрии полюсного наконечника срок службы МЖУ будет максимальным.

Формулировка задачи

Геометрия полюсного наконечника. Расчетная область представляет собой участок под многозубым полюсом МЖУ, выбранный с учетом симметрии (рис. 2). В работе рассмотрены две наиболее распространенные геометрии полюсного наконечника – треугольная и прямоугольная. Для треугольного полюсного наконечника угол между горизонтальной и наклонной частями принят равным 45° (наиболее распространенный вариант). Изменение угла влияет на величину напряженности магнитного поля под полюсным наконечником. Граница раздела между магнитной жидкостью и окружающей средой определена по изолинии постоянного значения напряженности магнитного поля под полюсным наконечником, исходя из заданного объема магнитной жидкости.

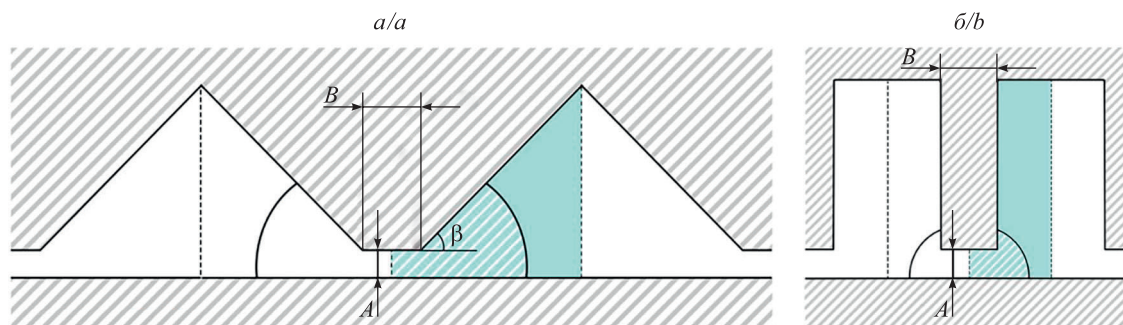


Рис. 2. Расчетная область для треугольной (а) и прямоугольной (б) геометрий полюсного наконечника (А – зазор между полюсным наконечником и валом; В – ширина основания полюсного наконечника; $\beta = 45^\circ$ – угол между горизонтальной и наклонной частями полюсного наконечника)

Fig. 2. Calculation domain for a triangular (a) and rectangular (b) pole piece geometries (A – the gap between the pole piece and the shaft; B – the width of the pole piece base; $\beta = 45^\circ$ – the angle between the horizontal and inclined parts of the pole piece)

Уравнение диффузии. Уравнение, описывающее диффузию броуновских частиц через их объемную концентрацию¹, имеет вид

$$\rho \frac{\partial c}{\partial t} + \text{div} \mathbf{j} = 0, \quad (1)$$

где ρ – плотность; $\mathbf{j}$ – поток массы; t – время.

Поток массы определим по формуле, предложенной в статье [11], с учетом приближений согласно работе [10], где используется коэффициент диффузии в приближении твердых сфер для идеальной магнитной жидкости. Тогда второй член уравнения (1) может быть записан в виде

$$\text{div} \mathbf{j} = \rho D_0 K(c) \left[c \frac{\mu_0 m_p}{kT} \nabla H - \left(1 + \frac{2c(4-c)}{(1-c)^4} \right) \nabla c \right], \quad (2)$$

где $D_0 = \frac{kT}{6\pi\eta_0 R}$ – эйнштейновский коэффициент диффузии для разбавленных растворов; $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$ – постоянная Больцмана; T – температура; η_0 – динамическая вязкость магнитной жидкости при отсутствии магнитных частиц; R – радиус частицы вместе с оболочкой ПАВ; $K(c) = \frac{b}{b_0} - \frac{b}{b_0} \frac{b_0}{b}$ – относительная подвижность частиц в магнитной жидкости; b – подвижность частиц в суспензии; b_0 – подвижность частиц в чистом растворе; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная; m_p – магнитный момент частицы; H – напряженность магнитного поля. Члены в квадратных скобках описывают магнитофорез и броуновскую концентрационную диффузию соответственно.

Для рассматриваемой задачи относительную подвижность магнитных частиц можно описать выражением Рассела (см. [15; 16]), модифицированным в предположении, что магнитная жидкость теряет текучесть при достижении концентрации $c = 0,605$ [12], в соответствии с формулой Чонга [13]:

$$K(c) = \left(1 - \frac{c}{0,605} \right)^{3,963}. \quad (3)$$

¹Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Гидродинамика : учеб. пособие. 3-е изд., перераб. М. : Наука, 1986. 736 с. (Теоретическая физика : в 10 т. ; т. 6).

Окончательно уравнение переноса (1) с учетом выражений для потока массы (2) и относительной подвижности магнитных частиц (3) принимает вид

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_0 \nabla \left[K(c) \left(G(c) \nabla c - c \frac{\mu_0 m_p}{kT} \nabla H \right) \right], \quad (4)$$

где $K(c) = \left(1 - \frac{c}{0,605} \right)^{3,963}$; $G(c) = \left(1 + \frac{2c(4-c)}{(1-c)^4} \right)$.

Уравнения, описывающие магнитное поле. Для описания магнитного поля под полюсным наконечником, как и в работах [10; 12], использованы статические уравнения Максвелла. Введен потенциал напряженности магнитного поля φ . Напряженность магнитного поля вычислена с использованием уравнений

$$H = \nabla \varphi, \quad \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0. \quad (5)$$

Граничные условия. Граничные условия заданы аналогично работам [10; 12], где, исходя из симметричности задачи на правой и левой границах, производная по нормали от потенциала равна нулю ($\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$), потенциал напряженности магнитного поля на поверхности вала равен нулю ($\varphi = 0$), а потенциал напряженности магнитного поля на поверхности полюса составляет величину $\varphi = H_0 A$, где H_0 – напряженность магнитного поля на оси симметрии полюсного наконечника ($x = 0$).

Граничным условием для уравнения (4) является равенство потока массы нулю на всех границах магнитной жидкости:

$$\mathbf{j} = K(c) \left(G(c) \nabla c - c \frac{\mu_0 m_p}{kT} \nabla H \right) = 0.$$

Безразмерные уравнения. В безразмерном виде уравнения (5) остаются неизменными, а уравнение (4) записывается следующим образом:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \left[K(c) \left(G(c) \nabla c - c U \nabla H \right) \right], \quad U = \frac{\mu_0 m_p H_0}{kT}, \quad (6)$$

где в качестве характерных величин определены масштабы расстояния (A) и времени ($\frac{A^2}{D_0}$). Размерные

и безразмерные величины связаны следующими соотношениями: $x = A\hat{x}$, $y = A\hat{y}$, $t = \frac{A^2}{D_0}\hat{t}$, $H = H_0\hat{H}$, $\varphi = H_0 A\hat{\varphi}$, $\nabla = \frac{1}{A}\hat{\nabla}$. В уравнении (6) крышечки над безразмерными величинами убраны для удобства.

Численный метод

Решение диффузионной задачи осуществляется с помощью численного метода контрольных объемов [17; 18] на треугольной структурированной сетке. Пример сетки для двух геометрий полюсного наконечника приведен на рис. 3. Данный метод аналогичен методу, использованному в работах [10; 12].

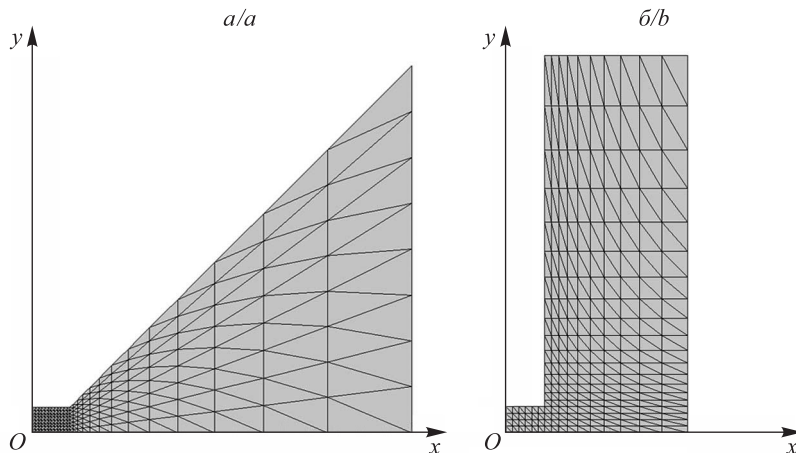


Рис. 3. Сетка для треугольной (а) и прямоугольной (б) геометрий полюсного наконечника

Fig. 3. Mesh for a triangular (a) and rectangular (b) pole piece geometries

В выбранном численном методе для вычисления потенциала напряженности магнитного поля и концентрации магнитных частиц используется линейное распределение величины на треугольном элементе. Для нахождения напряженности и градиента напряженности магнитного поля в зазоре применяется метод обратных расстояний [19]. Численно нестационарная задача решается с использованием явной схемы Эйлера. Условием прекращения счета принимается увеличение вязкости магнитной жидкости на поверхности вала в 40 раз по сравнению с первоначальной вязкостью. Наиболее распространенной магнитной жидкостью для вакуумных уплотнений является жидкость на основе вакуумного масла, динамическая вязкость которого составляет величину $\eta_0 = 0,08 \text{ Па} \cdot \text{с}$. При начальной объемной концентрации магнитных частиц $c_0 = 0,3$ вязкость магнитной жидкости в соответствии с формулой Чонга [13] равна $0,25 \text{ Па} \cdot \text{с}$. Увеличение вязкости в 40 раз означает, что она достигает величины $\eta = 10 \text{ Па} \cdot \text{с}$ (соответствует вязкости битума). При такой вязкости вращение вала становится практически невозможным, т. е. уплотнение выходит из строя. Компьютерный код для решения задачи реализован на языке C++.

Результаты и их обсуждение

Решение задачи диффузии магнитной жидкости в МЖУ осуществлялось для двух геометрий полюсного наконечника. Поскольку размер области, занимаемой магнитной жидкостью, значительно меньше радиуса вала, задача считалась двумерной. В качестве величины, характеризующей объем магнитной жидкости в зазоре, была выбрана площадь сечения в расчетной области, занятая магнитной жидкостью. Для всех расчетов эта величина составляла $2,39 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$, что соответствует размеру области вдоль вала, занятой магнитной жидкостью, около $0,45 \text{ мм}$ при ширине рабочего зазора $0,1 \text{ мм}$. Этот размер оставался неизменным для всех вариантов расчетов, т. е. сохранялась площадь контакта с валом. Для вычислений использовались сетки, выбранные как оптимальные в предыдущих исследованиях: сетка для треугольной геометрии полюсного наконечника состояла из 55 056 узлов [10], а сетка для прямоугольной геометрии полюсного наконечника – из 50 941 узлов [12]. Поскольку целью работы являлось определение лучшей геометрии полюсного наконечника с точки зрения срока службы МЖУ, то расчеты для двух геометрий проводились при оптимальных значениях параметров, установленных в предыдущих работах: $c_0 = 0,3$, $A = 0,1 \text{ мм}$, $B = 0,3 \text{ мм}$.

В процессе счета контролировалось среднее значение концентрации магнитных частиц в объеме магнитной жидкости. Эта величина изменялась в пределах лишь около $0,001 \%$ на протяжении 10^6 шагов по времени (величина одного шага по времени составляла $\tau = 2 \cdot 10^{-5}$), что свидетельствует о выполнении закона сохранения массы, т. е. численная схема является консервативной.

Вначале были рассчитаны напряженность и градиент напряженности магнитного поля под полюсным наконечником. Для обеих геометрий полюсного наконечника максимальная напряженность магнитного поля достигается в зазоре под горизонтальной площадкой полюсного наконечника (рис. 4, а и б). Максимальный градиент напряженности магнитного поля достигается в угле между горизонтальной и наклонной (при треугольной геометрии) или вертикальной (при прямоугольной геометрии) частями полюсного наконечника МЖУ (рис. 4, в и г).

Сравнение зависимости размерного градиента напряженности магнитного поля от координаты вдоль вала для двух геометрий полюсного наконечника при одинаковых параметрах показывает, что при прямоугольной геометрии градиент напряженности магнитного поля вдоль вала больше, чем при треугольной геометрии (рис. 5).

При $c_0 = 0,3$, $A = 0,1 \text{ мм}$, $B = 0,3 \text{ мм}$, $H_0 = 1 \cdot 10^6 \text{ А/м}$ максимальный размерный градиент напряженности магнитного поля на поверхности вала для прямоугольной геометрии полюсного наконечника составляет $4,05 \cdot 10^9 \text{ А/м}^2$, а для треугольной геометрии полюсного наконечника – $3,12 \cdot 10^9 \text{ А/м}^2$ [12].

Под действием высокоградиентного магнитного поля магнитные частицы смещаются в область наибольшей напряженности магнитного поля. С течением времени концентрация магнитных частиц у вершины полюса увеличивается, а вместе с ней увеличивается вязкость магнитной жидкости. В зависимости от начальных параметров концентрация магнитных частиц может достигнуть значений кубической ($c = 0,52$) или случайной ($c = 0,64$) плотной упаковки [10]. При таких значениях концентрации магнитных частиц текучесть магнитной жидкости уменьшается. Так как в настоящей работе используется выражение (3), то максимальное значение концентрации магнитных частиц, которое может быть достигнуто, составляет $c_p = 0,605$. Авторы полагают, что с практической точки зрения магнитная жидкость теряет текучесть и уплотнение выходит из строя, когда вязкость магнитной жидкости вблизи поверхности вала увеличивается в 40 раз [12]. Соответственно, при достижении этой величины счет останавливался.

На рис. 6 показано распределение концентрации магнитных частиц и вязкости магнитной жидкости в момент потери текучести магнитной жидкостью при напряженности магнитного поля $H_0 = 1 \cdot 10^6 \text{ А/м}$. Максимальная концентрация магнитных частиц на поверхности вала равна $c_{\text{max}} = 0,563$, а максимальная безразмерная динамическая вязкость магнитной жидкости на поверхности вала составляет величину $\hat{\eta}_{\text{max}} = 122$, тогда как безразмерная вязкость исходной магнитной жидкости с концентрацией магнитных частиц $c_0 = 0,3$ равна $\hat{\eta} = 3$.

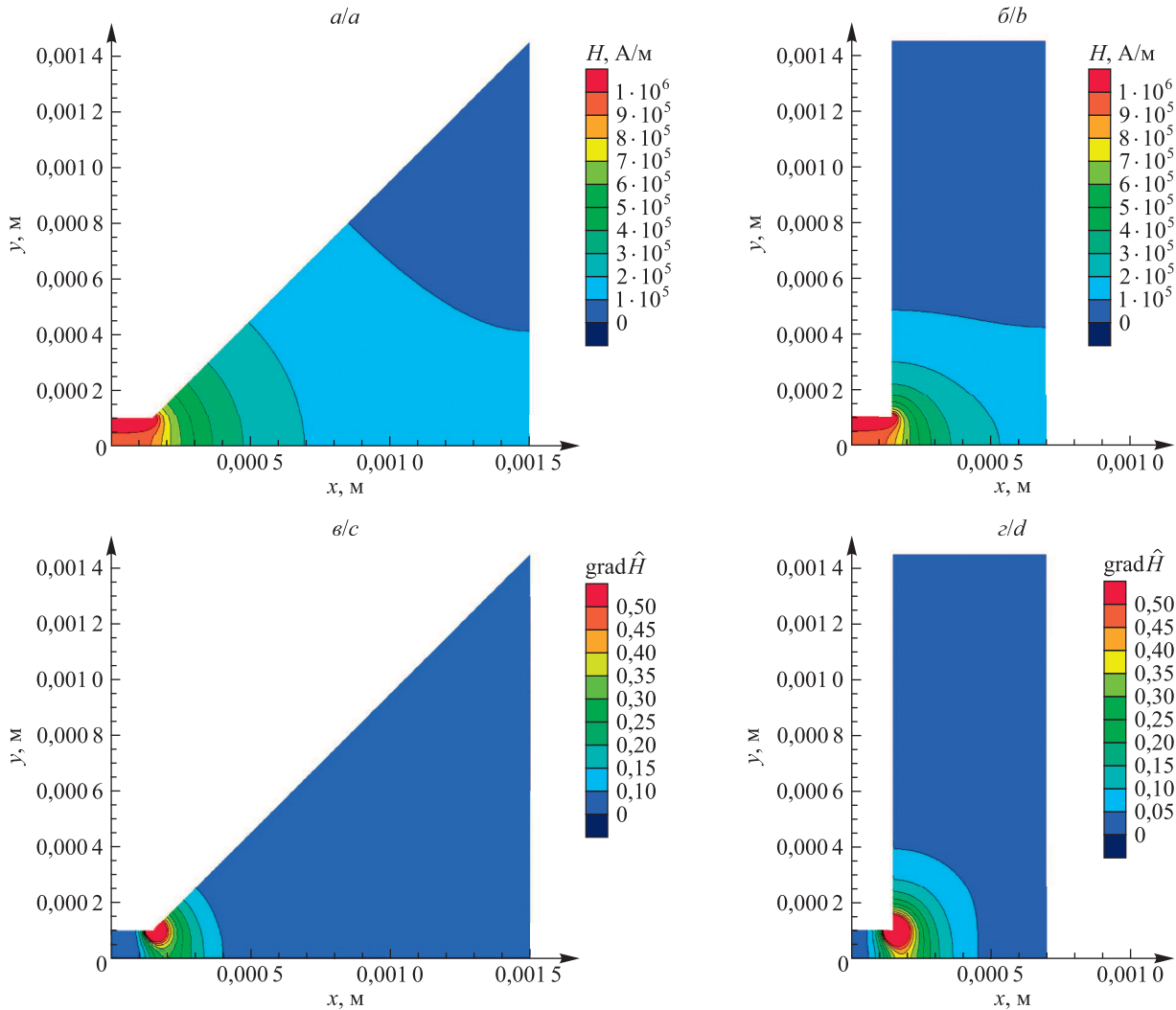


Рис. 4. Распределение напряженности и градиента напряженности магнитного поля под треугольным (а, в) и прямоугольным (б, г) полюсными наконечниками при $c_0 = 0,3$, $A = 0,1$ мм, $B = 0,3$ мм, $H_0 = 1 \cdot 10^6$ А/м

Fig. 4. Distribution of magnetic field strength and magnetic field strength gradient under triangular (a, c) and rectangular (b, d) pole pieces at $c_0 = 0,3$, $A = 0,1$ mm, $B = 0,3$ mm, $H_0 = 1 \cdot 10^6$ A/m

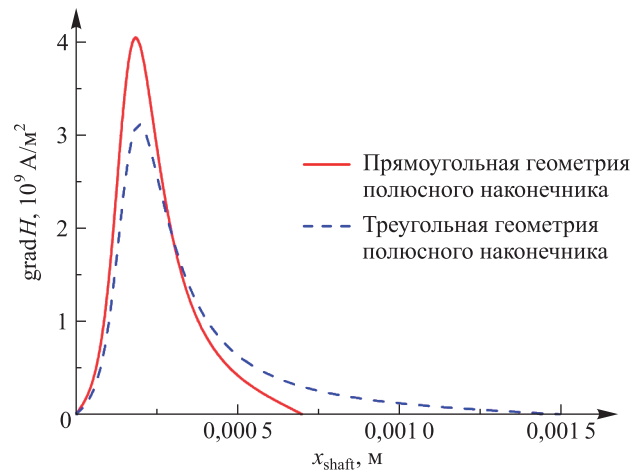


Рис. 5. Зависимость размерного градиента напряженности магнитного поля от координаты вдоль вала для треугольной и прямоугольной геометрий полюсного наконечника при $c_0 = 0,3$, $A = 0,1$ мм, $B = 0,3$ мм, $H_0 = 1 \cdot 10^6$ А/м

Fig. 5. Dependence of the dimensional magnetic field strength gradient on the coordinate along the shaft for triangular and rectangular pole piece geometries at $c_0 = 0,3$, $A = 0,1$ mm, $B = 0,3$ mm, $H_0 = 1 \cdot 10^6$ A/m

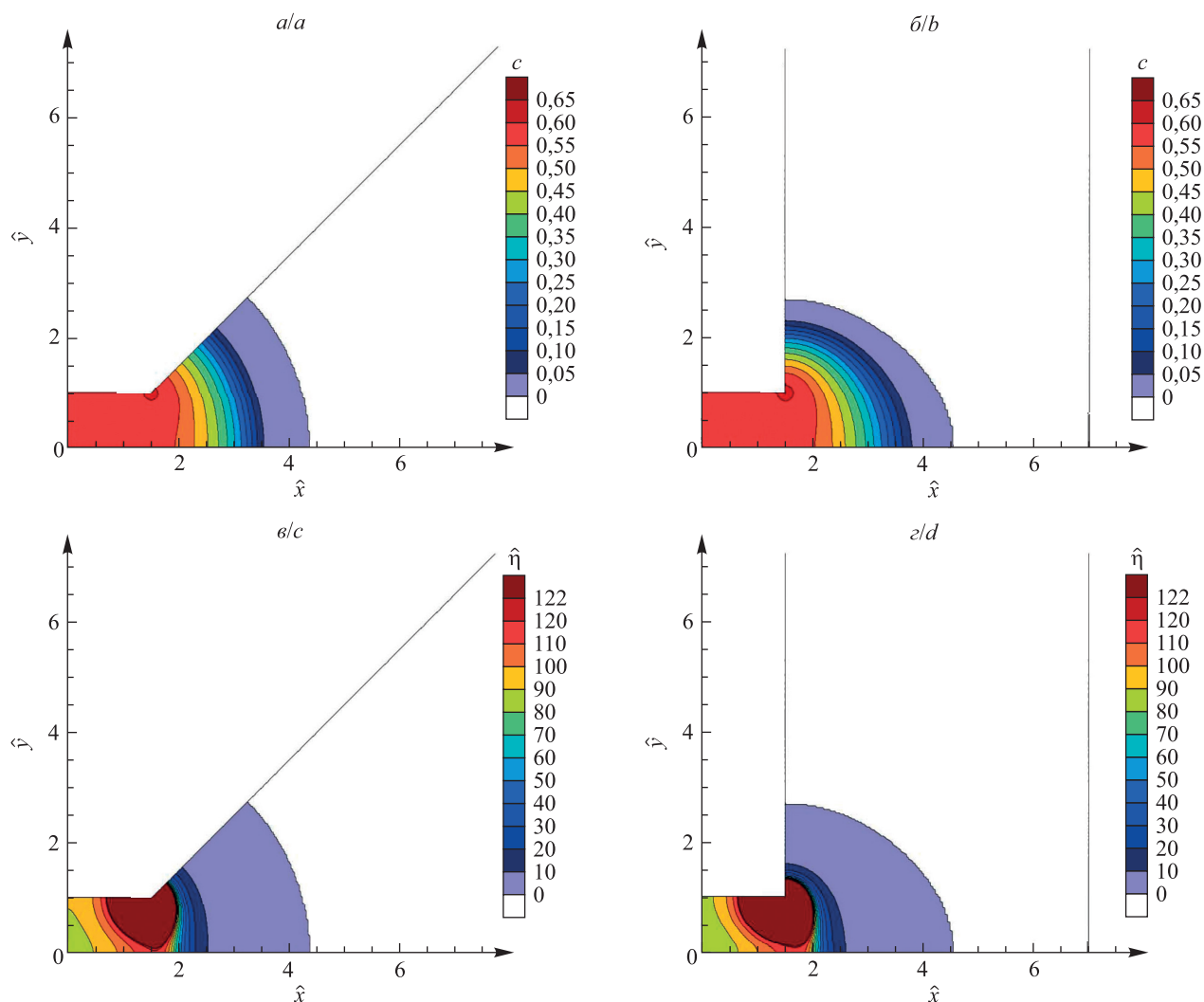


Рис. 6. Распределение концентрации магнитных частиц и вязкости магнитной жидкости под треугольным (а, в) и прямоугольным (б, г) полюсными наконечниками при $c_0 = 0,3$, $A = 0,1$ мм, $B = 0,3$ мм, $H_0 = 1 \cdot 10^6$ А/м

Fig. 6. Distribution of concentration of magnetic particles and viscosity of the magnetic fluid under triangular (a, c) and rectangular (b, d) pole pieces at $c_0 = 0.3$, $A = 0.1$ mm, $B = 0.3$ mm, $H_0 = 1 \cdot 10^6$ A/m

В процессе роста концентрации максимальное значение сначала достигается в области максимального градиента, а затем смещается к области симметрии (рис. 7, а и б). Вязкость магнитной жидкости также растет со временем и достигает максимального значения в области максимального градиента (рис. 7, в и г). Характер роста обеих величин одинаков для треугольной и прямоугольной геометрий полюсного наконечника.

В зависимости от величины напряженности магнитного поля в зазоре устанавливается различное значение концентрации магнитных частиц. Как при треугольной, так и при прямоугольной геометрии полюсного наконечника в малом зазоре, равном 0,1 мм, потеря текучести магнитной жидкостью (т. е. достижение значения концентрации $c = 0,563$) происходит только при достаточно большой напряженности магнитного поля (рис. 8). При напряженности магнитного поля в зазоре, меньшей чем $1 \cdot 10^6$ А/м, магнитная жидкость остается текучей.

Так как размерная вязкость магнитной жидкости зависит от вязкости жидкости-основы ($\eta = \eta_0 \hat{\eta}$), то для наиболее распространенной жидкости-основы (вакуумное масло, динамическая вязкость которой равна $\eta_0 = 0,08$ Па · с) размерная вязкость магнитной жидкости будет составлять величину $\eta \approx 122 \cdot 0,08 = 10$ Па · с, что соответствует вязкости битума. При такой вязкости вращение вала МЖУ становится невозможным, т. е. уплотнение утрачивает работоспособность [12].

Сравнивая две геометрии полюсного наконечника при одинаковых параметрах, можно заметить, что предельная концентрация магнитных частиц на поверхности вала при одних и тех же значениях напряженности магнитного поля, меньших чем $6 \cdot 10^6$ А/м, для прямоугольной геометрии больше, чем для треугольной геометрии (см. рис. 8, а). Аналогично и предельная вязкость магнитной жидкости больше для прямоугольной геометрии (см. рис. 8, б).

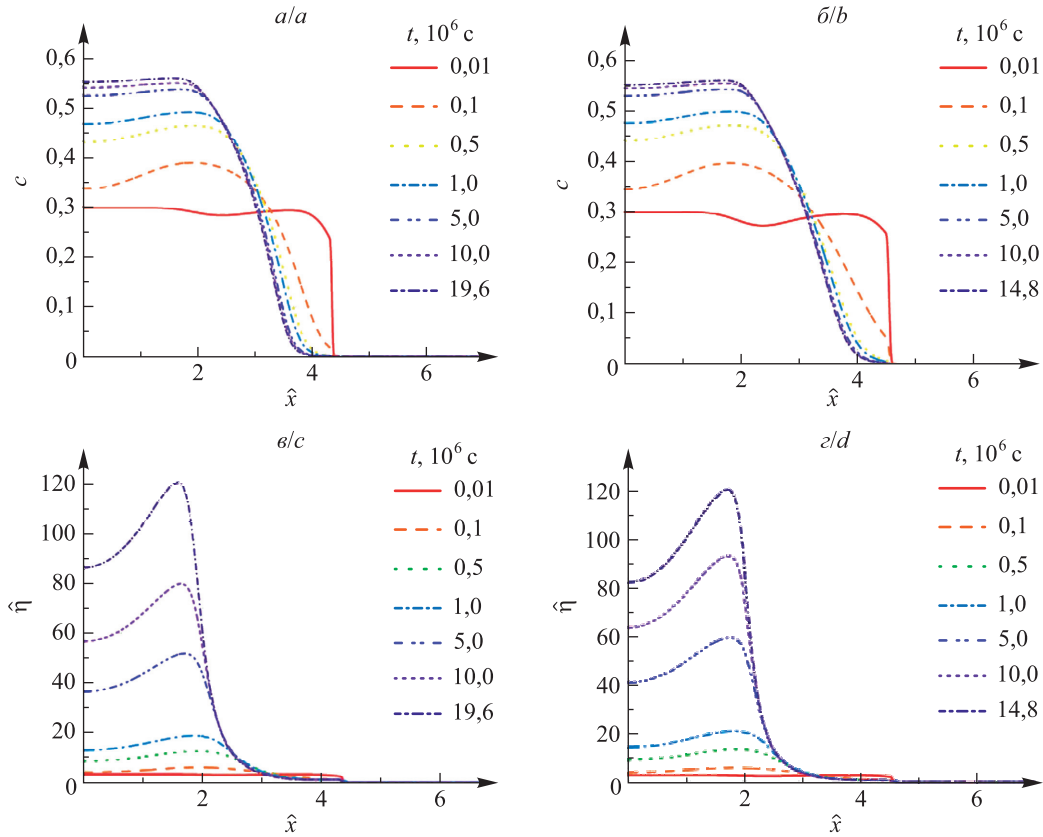


Рис. 7. Зависимость концентрации магнитных частиц и вязкости магнитной жидкости от безразмерной координаты вдоль вала с течением времени для треугольной (а, в) и прямоугольной (б, г) геометрий полюсного наконечника при $c_0 = 0,3$, $A = 0,1$ мм, $B = 0,3$ мм, $H_0 = 1 \cdot 10^6$ А/м

Fig. 7. Dependence of the concentration of magnetic particles and the viscosity of the magnetic fluid on the dimensionless coordinate along the shaft over time for triangular (a, c) and rectangular (b, d) pole piece geometries at $c_0 = 0.3$, $A = 0.1$ mm, $B = 0.3$ mm, $H_0 = 1 \cdot 10^6$ A/m

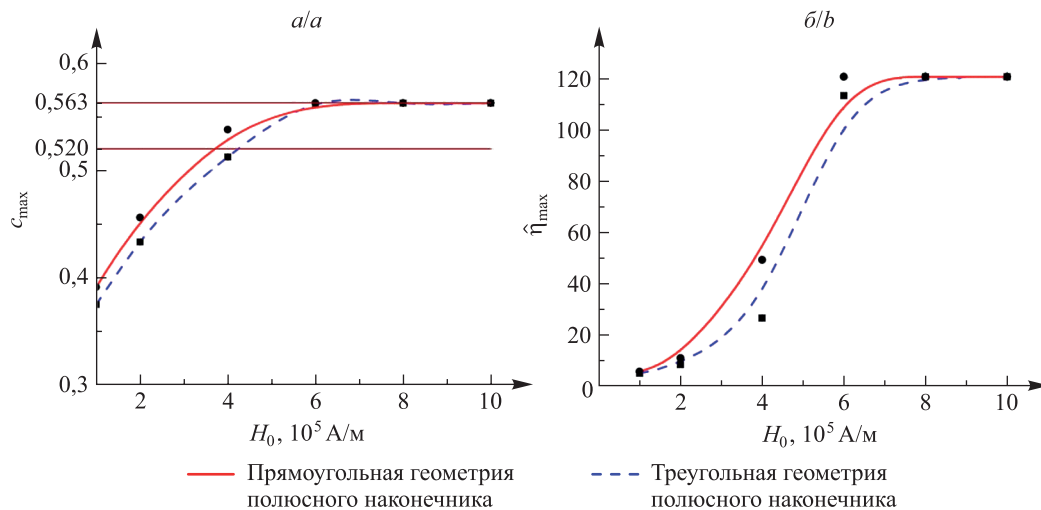


Рис. 8. Зависимость предельной концентрации магнитных частиц (а) и предельной вязкости магнитной жидкости (б) на поверхности вала от напряженности магнитного поля под полюсным наконечником для треугольной и прямоугольной геометрий полюсного наконечника при $c_0 = 0,3$, $A = 0,1$ мм, $B = 0,3$ мм

Fig. 8. Dependence of the maximum concentration of magnetic particles (a) and the maximum viscosity of the magnetic fluid (b) on the shaft surface on the magnetic field strength under the pole piece for triangular and rectangular pole piece geometries at $c_0 = 0.3$, $A = 0.1$ mm, $B = 0.3$ mm

Рассчитано интегральное (среднее) значение вязкости магнитной жидкости вдоль вала, определяющей величину трения: $\eta_{\text{int}} = \int_0^L \frac{\eta(x) dx}{L}$, где L – протяженность объема магнитной жидкости вдоль вала. Момент силы трения, действующей на вал, пропорционален средней вязкости магнитной жидкости вдоль вала. Таким образом, как видно из рис. 9, трение возрастает с увеличением напряженности магнитного поля, причем трение при прямоугольной геометрии полюсного наконечника с увеличением напряженности магнитного поля превосходит трение при треугольной геометрии полюсного наконечника. Чем больше трение, тем больше момент вращения вала МЖУ.

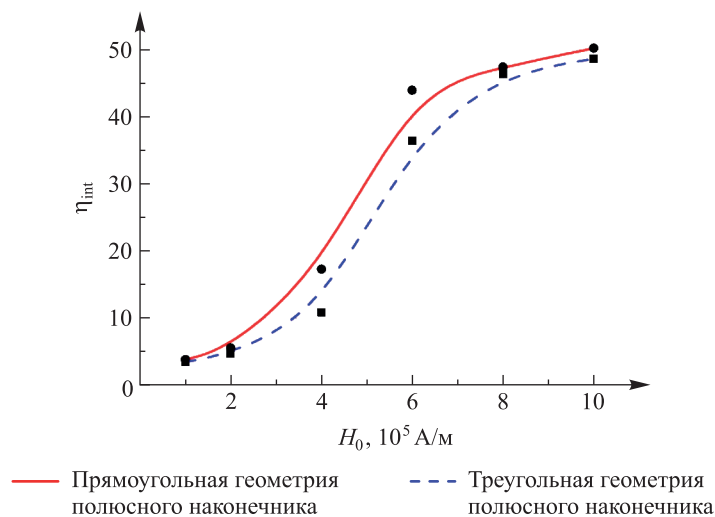


Рис. 9. Зависимость интегральной вязкости от напряженности магнитного поля под полюсным наконечником для треугольной и прямоугольной геометрий полюсного наконечника при $c_0 = 0,3$, $A = 0,1$ мм, $B = 0,3$ мм
Fig. 9. Dependence of the integral viscosity of the magnetic fluid on the magnetic field strength under the pole piece for triangular and rectangular pole piece geometries at $c_0 = 0.3$, $A = 0.1$ mm, $B = 0.3$ mm

Определить, как долго прослужит уплотнение, можно, рассчитав время достижения предельной концентрации магнитных частиц на поверхности вала, при которой магнитная жидкость теряет текучесть.

Это время зависит от размера зазора и коэффициента диффузии ($t = \frac{A^2}{D_0} \hat{t}$). Расчеты проведены для магнитной жидкости с вакуумным маслом в качестве жидкости-основы, коэффициент диффузии в котором составляет величину $D_0 = 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$.

С увеличением напряженности магнитного поля под полюсным наконечником время достижения установившейся концентрации магнитных частиц в зазоре растет как для треугольной, так и для прямоугольной геометрии полюсного наконечника (табл. 1). Оно может составлять от месяца до двух лет. Предельное значение концентрации магнитных частиц для не очень сильных полей не достигает величины $c = 0,563$. Однако при напряженности магнитного поля $H_0 = 6 \cdot 10^5 \text{ A/m}$ установившееся предельное значение концентрации магнитных частиц равно $c = 0,561$, а время его достижения составляет около двух лет. Сравнивая две геометрии полюсного наконечника, можно заметить, что при одном и том же значении напряженности магнитного поля время достижения установившейся концентрации магнитных частиц для треугольной геометрии полюсного наконечника меньше, чем для прямоугольной геометрии, но и само значение концентрации меньше. Такое поведение можно объяснить тем, что градиент напряженности магнитного поля в зазоре при прямоугольной геометрии полюсного наконечника превосходит градиент напряженности магнитного поля в зазоре при треугольной геометрии полюсного наконечника (см. рис. 5). По этой причине под прямоугольным полюсным наконечником концентрируется большее количество магнитных частиц, чем под треугольным полюсным наконечником. Соответственно, установившиеся предельные значения концентрации магнитных частиц для прямоугольной геометрии больше, чем для треугольной геометрии, равно как и время достижения этих значений.

Таблица 1

**Зависимость предельной концентрации магнитных частиц
и времени достижения установившейся концентрации
от напряженности магнитного поля под полюсным наконечником
для треугольной и прямоугольной геометрий полюсного наконечника
при $c_0 = 0,3$, $A = 0,1$ мм, $B = 0,3$ мм**

Table 1

**Dependence of the maximum concentration of magnetic particles
and the time to reach steady-state concentration
on the magnetic field strength under the pole piece
for triangular and rectangular pole piece geometries
at $c_0 = 0.3$, $A = 0.1$ mm, $B = 0.3$ mm**

$H_0, 10^5$ А/м	Треугольная геометрия полюсного наконечника		Прямоугольная геометрия полюсного наконечника	
	$c_{\max}$	t , сут	$c_{\max}$	t , сут
1	0,375	20,2	0,391	21,9
2	0,433	33,7	0,456	42,4
4	0,512	121,0	0,538	246,0
6	0,561	763,0	—	—

Как говорилось ранее, концентрация магнитных частиц, при которой магнитная жидкость теряет текучесть, полагается равной $c = 0,563$. Время достижения этой концентрации может составлять от полугода до года в зависимости от напряженности магнитного поля под полюсным наконечником (табл. 2). Для треугольной геометрии полюсного наконечника время достижения предельной концентрации магнитных частиц больше, чем для прямоугольной геометрии. Следовательно, при использовании треугольного полюсного наконечника срок службы МЖУ будет больше.

Таблица 2

**Зависимость времени достижения предельной концентрации магнитных частиц
от напряженности магнитного поля под полюсным наконечником
для треугольной и прямоугольной геометрий полюсного наконечника
при $c_0 = 0,3$, $A = 0,1$ мм, $B = 0,3$ мм**

Table 2

**Dependence of the time to reach the maximum concentration of magnetic particles
on the magnetic field strength under the pole piece
for triangular and rectangular pole piece geometries
at $c_0 = 0.3$, $A = 0.1$ mm, $B = 0.3$ mm**

$H_0, 10^5$ А/м	t , сут	
	Треугольная геометрия полюсного наконечника	Прямоугольная геометрия полюсного наконечника
6	—	337
8	309	215
10	227	173

Так как предельное значение концентрации магнитных частиц ограничено, а счет согласно условию прекращается, когда магнитная жидкость теряет текучесть, то меньший градиент напряженности магнитного поля под треугольным полюсным наконечником приводит к тому, что в этом случае частицы медленнее концентрируются в зазоре, чем при использовании прямоугольного полюсного наконечника.

Заключение

Проведено численное исследование влияния геометрии полюсного наконечника МЖУ на срок службы уплотнения в стояночном режиме работы. Рассмотрены две наиболее распространенные геометрии полюсного наконечника – треугольная и прямоугольная.

В результате выполнения расчетов для двух геометрий получено распределение концентрации магнитных частиц и вязкости магнитной жидкости под полюсным наконечником. Определено время, за

которое концентрация магнитных частиц на поверхности вала МЖУ достигает установившегося значения, в зависимости от напряженности магнитного поля под полюсным наконечником при использовании в качестве жидкости-основы вакуумного масла с коэффициентом диффузии $D_0 = 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$. Это время может составлять от месяца до нескольких лет. Для треугольной геометрии полюсного наконечника в промежутке напряженности магнитного поля от $H_0 = 1 \cdot 10^5 \text{ А/м}$ до $H_0 = 6 \cdot 10^5 \text{ А/м}$ предельное значение концентрации магнитных частиц не достигает величины $c = 0,563$, при которой магнитная жидкость теряет текучесть. Однако при напряженности магнитного поля $H_0 = 6 \cdot 10^5 \text{ А/м}$ установившееся предельное значение концентрации равно $c = 0,561$, а время его достижения составляет около двух лет. Для прямоугольной геометрии полюсного наконечника этот промежуток составляет от $H_0 = 1 \cdot 10^5 \text{ А/м}$ до $H_0 = 4 \cdot 10^5 \text{ А/м}$. При больших, чем указанные, значениях напряженности магнитного поля текучесть магнитной жидкости может быть потеряна, и тогда МЖУ выйдет из строя.

Сравнение геометрий полюсного наконечника показывает, что время достижения концентрации, при которой магнитная жидкость теряет текучесть, для треугольной геометрии больше, чем для прямоугольной геометрии, следовательно, срок службы МЖУ при использовании треугольного полюсного наконечника будет больше.

Библиографические ссылки

1. Kole M, Khandekar S. Engineering applications of ferrofluids: a review. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2021; 537:168222. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.168222.
2. Bolotov A, Burdo G. Magnetic fluid method for sealing liquid media. In: Bieliatynskiy A, Guda AN, editors. *Transport technologies in the 21st century (TT21C-2023). Actual problems of decarbonization of transport and power engineering: ways of their innovative solution. International scientific conference; 2023 April 5–7; Rostov-on-Don, Russia*. [S. l.]: [s. n.]; 2023. Article No.: 04081 (E3S web of conferences; volume 383). DOI: 10.1051/e3sconf/202338304081.
3. Rao Y, Yan X, Luo L, Hao F, Shen C, Lei C, et al. Magnetic fluid seal for switchgear. In: CIRED. *25th International conference on electricity distribution; 2019 June 3–6; Madrid, Spain*. Liège: AIM; 2019. Paper No.: 1035.
4. Liu S, Li D, He X, Zhang Z. Structure design study of vacuum magnetic fluid seal. *Frontiers in Materials*. 2022;9:932697. DOI: 10.3389/fmats.2022.932697.
5. Berkovsky BM, Medvedev VF, Krakov MS. *Magnetic fluids: engineering applications*. Oxford: Oxford University Press; 1993. XII, 243 p.
6. Bashtovoi VG, Pogiritskaya SG, Kuzhir R, Polunin VM, Ryapolov PA, Shabanova IA, et al. Influence of mass transfer processes on Couette flow of magnetic fluid. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2013;5(4):04011.
7. Taketomi S. Motion of ferrite particles under a high gradient magnetic field in a magnetic fluid shaft seal. *Japanese Journal of Applied Physics*. 1980;19(10):1929–1936. DOI: 10.1143/JJAP.19.1929.
8. Odenbach S. Forced diffusion in magnetic fluids under the influence of a strong magnetic field gradient. *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*. 1994;94:331–334. DOI: 10.1007/BF01320686.
9. Krakov MS, Nikiforov IV. Regarding the influence of heating and the Soret effect on a magnetic fluid seal. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017;431:255–261. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.07.054.
10. Sharyna SG, Krakov MS. Effect of a high-gradient magnetic field on particle concentration distribution in a magnetic fluid seal: rivalry of the diffusion and magnetophoresis. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2024;599:172095. DOI: 10.1016/j.jmmm.2024.172095.
11. Pshenichnikov AF, Elfimova EA, Ivanov AO. Magnetophoresis, sedimentation, and diffusion of particles in concentrated magnetic fluids. *The Journal of Chemical Physics*. 2011;134(18):184508. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3586806>.
12. Sharyna S, Krakov M. Interplay between magnetophoresis and diffusion in magnetic fluid seals for vacuum devices and their lifespan. *Vacuum*. 2025;234:114122. DOI: 10.1016/j.vacuum.2025.114122.
13. Chong JS, Christiansen EB, Baer AD. Rheology of concentrated suspensions. *Journal of Applied Polymer Science*. 1971;15(8): 2007–2021. DOI: 10.1002/app.1971.070150818.
14. Шарина СГ, Краков МС. Влияние формы полюсного наконечника на характеристики стояночного магнитожидкостного уплотнения. В: Диканский ЮИ, Ерин КВ, Закиян АР, Куникин СА, редакторы. *Сборник научных трудов VIII Международной Ставропольской конференции по магнитным коллоидам (ISCMC2023); 10–14 сентября 2023 г.; Ставрополь, Россия*. Ставрополь: Издательство Северо-Кавказского федерального университета; 2023. с. 152–156.
15. Buyevich YuA, Ivanov AO. Kinetics of phase separation in colloids: I. Formation of initial aggregates. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 1993;192(3):375–390. DOI: 10.1016/0378-4371(93)90044-5.
16. Russel WB. *The dynamics of colloidal systems*. Madison: University of Wisconsin Press; 1987. XIV, 119 p.
17. Krakov MS. Control volume finite-element method for Navier – Stokes equations in vortex-streamfunction formulation. *Numerical Heat Transfer. Part B, Fundamentals*. 1992;21(2):125–145. DOI: 10.1080/10407799208944913.
18. Patankar SV. *Numerical heat transfer and fluid flow*. [S. l.]: Hemisphere Publishing Corporation; 1980. XVI, 197 p. (Minkowycz WJ, Sparrow EM, editors. Series in computational and physical processes in mechanics and thermal sciences).
19. Shepard D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In: Blue RB, Rosenberg AM, editors. *ACM'68. Proceedings of the 23rd ACM national conference; 1968 August 27–29; Las Vegas, USA*. New York: Association for Computing Machinery; 1968. p. 517–524.