УДК 621.892 *Оригинальная статья*

Моделирование процесса испарения магнитной наножидкости для оценки продолжительности функционирования магнитожидкостных узлов

А.Н. Болотов, О.О. Новикова
ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»
170026, Россия, Тверь, наб. А. Никитина, 22
alnikbltov@rambler.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.340

Аннотация. Представлен обобщённый подход к расчёту ресурса магнитожидкостных трибоузлов, функционирующих в условиях вакуума и газовой среды. Рассмотрены физические механизмы деградации магнитных наножидкостей при испарении дисперсионной среды и росте концентрации твёрдой фазы. При оценке интенсивности испарения в вакуум жидкой фазы наножидкости применен статистический подход, развитый Я.И. Френкелем. Получено уравнение временной зависимости концентрации дисперсной фазы в магнитной жидкости для расчетов долговечности магнитожидкостных устройств в вакууме. Динамика потери массы магнитной наножидкости при контакте с газовой средой описывалась на основе уравнения диффузионного массопереноса. Для его решения применен метод электростатической аналогии. Определено время, в течение которого объемное содержание дисперсной фазы магнитной наножидкости возрастает до предельного значения для магнитожидкостных узлов с открытой поверхностью жидкости и заключенной в камеру с небольшим отверстием. На основе полученных расчётных соотношений, связывающих параметры испарения с изменением объёмной доли дисперсной фазы и критерием предельно допустимой вязкости, сформирована инженерная методика оценки долговечности магнитожидкостных подшипников и уплотнений. Приводятся рекомендации по выбору магнитной жидкости и режимов работы, обеспечивающих увеличение ее ресурса.

Ключевые слова: магнитная жидкость, испарение, дисперсионная среда, ресурс трибоузла, вязкость, подшипник скольжения.

Болотов Александр Николаевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»
Новикова Ольга Олеговна – к.т.н., доцент, доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Original paper

Simulating the evaporation process of magnetic nanofluid to estimate the service life of magnetic fluid devices

A.N. Bolotov, O.O. Novikova
Tver State Technical University, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.340

Abstract: A generalized approach to calculating the service life of magnetic fluid tribological units operating in vacuum and gas environments is presented. The physical mechanisms of magnetic nanofluid degradation during dispersion medium evaporation and increasing solid phase concentration are examined. A statistical approach developed by Ya. I. Frenkel is used to estimate the rate of nanofluid liquid phase evaporation into a vacuum. An equation for the time dependence of the dispersed phase concentration in a magnetic fluid was obtained for calculating the durability of magnetic fluid devices in a vacuum. The dynamics of magnetic nanofluid mass loss upon contact with a gaseous medium was described using a diffusion mass transfer equation. An electrostatic analogy method was used to solve this equation. The time during which the volume content of the dispersed phase of the magnetic nanofluid increases to a limiting value was determined for magnetic fluid tribounits with an open fluid surface and those enclosed in a chamber with a small opening. Based on the obtained calculation relationships linking evaporation parameters with changes in the volume fraction of the dispersed phase and the maximum permissible viscosity criterion, an engineering

© А.Н. Болотов, О.О. Новикова, 2026

methodology for assessing the service life of magnetic fluid bearings and seals has been developed. Recommendations for selecting magnetic fluid and operating modes that maximize its service life are provided.
Keywords: magnetic fluid, evaporation, dispersion medium, friction unit life, viscosity, plain bearing.

Alexander N. Bolotov – Dr. Sc., Professor, Head of the Applied Physics Department, Tver State Technical University , ORCID: 0000-0003-4054-5550
Olga O. Novikova – Ph. D., Full Docent, Applied Physics Department, Tver State Technical University, ORCID: 0000-0003-4133-3541

Поступила в редакцию/received: 19.03.2026; после рецензирования/revised: 15.04.2026; принята/accepted: 16.04.2026.

1. Введение

Магнитожидкостные узлы трения (подшипники, зубчатые передачи, уплотнения, демпферы) [1-5] представляют собой сложные инженерные системы, где рабочая среда – магнитная наножидкость (МНЖ), взаимодействующая с газовой средой, оказывает непосредственное влияние на долговечность узла. При эксплуатации в условиях, близких к вакууму или разреженной газовой среде, ключевым фактором, влияющим на ресурс работы, становится скорость испарения дисперсионной среды.

Магнитожидкостные узлы трения состоят из контактирующих поверхностей, между которыми находится магнитожидкость – коллоидный раствор магнитных наночастиц в дисперсионной среде. Такая жидкость обладает уникальными свойствами, обусловленными взаимодействием магнитных частиц с внешним магнитным полем и поверхностями деталей. В устройстве узла МНЖ выполняет функцию смазочного слоя или герметизатора, который одновременно стабилизируется постоянным или переменным магнитным полем, создаваемым элементами конструкции узла.

Основной физический принцип работы магнитожидкостных узлов заключается в использовании магнитного поля для удержания магнитной наножидкости в зоне трения и предотвращения её вытекания или смещения под воздействием нагрузок и деформаций. Магнитные наночастицы, неравномерно распределяясь в дисперсионной среде, формируют структуры, способные изменять вязкость и адгезионные свойства магнитожидкости при изменении силы магнитного поля. Это позволяет регулировать трение и износ в режиме эксплуатации. Магнитожидкостная смазка уменьшает не только износ поверхности, но и тепловыделение, способствуя долговечности узла. Однако стойкость этих свойств напрямую зависит от стабильности дисперсионной среды и сохранения концентрации магнитных частиц.

Из-за постоянного взаимодействия с внешней газовой средой и эксплуатационных факторов происходит постепенное изменение состава и состояния дисперсионной среды магнитожидкости [6, 7, 8]. В частности,

испарение летучих компонентов приводит к уменьшению объема жидкости и изменению характеристик смазочного слоя. Увеличение содержания дисперсной фазы оказывает существенное влияние на вязкость магнитной жидкости, поскольку приводит к росту сопротивления сдвигу и, в пределе, к потере текучести.

Нами предлагается для инженерных ресурса магнитожидкостных устройств использовать связь между концентрацией магнитной фазы и эффективной вязкостью, а естественным критерием отказа считать достижение предельно допустимой вязкости. Для точного прогнозирования ресурса магнитожидкостных узлов требуется детальный учет параметров дисперсионной среды, таких как вязкость, концентрация магнитных частиц и скорость испарения. Такое комплексное рассмотрение позволит улучшить надежность расчетов и оптимизировать проектирование узлов трения в различных условиях эксплуатации.

Цель данной работы – формализовать на основе известных моделей испарения и данных о магнитных жидкостях расчётный подход к оценке ресурса трибоузлов с МНЖ в вакууме и газовой среде, а также дать инженерные рекомендации по повышению долговечности.

2. Математическое моделирование кинетики испарения дисперсионной среды

Рассмотрим процесс изменения концентрационного состава МНЖ в результате испарения дисперсионной среды при ее контакте с воздухом и в вакууме.

Динамика изменения состава МНЖ в результате испарения в вакуум. Для определения срока службы магнитожидкостного механизма в вакууме требуется определить временную зависимость изменения объемного содержания дисперсной фазы в результате испарения дисперсионной среды. Сначала определим интенсивность испарения жидкой фазы опираясь на статистический подход к описанию этого процесса развитый Я.И. Френкелем [9]. Для того, чтобы частицы жидкости, находящиеся в хаотическом движении, могли покинуть ее поверхность, нормальная к поверхности скорость v_z должна удовлетворять следующему неравенству:

$$v_z > v_{z\max} \geq \sqrt{2L/m},$$

где m – масса молекулы, L – энергия испарения одной молекулы. Отметим, что именно эта скорость соответствует наиболее вероятному направлению движения частиц. Тогда, используя закон Максвелла можно определить интенсивность (скорость) испарения $W = dNm/dtdS$:

$$W = n\int_{v_{z\max}}^{\infty} mv_z f(v_z)dv_z = n\sqrt{\frac{m}{2\pi kT}}\int_{\frac{mv_z^2}{2}}^{\infty} e^{-\frac{mv_z^2}{2kT}} d\left(\frac{mv_z^2}{2}\right), \quad (1)$$

где n – концентрация атомов в объеме жидкости, T – абсолютная температура, k – постоянная Больцмана, t – время, S – площадь поверхности, $f(v_z)$ – максвелловская функция распределения частиц по скоростям.

После интегрирования выражения (1) получим:

$$W = n\sqrt{\frac{mkT}{2\pi}}e^{-\frac{L}{kT}} = \rho\sqrt{\frac{RT}{2\pi\mu}}e^{-\frac{L_O}{RT}}, \quad (2)$$

где μ – молярная масса вещества, ρ – плотность вещества, R – универсальная газовая постоянная, L_o – удельная теплота парообразования.

В химических справочниках зачастую приводится не теплота испарения некоторой жидкости, а давление насыщенных паров P_s этой жидкости при заданной температуре. После некоторых несложных преобразований, считая пар идеальным газом, можно выразить интенсивность испарения (2) через P_s:

$$W = P_s\sqrt{\mu/2\pi RT}\,.$$

Определим уравнение временной зависимости концентрации дисперсной фазы в магнитной жидкости для расчетов долговечности магнитожидкостных устройств в вакууме. Поверхность магнитной жидкости частично образована дисперсными наночастицами, покрытыми ПАВ («твердая» фаза) и дисперсионной жидкостью. Испарение происходит преобладающим образом с поверхности жидкой фазы S_1, поэтому элементарный объем dV_1 испарившейся жидкости можно выразить так:

$$dV_1 = \alpha\sqrt{\frac{kT}{2\pi m}}e^{-\frac{L}{kT}}S_1 dt, \quad (3)$$

где α – коэффициент испарения жидкости, равный или меньший единицы.

Используя стереометрические соотношения между размерами двумерных и трехмерных структур [10] можно записать:

$$\frac{S_1}{S} = \frac{V_1}{V_1 + V\omega_s}, \quad (4)$$

где S, S_1 – площадь поверхности всей магнитной жидкости и дисперсионной фазы соответственно, V, V_1 – весь объем жидкости и объем жидкой фазы, ω_s – концентрация дисперсной фазы. Тогда выражение (3) будет выглядеть так:

$$\frac{V_1 - V\omega_s}{V_1} dV_1 = \alpha \sqrt{\frac{kT}{2\pi m}} e^{-\frac{L}{kT}} S dt \,. \tag{5}$$

Учитывая (5), после несложных преобразований получим выражение определяющее время t изменения концентрации дисперсной фазы от начального ω_{ss} до конечного ω_{sf}:

$$t = \left[V\left(\omega_{sf} - \omega_s\right) + V\omega_s \ln \frac{1-\omega_s}{1-\omega_{sf}} \right] \sqrt{2\pi\mu RT}\, \frac{\rho}{\alpha S \mu P_s} \,. \tag{6}$$

Понятно, что уравнение (6) получено для случая, когда поверхность S изменяется слабо, магнитожидкостное устройство работает в стационарном температурном режиме, концентрация молекул в поверхностном слое постоянная из-за низкой испаряемости. Предположим, что поверхность S магнитной жидкости приблизительно остается постоянной в процессе испарения. Ввиду больших радиусов кривизны поверхности жидкости, зависимостью от нее давления насыщенных паров будем пренебрегать. Давление пара жидкости около поверхности примем равным нулю. Так же будем считать, что из-за невысокой скорости испарения жидкости температура поверхности не изменяется, а диффузионные процессы в жидкости позволяют поддерживать концентрацию молекул в поверхности в равновесном состоянии.

Для увеличения ресурса устройств с МНЖ следует прикрыть ее поверхность для снижения скорости испарения. Эффект достигается за счет того, что молекулы, скапливающиеся в полости около жидкости, будут частично конденсироваться.

Предположим, испарившиеся молекулы попадают в полость, у которой выходное отверстие площадью S_o и толщиной стенки l. Будем обоснованно предполагать, что при давлении P в полости длина свободного пробега молекул пара $\lambda >> l, \sqrt{S_o}$. Тогда скорость испарения дисперсионной среды:

$$W = \alpha \sqrt{\left(\mu / 2\pi RT\right)\left(P_s - P\right)} \,. \tag{7}$$

Если пренебречь давлением газа вне полости и допустить, что $S_1 >> S_o$, то согласно (7) скорость изменения массы M магнитной жидкости:

$$\frac{dM}{dt} = WS_1 = \alpha P_s S_o \sqrt{\frac{\mu}{2\pi RT}} \,, \tag{8}$$

тогда будем иметь:

$$t = \frac{V\left(\omega_{sf} - \omega_{ss}\right)}{\alpha P_s S_o} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \,. \tag{9}$$

Динамика потери массы магнитной наножидкости при контакте с

газовой средой. Уравнение диффузионного массопереноса, определяющее скорость потери массы жидкой фазы, выглядит так:

$$dm/dt = -D(\mu/RT)\int_s gradPdS, \qquad (10)$$

где dm/dt – скорость испарения или скорость уменьшения массы жидкости, P – парциальное давление пара, D – коэффициент диффузии молекул пара в окружающем газе, S – поверхность, через которую происходит массоперенос.

Для нахождения решения уравнения (10) воспользуемся методом электростатической аналогии [11]. С учетом этого принципа получим уравнение, определяющее скорость испарения через поверхность расположенную вблизи поверхности МНЖ:

$$dm / dt = DP_oC\mu(1-\omega_s)/RT\varepsilon_o, \qquad (11)$$

где P_o – давление пара на расстоянии от поверхности близком к длине свободного пробега молекул, C – электрическая емкость, ω_s – объемная доля дисперсной фазы. Например, если испарение происходит с поверхности МНЖ в виде полукольца, то коэффициента C будет равен:

$$C = 8R\varepsilon_o\left(1-0{,}03\frac{r}{R}\right)\left[1-0{,}08\left(\frac{r}{R}\right)^3\right],$$

где R и r – внешний и внутренний радиусы кольца.

В дисперсных системах, таких как МНЖ, часть открытой для испарения поверхности занята дисперсными частицами, испарение которых несущественно. Для учета фактической площади испарения дисперсионной среды в формулу (11) введен коэффициент ω_s.

Известно, что на диффузионный поток молекул пара накладывается стефановское течение молекул газовой среды и в результате скорость испарения изменяется. Поправка в выражении (11) на стефановское течение зависит от отношения давления пара P_o к давлению газа окружающей среды P_a. В нашем случае рассматриваются слабо испаряющиеся жидкости с низким давлением насыщенных паров и поэтому указанной поправкой можно пренебречь. Так же не учитывается влияние на массоперенос пара конвективных потоков среды, полагая, что в реальных условиях работы магнитожидкостных механизмов их значение несущественно.

Для проведения расчетов по формуле (11) необходимо знать давление пара P_0 около поверхности и коэффициент взаимной диффузии D. Покажем, как можно рассчитать давление пара P_0. Молекулярный процесс отделения молекул от поверхности при испарении хорошо описывается уравнением предложенным Герцем и Кнудсеном и

теоретически обоснованным Френкелем [12]:

$$\frac{dm}{dt} = \alpha S_1 \sqrt{\frac{\mu}{2\pi RT}\left(P_s - P_o\right)},$$

где m – масса испарившихся молекул, S_1 – площадь поверхности жидкости. С учетом выражения (4) получим:

$$\frac{dm}{dt} = \alpha(1-\omega_s) S \sqrt{\frac{\mu}{2\pi RT}\left(P_s - P_o\right)}. \qquad (12)$$

Решая совместно уравнения (11) и (12) найдем выражение для определения давления пара:

$$P_o = P_s\left(1 + \frac{DC}{2\alpha\varepsilon_o S(1-\omega_s)}\sqrt{\frac{2\pi\mu}{RT}}\right)^{-1}.$$

В окончательном виде уравнение для скорости испарения будет выглядеть так:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{DCP_s\mu}{2RT\varepsilon_o}(1-\omega_s)\left(1 + \frac{DC}{2\alpha\varepsilon_o S(1-\omega_s)}\sqrt{\frac{2\pi\mu}{RT}}\right)^{-1}. \qquad (13)$$

Найдем скорость убыли массы жидкости при нахождении ее в частично открытой полости. Масса жидкости будет изменяться из-за диффузии ее паров через отверстие. Такой процесс можно описать следующим одномерным стационарным уравнением диффузии:

$$\frac{dm}{dt} = -DS_o \frac{\mu}{R}\frac{dP}{dz},$$

где S_o – площадь поверхности отверстия, z – координата по оси, совпадающей с геометрической осью отверстия. После преобразований этого уравнения получим:

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{DS_o\mu}{RTh}\left(P_o - P\right), \qquad (14)$$

где P_0 и P – давление пара внутри полости и вне ее. Не допуская грубой ошибки, давление вне полости можно принять равным нулю.

Исходя из закона сохранения массы, правые части уравнений (12) и (14) можно приравнять и выразить P_0. После некоторых преобразований получим

$$\frac{dm}{dt} = \frac{DS_oP_s\mu}{RTh}\frac{P_s}{1 + \frac{DS_o}{\alpha hS(1-\omega_s)}\sqrt{\frac{2\pi\mu}{RT}}}. \qquad (15)$$

Понятно, что уравнение (10) справедливо для условий, когда пар в полости находится в равновесном состоянии.

Перейдем к вычислению ресурса триботехнических узлов, то есть определим время, в течение которого объемное содержание дисперсной фазы жидкости ω_s возрастает от ω_{ss} до предельного значения ω_{sf}. Будем

полагать, что узел заправляется фиксированным объемом магнитной жидкости V, свободная поверхность магнитной жидкости S изменяется незначительно, объем твердой фазы $V_{\omega s}$ постоянен. После преобразований получим формулу для инженерных расчетов ресурса магнитожидкостных узлов с открытой поверхностью жидкости по критерию допустимой концентрации дисперсной фазы:

$$t = \frac{\rho V}{\Psi_1}\left[\omega_{sf} - \omega_{ss} + \omega_{ss}\ln\left(\frac{1-\omega_{ss}}{1-\omega_{sf}}\right)\right], \tag{16}$$

где Ψ_1 – правая часть уравнений (13) без коэффициента $(1-\omega_s)$, ρ – плотность жидкой фазы.

Поступив аналогичным образом, получим формулу для определения ресурса узла трения, в котором МНЖ заперта в камере с небольшим отверстием:

$$t = V\rho\left(\omega_{sf} - \omega_{ss}\right)\Big/\Psi_2, \tag{17}$$

где Ψ_2 – правая часть уравнения (15).

Несомненно, развитые расчётные методики следует уточнять по результатам длительных ресурсных испытаний на соответствующих стендах. Это позволит учесть факторы, не вошедшие в аналитические модели, и повысить надёжность прогноза ресурса для конкретных условий эксплуатации. В то же время существующие модели имеют ограничения. В частности, расчеты предполагали гомогенность испарения по поверхности, тогда как фактические процессы могут быть локализованы из-за неоднородности магнитного поля и микрорельефа поверхностей. Также недостаточно учтено влияние химических изменений дисперсионной среды под воздействием газовой среды и температуры – например, окислительных процессов и деградации стабилизаторов. Кроме того, динамика формирования и разрушения структур магнитных наночастиц при испарении изучена слабо и требует дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

Таким образом, актуальной задачей является разработка в дальнейшем многофазных моделей, объединяющих динамику испарения, кинетику агрегирования наночастиц и химическую стабильность дисперсионной среды при реальных условиях эксплуатации.

3. Применение результатов моделирования в инженерной практике

Рекомендации по оптимизации конструкции для увеличения ресурса. На основании проведенного анализа моделей динамики испарения эффективное снижение скорости испарения дисперсионной среды может быть достигнуто за счет комплексных конструктивных решений, направленных на ограничение контакта магнитожидкости с газовой средой

и стабилизацию ее состава в рабочей зоне узла трения.

В первую очередь рекомендуется реализовать герметичные или полугерметичные оболочки вокруг зоны контакта, что позволит значительно уменьшить диффузию паров жидкости в окружающую газовую среду. Важным элементом такой конструкции является минимизация зазоров и контроль микрорельефа прилегающих поверхностей, что ограничит пути утечки и снизит площадь испарения.

Другим действенным направлением является минимизация рабочей температуры, поскольку P_s растёт экспоненциально с температурой. Действенной мерой этом направлении является внедрение теплоизолирующих слоев и систем активного температурного контроля, которые позволят поддерживать оптимальный тепловой режим в зоне трения.

Для вакуумных приложений следует отдавать предпочтение синтетическим жидкостям (сложным эфирам, полиэфирам, силиконам) [2, 7] с низким давлением насыщенных паров при рабочей температуре, нежели минеральным маслам. Например, диоктилсебацинат обеспечивает ресурс на порядок выше по сравнению с типовыми индустриальными маслами при одинаковых условиях. Введение в состав МНЖ антиоксидантов, антифрикционных присадок и ингибиторов коррозии частично деактивирует процессы деструкции и даже испарения носителя при повышенных температурах, что замедляет разрушение МНЖ и рост её вязкости. Для компенсации неизбежных потерь жидкой фазы рекомендуется включать в конструкцию системы дозированной подачи или подпитки магнитожидкости. Такие системы могут автоматически поддерживать концентрацию и объем дисперсионной среды на необходимом уровне, предотвращая критическое снижение смазочного слоя. Кроме того, выбор композиции материалов для контактных поверхностей также играет большую роль.

Реализация предложенных конструктивных решений в совокупности позволяет существенно продлить ресурс магнитожидкостных узлов трения за счет снижения интенсивности испарительных потерь и поддержания эффективных трибологических характеристик.

Верификация полученных зависимостей на основе эмпирических данных. Разработанная математическая модель кинетики испарения дисперсионной среды была подвергнута верификации с использованием эмпирических данных, полученных в экспериментальных исследованиях [2]. В работе была исследована испаряемость магнитных масел и магнитных жидкостей в условиях термостатирования. Весовым методом фиксировали потерю массы образца магнитной жидкости в процессе испарения с открытой в газовую среду поверхности, в условиях

термостатирования. Достаточная толщина слоя минимизировала влияние изменения состава. Исследования проводились при нескольких температурах.

Сопоставление теоретических расчетов с экспериментальными значениями проводилось по ключевым параметрам – скорости уменьшения объема дисперсионной среды и связанным изменением трибологических характеристик. В рамках анализа были выбраны несколько образцов с различным базовым составом и стабилизирующими добавками, что позволило оценить универсальность модели и её чувствительность к изменениям физико-химических свойств жидкости.

Результаты показали высокую степень совпадения прогноза скорости испарения с экспериментальными данными вплоть до 75-85% по среднему квадратичному отклонению. Модель корректно воспроизводила зависимости изменения объема жидкости от времени при различных температурах и давлениях в газовой фазе. Кроме того, динамика изменения вязкости и концентрации магнитных частиц, вычисленная с помощью модели, выявила тенденции, сходные с наблюдаемыми на практике – постепенное повышение вязкости вплоть до перехода в критическое состояние, приводящее к ухудшению смазочных свойств.

Однако, исследования подтвердили, что в дальнейшем необходимо учитывать деструкцию и полимеризацию дисперсионной среды при повышенных температурах и наличие технологических молекул ПАВ в ее составе.

Формулировка критерия предельного состояния МНЖ. Долговечность (ресурс) магнитожидкостного трибоузла определяется моментом времени, когда узел перестаёт выполнять свои функции (герметизация, смазка, демпфирование) с требуемым качеством. Ресурс узла t_p определяется из уравнения $\eta(t_p) = \eta_{add}$, где $\eta(t_p)$ – эффективная вязкость МНЖ, изменяющаяся вследствие роста объёмной доли дисперсной фазы, η_{add} – предельно допустимая вязкость, соответствующая потере работоспособности узла при сохранении требуемого режима трения.

Величина η_{add} зависит от конкретного применения и технических требований. Для подшипников скольжения приемлемо небольшое (до 10-20%) увеличение вязкости относительно номинальной. Для уплотнений критична вязкость, обеспечивающая достаточную текучесть и проникновение в микронеровности поверхности. Для демпфирующих систем вязкость должна оставаться в узком диапазоне для сохранения характеристик демпфирования.

На практике, при ограниченной информации о коллоидных

свойствах конкретной МНЖ, η_{add} можно выбирать как вязкость, соответствующую объёмной доле дисперсной фазы ω_{sf}, находящейся в диапазоне 0,5-0,6 для большинства магнитных жидкостей на основе масел. При концентрации дисперсной фазы более 0,52 начинает резко повышаться вязкость коллоида, а при концентрации более 0,6 может наблюдаться нарушение локальной сплошности коллоида [12, 13].

Оценка долговечности магнитожидкостного узла. В качестве примера оценим долговечность магнитожидкостного подшипника скольжения, предназначенного для работы в вакууме (см. рис. 1). Подшипник состоит из немагнитной втулки 1, внутри которой выполнена одна или несколько продольных смазочных канавок 2 вне области гидродинамического клина, кольцевой постоянный магнит 3 и два симметричных магнитопровода 4 для обеспечения подачи и удержания резервной магнитной жидкости. Зазор между втулкой, магнитопроводами и валом заполнен МНЖ 5, которая по мере необходимости подается в зону трения по канавкам.

Приняты размеры: внутренний диаметр втулки – 1 см, ее длина – 1,5 см, диаметр канавок – 0,3 см. Объем заправки магнитной жидкости V = 2,4 см^3, открытая в вакуум поверхность имеет площадь S_1 = 4,68 см^2. В модифицированном варианте жидкость закрыта тонкими шайбами, и пары выходят только через зазор площадью $S_2 = S_0 = 6{,}4$ мм^2. Используется типовая МНЖ с намагниченностью 25 кА/м и $\omega_m = 0{,}052$, с учетом сольватных оболочек ω_s = 0,143, допустимое значение после испарения носителя $\omega_{sf} = 0{,}52$.

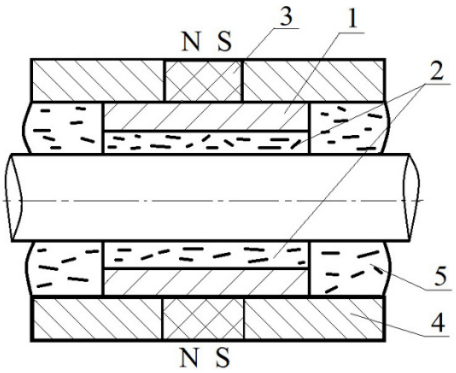

Рис. 1. Схема магнитожидкостного подшипника скольжения.

Расчеты выполнены для магнитных жидкостей на низколетучих носителях (низкое давление насыщенных паров) [7, 14, 15], их свойства приведены в таблице и носят ориентировочный характер; стоимость может быть высокой. Результаты показывают (см. Таблицу 1), что при низкой температуре и малой открытой поверхности ресурс достигает десятков лет, тогда как рост температуры и площади испарения резко снижает долговечность. Следовательно, при правильном выборе жидкости,

рациональной конструкции и щадящем температурном режиме испарение носителя не будет ограничивать срок службы. Если низколетучие носители слишком дороги, следует рассмотреть дозаправку (перезаправку), периодичность этих процедур можно оценить по приведенным формулам.

Таблица 1. Долговечность магнитожидкостного подшипника.

Дисперсионная среда			Углеводородная жидкость	Олигоэтилсилоксановая жидкость	Алкилнафталиновая жидкость	Пефторполиэфир
Свойства						
P_s, Па	20°C		$5\cdot10^{-6}$	$6\cdot10^{-6}$	$1{,}3\cdot10^{-8}$	$\approx10^{-7}$
	100°C		$2\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-2}$	$2\cdot10^{-2}$	$\approx10^{-3}$
Ресурс, годы	S_1	20°C	2,5	1,3	70	$8\cdot10^{2}$
		100°C	$7\cdot10^{-5}$	$5\cdot10^{-4}$	$1{,}5\cdot10^{-3}$	$9\cdot10^{-3}$
	S_2	20°C	$1{,}9\cdot10^{2}$	$1{,}1\cdot10^{2}$	$5\cdot10^{3}$	$6\cdot10^{4}$
		100°C	$5\cdot10^{-3}$	$4\cdot10^{-2}$	$1{,}1\cdot10^{-3}$	0,6

4. Заключение.

В ходе проведенного исследования разработана методика оценки ресурса магнитожидкостных узлов трения, учитывающая динамическое изменение состава дисперсионной среды под воздействием испарения в газовой или безвоздушной среде. Анализ научных подходов выявил, что традиционные методы расчета ресурса недостаточно отражают влияние потерь жидкости и связанных с этим изменений трибологических характеристик. Включение параметров скорости испарения в модель обеспечивает более точное прогнозирование срока службы узлов в условиях эксплуатации с пониженным давлением и изменяющимся тепловым режимом.

Математическая модель, представленная соотношениями (8), (9), (16), (17) разработанная на основе фундаментальных уравнений массопереноса и дополненная кинетическими зависимостями для учета структурных изменений магнитожидкости, позволяет описать нелинейную динамику испарения с высокой степенью приближения к реальным процессам. Результаты анализа показывают, что скорость испарения оказывает непосредственное влияние на износ и трение, поскольку потеря дисперсионной среды ведет к ухудшению смазочных свойств. Это обстоятельство обусловило необходимость включения в конструкцию магнитожидкостных узлов мер по ограничению испарения. Рекомендации по оптимизации конструкции, такие как применение герметичных оболочек, уплотнительных элементов с высокой газонепроницаемостью, системы температурного контроля и дозированной подпитки дисперсионной среды, нацелены на минимизацию потерь и повышение долговечности узлов.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением

мультифизического моделирования, включающего взаимодействия на микроскопическом уровне, а также с созданием новых высокостабильных составов дисперсионных сред и развитой системой мониторинга состояния узлов в реальном времени. Комплексный подход, объединяющий усовершенствованные материалы, точные расчетные модели и адаптивные технологии наблюдения, откроет возможности для значительного повышения надежности и эффективности магнитожидкостных трибоузлов в условиях разнообразных и экстремальных газовых сред.

Полученные результаты и рекомендации создают основу для совершенствования теоретических и практических аспектов эксплуатации магнитожидкостных узлов трения, способствуя развитию высокотехнологичных систем с продленным ресурсом и сниженными эксплуатационными затратами. Таким образом, учитываемая в работе динамика испарения дисперсионной среды является ключевым фактором, обеспечивающим развитие и применение магнитожидкостных трибологических решений в современных инженерных задачах.

Библиографический список:

1. **Орлов, Д.В.** Магнитные жидкости в машиностроении / Ю.О. Михалев, Н.К. Мышкин, В.В. Подгорков, А.П. Сизов. – М.: Машиностроение, 1993. – 272 с.
2. **Болотов, А.Н.** Триботехника магнитопассивных опор скольжения / А.Н. Болотов, В.Л. Хренов. – Тверь: Изд-во ТГТУ, 2008. – 124 с.
3. **Huang, W.** Ferrofluids lubrication: a status report / W. Huang, X. Wang. // Lubrication Science. – 2016. – V. 28. – I. 1. – P. 3-26. DOI: 10.1002/ls.1291.
4. **Xu, M.** Ferrofluid lubrication for ball bearings to avoid starvation / M. Xu, G. Jin, Q. Dai, W. Huang, X. Wang // Industrial Lubrication and Tribology. – 2020. – V. 72. – I. 10. – P. 1227-1231. DOI: 10.1108/ILT-04-2020-0132.
5. **Болотов, А.Н.** Магнитожидкостные подшипники скольжения / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, В.Г. Павлов // Трение и износ. – 2004. – Т. 26. – № 3. – С. 286-289.
6. **Болотов, А.Н.** Исследование структурной стабильности магнитных масел для узлов трения / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова, Д.И. Горлов // Известия Московского государственного технического университета, МАМИ. – 2014. – Т. 4. – № 2. – С. 15-17.
7. **Урьев, Н.Б.** Макроскопические разрывы сплошности и слоистый характер течения структурированных дисперсий в сдвиговом потоке / Н.Б. Урьев // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2012. – Т. 48. – № 6. – С. 503-513.
8. **Болотов, А.Н.** Дисперсионные среды для перспективных смазочных магнитных жидкостей / А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков // 19-я международная Плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям: Сборник научных трудов, Иваново, 08–11 сентября 2020 года. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2020. – С. 287-294.
9. **Иоссель, Ю.Я.** Расчет электрической емкости / Ю.Я. Иоссель, Э.С. Кочанов, М.Г. Струнский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 288 с.
10. **Салтыков, С.А.** Стереометрическая металлография / С.А. Салтыков. – М.: Металлургия, 1976. – 270 с.
11. **Замков, Е.Т.** Определение толщины пограничного слоя при обтекании тела аэродинамическим потоком методом электростатической аналогии / Е.Т. Замков, А.В. Палий, П.В. Серба // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 1(126). – С. 191-196.
12. **Френкель, Я.И.** Кинетическая теория жидкостей / Я.И. Френкель. – М.: Издательство АН СССР, 1945. – 424 с.
13. **Болотов, А. Н.** Влияние нанодисперсной фазы магнитных масел на их смазочные свойства / А.Н. Болотов, О.О. Новикова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и

наноматериалов. – 2022. – Вып. 14. – С. 545-560. DOI 10.26456/pcascnn/2022.14.545.
14. **Болотов, А.Н.** Экспериментальное изучение текучести наноструктурированной магнитной жидкости в сильном магнитном поле / А.Н. Болотов, О.О. Новикова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2023. – Вып. 15. – С. 692-700. DOI 10.26456/pcascnn/2023.15.692.
15. **Соболевский, М.В.** Олигоорганосилоксаны. Свойства, получение, применение / М.В. Соболевский, И.И. Скороходов, К.П. Гриневич и др.; под ред. М.В. Соболевского. – М.: Химия, 1985. – 264 с.

References:

1. Orlov D.V., Mikhalev Yu.O., Myshkin N.K., Podgorkov V.V., Sizov A.P. *Magnitnyye zhidkosti v mashinostroyenii* [Magnetic fluids in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1993, 272 p. (In Russian).
2. Bolotov A.N., Khrenov V.L. *Tribotekhnika magnitopassivnykh opor skol'zheniya* [Tribotechnics of magnetopassive sliding bearings]. Tver, TGTU Publ., 2008, 124 p. (In Russian).
3. Huang W., Wang X. Ferrofluids lubrication: a status report, *Lubrication Science,* 2016, vol. 28, issue 1, pp. 3-26. DOI: 10.1002/ls.1291.
4. Xu M., Jin G., Dai Q., Huang W., Wang X. Ferrofluid lubrication for ball bearings to avoid starvation, *Industrial Lubrication and Tribology,* 2020, vol. 72, issue 10, pp. 1227-1231. DOI:10.1108/ILT-04-2020-0132.
5. Bolotov A.N., Novikov V.V., Pavlov V.G. Magnitozhidkostnyye podshipniki skol'zheniya [Magnetic fluid plain bearings], *Treniye i iznos [Friction and wear]*, 2004, vol. 26, issue 3, pp. 286-289. (In Russian).
6. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O., Gorlov D.I Issledovaniye strukturnoy stabil'nosti magnitnykh masel dlya uzlov treniya [Study of structural stability of magnetic oils for friction units], *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, MAMI [Bulletin of the Moscow State Technical University, MAMI]*, 2014, vol. 4, issue 2, pp. 15-17. (In Russian).
7. Ur'yev N.B. Makroskopicheskiye razryvy sploshnosti i sloistyy kharakter techeniya strukturirovannykh dispersiy v sdvigovom potoke [Macroscopic discontinuities in continuity and the layered nature of the flow of structured dispersions in a shear flow], *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov [Physical chemistry of surfaces and protection of materials]*, 2012, vol. 48, issue 6, pp. 503-513. (In Russian).
8. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Dispersionnyye sredy dlya perspektivnykh smazochnykh magnitnykh zhidkostey [Dispersion media for promising lubricating magnetic fluids], *19-ya mezhdunarodnaya Plesskaya nauchnaya konferentsiya po nanodispersnym magnitnym zhidkostyam: Sbornik nauchnykh trudov, Ivanovo, 08–11 sentyabrya 2020 [19-th International Ples Scientific Conference on Nanodispersed Magnetic Fluids: Collection of Scientific Papers, Ivanovo, September 8–11, 2020]*. Ivanovo, Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin, 2020, pp. 287-294. (In Russian).
9. Iossel Yu.Ya., Kochanov E.S., Strunsky M.G. *Raschet elektricheskoy yemkosti* [Calculation of electrical capacitance]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981, 288 p. (In Russian).
10. Saltykov S.A. *Stereometricheskaya metallografiya* [Stereometric metallography]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 270 p. (In Russian).
11. Zamkov Ye.T., Paliy A.V., Serba P.V. Opredeleniye tolshchiny pogranichnogo sloya pri obtekanii tela aerodinamicheskim potokom metodom elektrostaticheskoy analogii [Determination of the boundary layer thickness in an aerodynamic flow around a body using the electrostatic analogy method], *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskiye nauki [Bulletin of SFedU. Technical sciences]*, 2012, no. 1(126), pp. 191-196. (In Russian).
12. Frenkel' YA.I. *Kineticheskaya teoriya zhidkostey* [Kinetic theory of liquids]. Moscow, Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1945, 424 p. (In Russian).
13. Bolotov A.N., Novikova O.O. Vliyaniye nanodispersnoy fazy magnitnykh masel na ikh smazochnyye svoystva [Influence of the nanodispersed phase of magnetic oils on their lubricating properties], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2022, issue 14, pp. 545-560. DOI 10.26456/pcascnn/2022.14.545.
14. Bolotov A.N., Novikova O.O. Eksperimental'noye issledovaniye tekuchesti nanostrukturirovannoy magnitnoy zhidkosti v sil'nom magnitnom pole [Experimental study of the fluidity of nanostructured magnetic fluid in a strong magnetic field], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2023, issue 15, pp. 692-700. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.692. (In Russian).
15. Sobolevskiy M.V., Skorokhodov I.I., Grinevich K.P. et al. *Oligoorganosiloksany. Svoystva, polucheniye, primeneniye* [Oligoorganosiloxanes. Properties, production, application], ed. by M.V. Sobolevskiy. Moscow, Khimiya Publ., 1985, 264 p. (In Russian).