

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-80-90>

УДК 537.84+661.66-022.532

Оптимизация рабочих характеристик магнитожидкостных уплотнений для ветроэнергетических установок

О. Н. Лабкович¹⁾, С. Г. Погирницкая¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Использование магнитожидкостных уплотнений – перспективное направление при герметизации вращающихся валов ветроэнергетических установок. Они характеризуются высокой герметичностью, простотой конструкции, низкими потерями на трение. Магнитожидкостное уплотнение состоит из кольцевого магнита и двух концентраторов магнитного поля, образующих с валом узкий кольцевой зазор, в котором магнитная жидкость, удерживаемая магнитным полем, является герметичным затвором. Магнитные силы обеспечивают равновесие объема магнитной жидкости под воздействием перепада давления и центробежных сил. С увеличением скорости вращения вала до 10 м/с визуально наблюдается деформация свободной поверхности магнитной жидкости у поверхности вала в виде воронки, что приводит к снижению удерживаемого перепада давлений. По мере возрастания скорости вращения воронка увеличивается, часть магнитной жидкости выбрасывается из рабочей зоны, удерживаемый перепад давлений снижается, и при 50 м/с происходит полный выброс магнитной жидкости и разгерметизация уплотнения. С целью повышения устойчивости свободной поверхности магнитной жидкости в поле центробежных сил в нее вводили многослойные углеродные нанотрубки. Для них характерны высокая удельная поверхность и соответственно сильное притяжение Ван-дер-Ваальса. В магнитной жидкости многослойные углеродные нанотрубки образуют структуры, ориентированные вдоль силовых линий магнитного поля. Экспериментально установлено увеличение статической нагрузки, удерживаемой слоем магнитной жидкости, при введении наноуглеродных структур: при совпадении с осью структуры – на 100 %, для нормального направления нагрузки к оси структуры – на 50 %. В уплотнении с увеличением скорости вращения вала деформация свободной поверхности магнитной жидкости с наноуглеродными структурами наблюдалась при 18 м/с на расстоянии 3 мм от поверхности вала. Удерживаемый уплотнением перепад давлений увеличивался в интервале скоростей 10–40 м/с, максимальный эффект 50 % получен при скорости 40 м/с. Таким образом, введение наноуглеродных структур в магнитную жидкость позволило снизить влияние центробежных сил на удерживаемый

Адрес для переписки

Лабкович Ольга Николаевна
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 14,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-12-35
customs@bntu.by

Address for correspondence

Labkovich Olga N.
Belarusian National Technical University
14, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-12-35
customs@bntu.by

перепад давлений и повысить эффективность работы магнитожидкостного уплотнения при больших скоростях вращения вала ветроэнергетических установок.

Ключевые слова: магнитожидкостное уплотнение, наноуглеродная структура, свободная поверхность, магнитная жидкость, ветроэнергетическая установка

Для цитирования: Лабкович, О. Н. Оптимизация рабочих характеристик магнитожидкостных уплотнений для ветроэнергетических установок / О. Н. Лабкович, С. Г. Погирницкая // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 1. С. 80–90. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-80-90>

Optimization of Performance Characteristics of Magnetofluidic Seals for Wind Power Plants

O. N. Labkovich¹⁾, S. G. Pogirnikskaya¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The use of magnetofluidic seals are a promising direction in sealing rotating shafts of wind power plants. Magnetofluidic seals are characterized by high tightness, simplicity of the design, low losses by friction. Magnetic fluid seal of the rotating shaft consists of a ring magnet and two concentrators of magnetic field, forming with the shaft a narrow ring gap in which the magnetic fluid retained by magnetic field is a hermetic seal. Magnetic forces provide balance of volume of magnetic fluid under the impact of pressure drop and centrifugal forces. With an increase in the speed of rotation of the shaft up to 10 m/s, deformation of the free surface of the magnetic fluid at the surface of the shaft in the form of a funnel is visually observed, which causes a decrease in the retained pressure drop. As the rotation speed increases, the funnel increases, part of the magnetic fluid is ejected from the working area, the retained pressure drop decreases, and at 50 m/s there is a complete release of the magnetic fluid and depressurization of the seal. In order to increase the stability of the free surface of the magnetic fluid in the field of centrifugal forces, multilayer carbon nanotubes were introduced into it. They are characterized by a high specific surface area and, accordingly, a strong Van der Waals attraction. In a magnetic fluid, multilayer carbon nanotubes form structures which are oriented along the magnetic field lines. The following increase in the static load retained by a layer of magnetic fluid has been experimentally determined with the introduction of nanocarbon structures: when coinciding with the axis of the structures the increase was by 100 %, for the normal direction of the load to the axis of the structure – by 50 %. In the seal, with an increase in the shaft rotation speed, deformation of the free surface of a magnetic fluid with nanocarbon structures was observed at 18 m/s at a distance of 3 mm from the shaft surface. The pressure drop retained by the seal increased in the speed range of 10–40 m/s, the maximum effect of 50 % was obtained at a speed of 40 m/s. Thus, the introduction of nanocarbon structures into the magnetic fluid made it possible to reduce the influence of centrifugal forces on the retained pressure drop and increase the efficiency of the magnetofluidic seal at high speeds of rotation of the shaft of wind power plants.

Keywords: magnetofluidic seal, nanocarbon structures, free surface, magnetic fluid, wind power plants

For citation: Labkovich O. N., Pogirnikskaya S. G. (2023) Optimization of Performance Characteristics of Magnetofluidic Seals for Wind Power Plants. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (1), 80–90. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-66-1-80-90> (in Russian)

Введение

Эффективность работы ветроэнергетических установок (ВЭУ) во многом определяется минимальной скоростью ветра, при которой наблюдается страгивание вала, т. е. начало его вращения и выход электрогенератора на номинальную мощность. Для ее повышения необходимо обеспечить низкие потери на трение в уплотнениях, высокую герметичность для защиты

подшипниковых узлов и обмоток электрогенератора от пыли, абразивных частиц, воды, мелкодисперсной влаги. Окружная скорость уплотняемого вала изменяется от $v = 3\text{--}10$ м/с для ВЭУ малой мощности ($N = 3\text{--}5$ кВт) до $v \sim 50$ м/с при мощности ВЭУ $N \geq 100$ кВт [1].

Магнитожидкостные уплотнения вращающихся валов успешно используются в химической, горнодобывающей промышленности. Накоплен большой опыт их применения в вакуумной технике. Основные преимущества магнитожидкостных уплотнений: полное отсутствие утечек рабочей среды через зону уплотнения, эффективная защита от пыли и воды, низкие потери на трение, простота в обслуживании [2–4]. При увеличении скорости уплотняемого вала $v \geq 10$ м/с существенное значение приобретают факторы, снижающие эффективность работы уплотнений, – центробежные силы и диссипативный разогрев магнитной жидкости [5–7]. Центробежные силы становятся сравнимыми с магнитными силами, удерживающими магнитную жидкость в зазоре, и выбрасывают ее из рабочей зоны, что приводит к уменьшению удерживаемого перепада давлений. В [8–10] численно и экспериментально исследованы деформация свободной поверхности магнитной жидкости в уплотнении с увеличением скорости вращения вала, возникновение вторичных течений и влияние этих факторов на удерживаемый перепад давлений. Снизить влияние центробежных сил можно с помощью технических решений [3], однако это усложняет конструкцию уплотнения. Авторами [11, 12] экспериментально показано, что введение в объем магнитной жидкости многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ) приводит к образованию наноуглеродных структур и увеличению статической нагрузки, удерживаемой этим объемом в магнитном поле.

Экспериментальные исследования

Представляет интерес исследование влияния наноуглеродных структур на повышение устойчивости свободной поверхности магнитной жидкости в поле центробежных сил и удерживаемый уплотнением перепад давлений с увеличением скорости вращения вала. Эксперименты проводили на стенде, представленном на рис. 1.

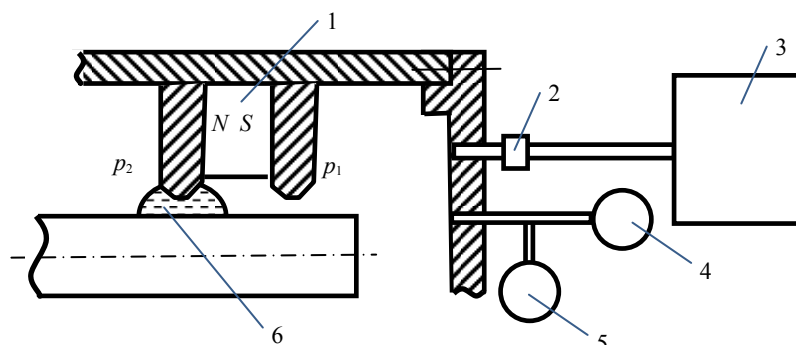


Рис. 1. Схема стенда для измерения удерживаемого уплотнением перепада давления:

- 1 – узел уплотнения; 2 – вакуумный кран; 3 – вакуумный насос ВН-461;
- 4 – образцовый манометр; 5 – вакуумметр; 6 – магнитная жидкость

Fig. 1. Diagram of the stand for measuring the pressure drop retained by the seal:
1 – seal assembly; 2 – vacuum valve; 3 – ВН-461 vacuum pump;
4 – reference pressure gauge; 5 – vacuum gauge; 6 – magnetic fluid

Стенд состоит из узла магнитожидкостного уплотнения, вал которого приводится во вращение электродвигателем. Окружные скорости поверхности вала изменялись от 0 до 50 м/с. С помощью вакуумного насоса создавали перепад давления в рабочей камере уплотнения, который измеряли образцовыми манометром и вакуумметром с точностью 10^3 Н/м². Методика измерения удерживаемого перепада давления: рабочий зазор магнитожидкостного уплотнения заполняли магнитной жидкостью, устанавливали определенную скорость вращения вала, затем в рабочей камере с помощью вакуумного насоса создавали разрежение. Перепад давления, удерживаемый уплотнением ($\Delta p = p_2 - p_1$), увеличивали до максимального (Δp_{\max}), когда наблюдается полный выброс магнитной жидкости из рабочего зазора, т. е. разгерметизация.

В экспериментах использовали магнитную жидкость ММТ-50 на основе минерального масла и магнетита с намагниченностью насыщения $M_s = 50$ кА/м. Ее физические свойства при $T = 20$ °С и $H = 0$: динамический коэффициент вязкости $\eta = 0,1$ Па·с, плотность $\rho = 1430$ кг/м³, коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,19$ Вт/(м·К), диаметр частиц магнетита $d < 15$ нм.

На рис. 2 показаны геометрические параметры исследуемого магнитожидкостного уплотнения.

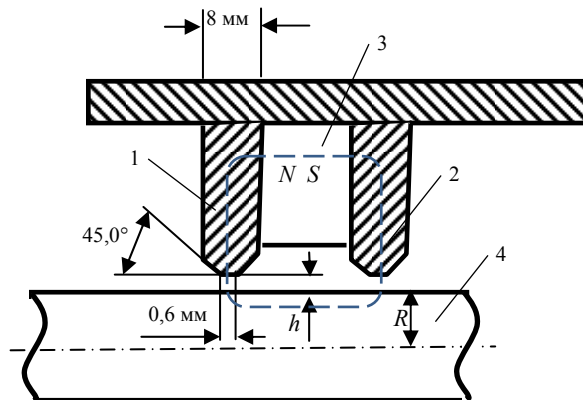


Рис. 2. Схема магнитожидкостного уплотнения:

1, 2 – полюс; 3 – постоянный магнит; 4 – вал

Fig. 2. Scheme of magnetofluidic seal:

1, 2 – poles; 3 – constant magnet; 4 – shaft

Радиус вала $R = 40$ мм, рабочий зазор между полюсом (концентратором магнитного поля) и валом $h = 0,2$ мм. Магнитное поле в рабочем зазоре, создаваемое постоянным феррит-бариевым магнитом, измерялось датчиком Холла и тесламетром универсальным 43205. Напряженность магнитного поля H в рабочем зазоре уплотнения изменялась в осевом направлении от 720 кА/м при $h = 0,2$ мм до 180 кА/м у свободной поверхности магнитной жидкости в статике ($v = 0$) (рис. 3).

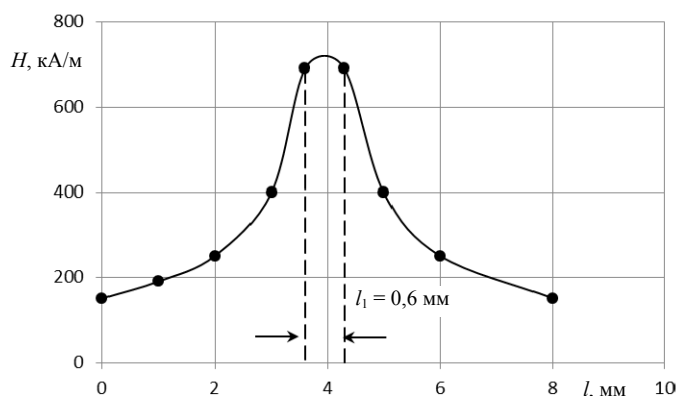


Рис. 3. Распределение магнитного поля в рабочем зазоре уплотнения

Fig. 3. Distribution of magnetic field in the working gap of the seal

Типичная зависимость удерживаемого уплотнением перепада давления Δp от скорости вращения вала v приведена на рис. 4 (кривая 1). С увеличением скорости $v > 10$ м/с Δp снижается, и при 50 м/с наступает полная разгерметизация уплотнения, т. е. $\Delta p = 0$.

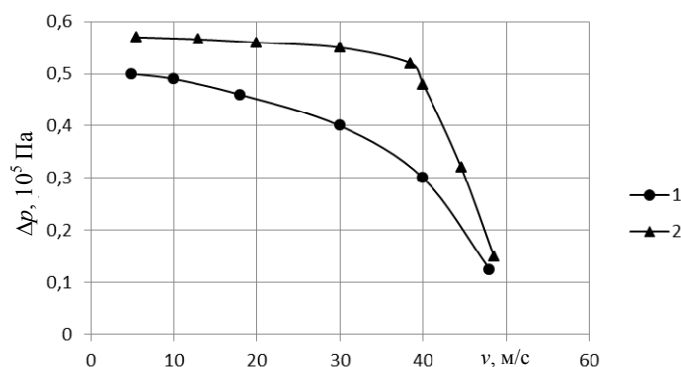


Рис. 4. Зависимость удерживаемого перепада давления от скорости вращения вала: 1 – магнитная жидкость ММТ-50; 2 – то же с многослойными углеродными нанотрубками концентрацией $c = 2\%$

Fig. 4. Dependence of retained pressure difference on rotation speed of the shaft: 1 – ММТ-50 magnetic fluid; 2 – ММТ-50 magnetic fluid with multilayer carbon nanotubes ($c = 2\%$)

Экспериментальная зависимость удерживаемого перепада давлений Δp от скорости вращения вала v хорошо аппроксимируется выражением [5]

$$\Delta p = \Delta p_{\text{ст}} - (\rho v^2 h) / 2R, \quad (1)$$

где $\Delta p_{\text{ст}}$ – перепад давлений, удерживаемый уплотнением при $v = 0$.

Выполнена оценка влияния центробежного ускорения и неоднородного магнитного поля в зазоре уплотнения на магнитную жидкость. При линейной скорости 50 м/с центробежное ускорение в прилегающих к валу слоях магнитной жидкости достигает $6000g$, где g – ускорение свободного па-

дения. Эффективное ускорение свободного падения в магнитной жидкости в поле магнитных сил $\mu_0 M_s \nabla H / \rho \approx 10^4 g$, где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; M_s – намагниченность насыщения магнитной жидкости; ∇H – градиент напряженности магнитного поля; ρ – плотность магнитной жидкости, $\rho = 10000 g$. Таким образом, ускорения центробежных сил и магнитного поля сравнимы.

Для оценки степени влияния центробежных сил на устойчивость магнитной жидкости в зазоре уплотнения в [3] предложен безразмерный критерий – магнитное число Фруда Fr_m , равное отношению центробежной силы к магнитной силе, действующих на единицу объема магнитной жидкости:

$$Fr_m = \frac{\rho v^2}{R \mu_0 M_s \nabla H}. \quad (2)$$

Влияние скорости вращения вала на деформацию свободной поверхности магнитной жидкости исследовали с помощью фото- и видеокамеры. Визуальные наблюдения показали, что на поверхности жидкости в месте контакта с валом образуется кольцевая воронка, которая наблюдалась ранее авторами [10].

На рис. 5 показана динамика изменения формы свободной поверхности магнитной жидкости при увеличении скорости вращения вала. Образование воронки приводит к уменьшению аксиальной толщины слоя магнитной жидкости x у поверхности вала, что является причиной снижения удерживаемого перепада давлений.

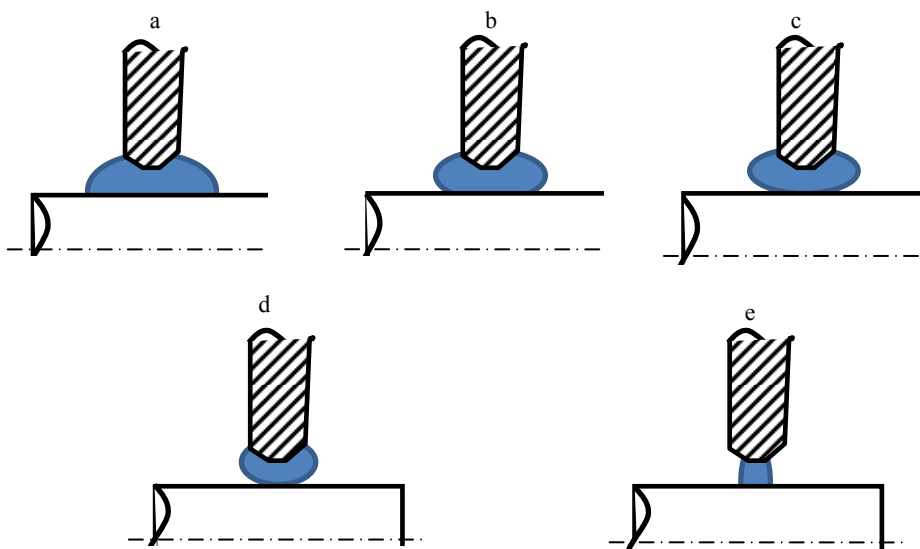


Рис. 5. Динамика изменения свободной поверхности магнитной жидкости при скорости v , м/с: а – 0; б – 10–18; с – 18–35; д – 35–45; е – 50

Fig. 5. Dynamics of alteration of magnetic fluid free surface depending on speed v , m/s: а – 0; б – 10–18; с – 18–35; д – 35–45; е – 50

В статике свободная поверхность магнитной жидкости совпадает с силовыми линиями магнитного поля (рис. 5а). При вращении вала, т. е. возникновении центробежных сил, от 10 до 18 м/с она принимает форму тора, у поверхности вала возникает воронка (рис. 5b). Дальнейший рост скорости деформирует свободную поверхность магнитной жидкости, глубина воронки возрастает, часть жидкости выбрасывается из рабочего зазора (рис. 5d). Увеличение скорости вала до 50 м/с приводит к разрушению слоя магнитной жидкости в рабочем зазоре и выбросу ее на полюс. Измеряли глубину воронки щупом толщиной 0,1 мм, установленным на микрометре, и определяли аксиальную толщину слоя магнитной жидкости в рабочем зазоре.

Зависимость осевого размера слоя магнитной жидкости у поверхности вала от скорости вращения носила такой же характер, как и удерживаемый перепад давлений (рис. 6, кривая 1).

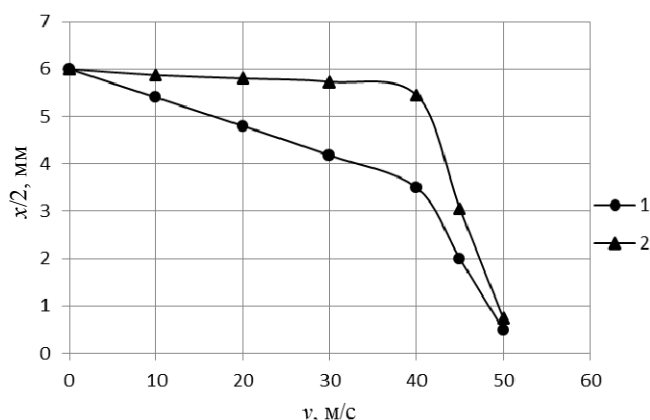


Рис. 6. Зависимость осевого размера магнитожидкостной пробки $x/2$ от скорости вращения вала: 1 – магнитная жидкость ММТ-50; 2 – то же с многослойными углеродными нанотрубками концентрацией $c = 2\%$

Fig. 6. Dependence of the axial size of magnetofluidic stoppers $x/2$ on rotation speed of the shaft: 1 – ММТ-50 magnetic fluid; 2 – ММТ-50 magnetic fluid with multilayer carbon nanotubes $c = 2\%$

Для повышения устойчивости свободной поверхности магнитной жидкости в поле центробежных сил в нее вводили МУНТ, образующие структуры при внешнем магнитном поле [11]. Многослойные углеродные нанотрубки представляют собой немагнитные цилиндры диаметром до 300 нм, длиной до 20 мкм и плотностью 1500 кг/м^3 . Концентрация МУНТ в магнитной жидкости ММТ-50 $c = 2\%$ весовых частей.

Методом визуализации исследовали структурирование МУНТ в магнитной жидкости в рабочем зазоре уплотнения. В зазор помещали стеклянную подложку, на которую наносили слой магнитной жидкости с МУНТ. Образец высушивали в магнитном поле уплотнения. Затем проводили анализ с помощью электронного микроскопа MIRA 3 TESCAN. В осевом направлении немагнитные МУНТ вытеснялись из области мак-

симального градиента магнитного поля (радиальный зазор $h = 0,2$ мм, $H_{\max} = 720$ кА/м) и образовывали структуры в области магнитных полей от $H = 450$ кА/м до $H = 180$ кА/м (свободная поверхность магнитной жидкости в статике). Типичная картина структур МУНТ у поверхности вала представлена на рис. 7.

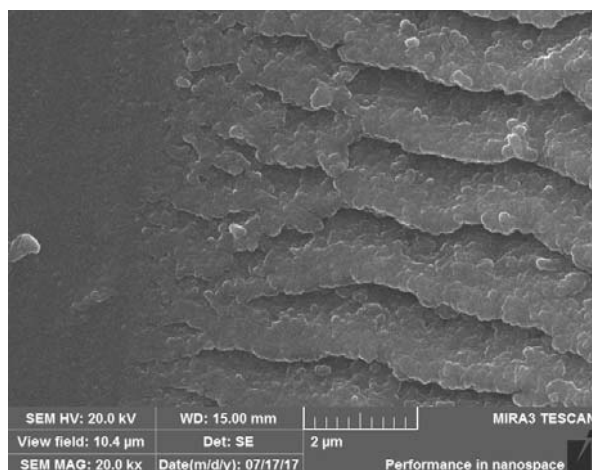


Рис. 7. Структуры многослойных углеродных нанотрубок у поверхности вала (ось вала вертикальная)

Fig. 7. Structures of multilayer carbon nanotubes at the shaft surface (the shaft axis is vertical)

На немагнитные МУНТ в магнитной жидкости во внешнем магнитном поле действует ориентирующий момент, обеспечивающий структурирование МУНТ вдоль силовых линий магнитного поля [12]:

$$Q_m = \mu_0 M^2 V_M, \quad (3)$$

где V_M – объем МУНТ.

По методике, предложенной в [12], экспериментально исследовали влияние наноуглеродных структур на распределение давления в слое магнитной жидкости площадью 800 мм^2 и высотой 5 мм .

Магнитная жидкость удерживалась двумя жестко закрепленными постоянными самарий-кобальтовыми магнитами, нагрузка на свободную поверхность жидкости осуществлялась калиброванными грузами через немагнитный шток. Как видно на рис. 8, при статической нагрузке структуры МУНТ увеличивали удерживаемое слоем магнитной жидкости давление. Причем полученный эффект зависел от ориентации вектора силы нагрузки и оси структур: при их сонаправленности соответствовал 100 % (кривые 1, 2), при векторе силы, нормальном к оси структур, – 50 % (кривые 3, 4).

При заправке уплотнения магнитной жидкостью ММт-50 с МУНТ наблюдалось повышение устойчивости свободной поверхности жидкости до скорости вращения вала $v < 40$ м/с: при $v = 18$ м/с возникла воронка на

расстоянии 3 мм от поверхности вала, которая развивалась с увеличением скорости вращения (рис. 9); при $v > 40$ м/с происходил частичный выброс магнитной жидкости из рабочего зазора; при $v = 50$ м/с вся жидкость выбрасывалась из зазора.

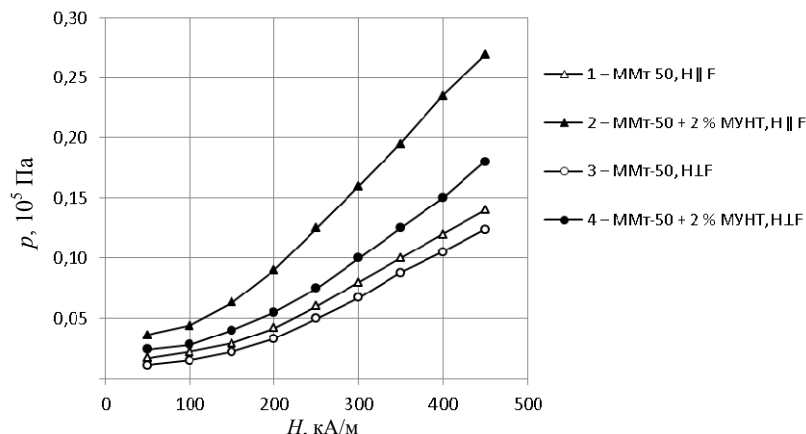


Рис. 8. Зависимость давления p от магнитного поля H (F – вектор силы нагрузки)

Fig. 8. Dependence of pressure p on magnetic field H (F is the load force vector)



Рис. 9. Магнитная жидкость ММт-50 с многослойными углеродными нанотрубками у поверхности вала

Fig. 9. ММт-50 magnetic fluid with multilayer carbon nanotubes ($c = 2\%$) at the shaft surface

Введение МУНТ в магнитную жидкость увеличивало удерживаемый уплотнением перепад давлений, при $v = 40$ м/с эффект достигал максимума и соответствовал 50 % (рис. 4, кривая 2). При этом повышалась устойчивость осевого размера магнитожидкостного слоя (рис. 6, кривая 2).

Известно, что существенную роль при использовании МУНТ играют силы Ван-дер-Ваальса (притяжения), которые являются короткодействующими и велики при небольших расстояниях между МУНТ, между МУНТ и металлическими поверхностями [13]. Эти силы носят электростатический характер. В [13] экспериментально установлено, что адгезионная прочность соединения МУНТ с металлической поверхностью зависит от направления внешней силы относительно оси МУНТ: при растяжении или сжатии нанотрубки сила отрыва составляла единицы микроныютон, при

изгибе нанотрубки – на два порядка ниже. Очевидно, что увеличение давления, удерживаемого слоем магнитной жидкости со структурами МУНТ в статике, определялось адгезионным взаимодействием между МУНТ, причем прочность структур на сжатие была выше на 50 % по сравнению с изгибом (рис. 8). Следовательно, основным механизмом увеличения удерживаемого высокоскоростным уплотнением перепада давлений при введении МУНТ в магнитную жидкость являлось структурообразование МУНТ и электростатическое притяжение между ними и поверхностью вала. При скорости $v = 40$ м/с совместное воздействие центробежных и гидродинамических сил приводило к разрушению структур МУНТ, удерживаемый перепад давлений резко снижался (рис. 4, кривая 2).

ВЫВОДЫ

1. В рабочем зазоре магнитоожидкостного уплотнения многослойные углеродные нанотрубки образуют структуры в области малых градиентов магнитного поля.

2. Добавка в магнитную жидкость 2 % многослойных углеродных нанотрубок повышает устойчивость ее свободной поверхности в поле центробежных сил и увеличивает удерживаемый уплотнением перепад давлений с ростом скорости вращения вала. Максимальный эффект 50 % получен при $v = 40$ м/с.

3. Магнитоожидкостные уплотнения с добавками многослойных углеродных нанотрубок являются эффективными герметизаторами для валов ветроэнергетических установок при скорости вращения от 0 до 40 м/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Твайделл, Дж. Возобновляемые источники энергии / Дж. Твайделл, А. Уэйр; пер. с англ. под ред. В. А. Коробова. М.: Энергоатомиздат, 1990. 391 с.
2. Михалев, Ю. О. Исследование ферроожидкостных уплотнений / Ю. О. Михалев, Д. В. Орлов, Ю. И. Страдомский // Магнитная гидродинамика. 1979. Т. 15, № 3. С. 69–76.
3. Берковский, Б. М. Магнитные жидкости / Б. М. Берковский, В. Ф. Медведев, М. С. Краков. М.: Химия, 1989. 240 с.
4. Петруша, Ю. С. Перспективы развития ветроэнергетики в Республике Беларусь / Ю. С. Петруша, Н. А. Попкова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 2. С. 124–134. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-124-134>.
5. Берковский, Б. М. Проблемы разработки и пределы использования магнитоожидкостных уплотнений / Б. М. Берковский, М. С. Краков, В. К. Рахуба // Магнитная гидродинамика. 1982. Т. 18, № 1. С. 85–93.
6. Матусевич, Н. П. Экспериментальное исследование гидродинамических и тепловых процессов в магнитоожидкостных уплотнениях / Н. П. Матусевич, В. К. Рахуба, В. А. Чернобай // Магнитная гидродинамика. 1983. Т. 19, №1. С. 125–129.
7. Чернобай, В. А. Тепловые и гидродинамические процессы в высокоскоростных магнитоожидкостных уплотнениях, разработка их конструкций: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / В. А. Чернобай. Минск, 1983. 175 с.
8. Вислович, А. Н. Влияние центробежных и капиллярных сил на форму свободной поверхности магнитоожидкостного уплотнения / А. Н. Вислович, В. К. Полевиков // Магнитная гидродинамика. 1994. Т. 30, №1. С. 77–86.
9. Полевиков, В. К. Моделирование магнитоожидкостного уплотнения при наличии перепада давления / В. К. Полевиков, Л. Тобиска // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2001. № 6. С. 42–51.

10. Pogiritskaya, S. Experimental Study of a Dynamics of the Magnetic Fluid Free Surface in the High Speed Seal / S. Pogiritskaya, V. Chernobai // XII International Conf. on Magnetic Fluids: Abstracts. Sendai, 2010.
11. Лабкович, О. Н. Снижение потерь на трение при вихревом течении магнитной жидкости добавками углеродных нанотрубок / О. Н. Лабкович // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 3. С. 265–275. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-3-265-275>.
12. Labkovich, O. N. Influence of Carbon Nanotubes on the Dissipation of Disturbances in a Magnetic Fluid Layer / O. N. Labkovich, S. G. Pogiritskaya, V. A. Chernobay // Magnetohydrodynamics. 2021. Vol. 57, Iss. 2. P. 273–280. <https://doi.org/10.22364/mhd.57.2.10>.
13. Исследование адгезии вертикально ориентированных углеродных нанотрубок к подложке методом атомно-силовой микроскопии / О. А. Агеев [и др.] // Физика твердого тела. 2016. Т. 58, Вып. 2. С. 301–306.

Поступила 02.09.2022 Подписана в печать 04.11.2022 Опубликована онлайн 31.01.2023

REFERENCES

1. Twidell J. W., Weir A.D. (1986) *Renewable Energy Resources*. New York, Taylor & Francis, 439.
2. Mikhalev Yu. O., Orlov D. V., Stradomskii Yu. I. (1979) Ferrofluid Seals. *Magnitnaya Gidrodinamika = Magnetohydrodynamics*, 15 (3), 69–76 (in Russian).
3. Berkovskii B. M., Medvedev V. F., Krakov M. S. (1989) *Magnetic Fluids*. Moscow, Khmiya Publ. 240 (in Russian).
4. Petrusha U. S., Papkova N. A. (2019) The Prospects for Wind Energy Development in the Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 124–134. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-124-134> (in Russian).
5. Berkovskii B. M., Krakov M. S., Rakhuba V. K. (1982) Design Problems and Use Limitations for Magnetic-Fluid Seals. *Magnitnaya Gidrodinamika = Magnetohydrodynamics*, 18 (1), 85–93 (in Russian).
6. Matusevich N. P., Rakhuba V. K., Chernobai V. A. (1983). Experimental Investigation of Hydrodynamic and Thermal Processes in Magnetofluid Seals. *Magnitnaya Gidrodinamika = Magnetohydrodynamics*, 19 (1), 125–129 (in Russian).
7. Chernobai V. A. (1983) *Thermal and Hydrodynamic Processes in High-Speed Magnetofluidic Seals, Development of Their Designs*. Minsk. 175 (in Russian).
8. Vislovich A. N., Polevnikov V. K. (1994) Effect of the Centrifugal and Capillary Forces on the Free Surface Shape of a Magnetic Liquid Seal. *Magnitnaya Gidrodinamika = Magnetohydrodynamics*, 30 (1), 77–86 (in Russian).
9. Polevnikov V. K., Tobiska L. (2001) Modeling of a Dynamic Magneto-Fluid Seal in the Presence of a Pressure Drop. *Fluid Dynamics*, 36 (6), 890–898. <https://doi.org/10.1023/A:1017906408433>.
10. Pogiritskaya S., Chernobai V. (2010) Experimental Study of a Dynamics of the Magnetic Fluid Free Surface in The High Speed Seal. *XII International Conf. on Magnetic Fluids: Abstracts*. Sendai, 2010.
11. Labkovich O. N. (2017) Reduction of Friction Losses due to the Vortex Flow of the Magnetic Fluid Caused by the Additives of Carbon Nanotubes *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (3), 265–275. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-3-265-275> (in Russian).
12. Labkovich O. N., Pogiritskaya S. G., Chernobay V. A. (2021) Influence of Carbon Nanotubes on the Dissipation of Disturbances in a Magnetic Fluid Layer. *Magnetohydrodynamics*, 57 (2), 273–280. <https://doi.org/10.22364/mhd.57.2.10>.
13. Ageev O. A., Blinov Y. F., Il'ina M. V., Il'in O. I., Smirnov V. A., Tsukanova O. G. (2016) Study of Adhesion of Vertically Aligned Carbon Nanotubes to a Substrate by Atomic-Force Microscopy. *Physics of the Solid State*, 58 (2), 309–314. <https://doi.org/10.1134/s1063783416020037>.

Received: 2 September 2022 Accepted: 4 November 2022 Published online: 31 January 2023