

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ УСТРОЙСТВ В КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

Радионо́в А. В.¹, Селезов И. Т.²

¹*Научно-производственное внедренческое предприятие «Феррогидродинамика», Николаев*

²*Институт гидромеханики Национальной Академии наук Украины, Киев*

Магнитные жидкости (МЖ) были впервые получены в США в середине 1960-х годов. Именно в это время США прилагали грандиозные усилия для реализации проекта «Аполлон» с первым в истории полетом человека на Луну. В ходе работ по этому проекту специалистам из НАСА пришлось осуществить широкий комплекс исследований, связанных, во-первых, с созданием абсолютно надежных герметизаторов между подвижными элементами космических скафандров и, во-вторых, с разработкой способов подачи жидкого ракетного топлива по трубопроводам. В качестве средства, которое смогло обеспечить решение обеих проблем, Пейпелл разработал и запатентовал принципиально новую среду, которую назвал магнитной жидкостью.

И уже в 1969 г. было первое внедрение магнитных жидкостей. В шлеме скафандра первого на Земле человека, вступившего на Луну, был применен магнитожидкостный вакуумный герметизатор, который обеспечил свободное вращение шлема [1].

В настоящее время разработкой магнитожидкостных устройств занимается целый ряд организаций во многих странах (США, Япония, Германия, Великобритания, Россия и т. д.).

Пик исследований в России приходится на 1980-е годы. Именно в это время опытные образцы магнитожидкостных герметизаторов были испытаны на орбитальной станции «Мир» и аппаратах «Буран», «Фобос», «Марс» и др. [2]. В настоящее время интенсивность проводимых работ по целому ряду причин снижена.

МЖГ обладают рядом существенных преимуществ: малые потери на трение, обеспечение полной герметичности, безизносность, эффект самовосстановления в случае аварийного прорыва уплотняемой среды, высокие надежность и долговечность, простота в изготовлении и обслуживании.

С начала 1990-х годов НПВП «Феррогидродинамика» установила МЖГ более чем на 60 предприятиях Украины и России. В основном это крупные предприятия нефтеперерабатывающей, химической и металлургической промышленности [3].

Наиболее эффективными МЖГ оказались для защиты дорогостоящего оборудования от капельной влаги и водяного тумана, пыли, мелкодисперсных сыпучих сред и в целом практически от любого абразива. Они показали высокую надежность и в течение длительного времени не требовали вообще обслуживания. Кроме них массово МЖГ устанавливались на выносные подшипниковые узлы крупных электрических машин и механизмов для защиты от вытекания масла. Достаточно хорошо зарекомендовали себя и вакуумные МЖГ. При соответствующей доработке, учитывающей специфику космической техники, они могут быть применены и для таких аппаратов.

Накопленный опыт позволяет вплотную заняться применением герметизаторов в космической технике. Затраты на создание более устойчивых коллоидных систем с заданными свойствами и изучение физико-химических свойств и процессов, протекающих в магнитных жидкостях, не должны быть значительными.

Для высокоскоростных МЖ (линейные скорости в зазоре от 25 м/с и выше) необходимо исследовать взаимовлияние центробежных и магнитных сил. Этой проблеме в литературе уделяется мало внимания, так как в основном рассматривается схема, когда влияние магнитных сил значительно больше центробежных.

Необходимо отметить, что теоретический анализ магнитожидкостных устройств представляет большие трудности в связи со сложностью уравнений, описывающих поведение магнитных жидкостей. В связи с этим здесь будет представлен приблизительный анализ, позволяющий получить некоторые качественные и количественные результаты.

В предположении, что среда вязкая несжимаемая, а движение стационарное, уравнения, описывающие движение магнитной жидкости, записываются в виде [4, 5]

$$(\vec{V} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} = -\vec{\nabla}p + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \vec{V} + \chi \frac{1}{\text{Fr}_m} \rho H \vec{\nabla} H, \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0, \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = 0, \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{H} + \vec{M}) = 0, \quad (4)$$

где \vec{V} — вектор скорости, \vec{H} — вектор напряженности магнитного поля, \vec{M} — вектор намагниченности, P — давление, χ — магнитная восприимчивость, $\vec{\nabla}$ — оператор градиента, Re — число Рейнольдса, Fr_m — магнитное число Фруда, которое определяется по формуле

$$\text{Fr}_m = \frac{\rho(V_{0\theta}^s)^2}{r_s \mu_0 M_s |\vec{\nabla} H|} = \frac{\rho(V_{0\theta}^s)^2 L}{r_s \mu_0 M_s h_{\max}} = \frac{\rho(V_{0\theta}^s)^2 L}{\Delta p_{CT} r_s}, \quad (5)$$

где $|\vec{\nabla} H| \approx H_{\max} / L$; L — характерный пространственный размер неоднородности магнитного поля; $\Delta p_{CT} = \mu_0 M_s H_{\max}$, $V_{0\theta}$ — скорость поверхности вала.

МЖ-герметизатор занимает область, ограниченную в радиальном направлении валом и внешним корпусом и ограниченную в осевом направлении свободными поверхностями, удерживаемыми силами поверхностного натяжения. Для оценки влияния центробежных сил можно в первом приближении отдельно рассматривать задачу для вязкой жидкости.

Учитывая, что концентрация полей имеет место в центральной зоне герметизатора, где влияние боковых границ мало проявляется, можно для оценки влияния центробежных сил рассматривать плоскую задачу.

В этом случае задача сводится к интегрированию уравнений Навье – Стокса в цилиндрической системе координат (r, θ, z) , включающей уравнения сохранения импульса (следует из (1)):

$$V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_\theta^2}{r} = -\frac{\partial p_r}{\partial r} + \frac{1}{\text{Re}} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \theta^2} - \frac{V_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} \right], \quad (6)$$

$$V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{V_r V_\theta}{r} = -\frac{1}{r\rho} \frac{\partial p_r}{\partial \theta} + \frac{1}{\text{Re}} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \theta^2} - \frac{V_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} \right], \quad (7)$$

и уравнение неразрывности (следует из (2))

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{1}{r} V_r + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} = 0. \quad (8)$$

На цилиндрических поверхностях должны выполняться граничные условия

$$V_r(r, \theta) \Big|_{r=r_e} = 0, \quad V_r(r, \theta) \Big|_{r=1} = 0, \quad (9)$$

$$V_\theta(r, \theta) \Big|_{r=r_e} = 0, \quad V_\theta(r, \theta) \Big|_{r=1} = 1, \quad (10)$$

$$p_r(r, \theta) \Big|_{r=1} = \frac{p_0^s(\theta)}{\rho(V_{0\theta}^s(\theta))^2}, \quad (11)$$

где $\text{Re} = \frac{r_s V_{0\theta}^s}{\nu}$.

В случае, если нет девиации вала в зазоре, задача может рассматриваться как осесимметричная, так что производные искомых функций по дуговой координате равны нулю $\frac{\partial}{\partial \theta}(\cdot) \equiv 0$. Кроме того, представим поле скоростей $\vec{V}(r) = \{V_r, V_\theta, 0\}$ и давление p в виде

$$V_r = V_{0r}(r), \quad V_\theta = V_{0\theta}(r), \quad p = p_{0r}(r). \quad (12)$$

При указанных выше предположениях получаем решение задачи (6) – (11) для окружной скорости

$$V_{0\theta} = \frac{(r_e^2 - r^2)^2}{r(r_e^2 - 1)}, \quad (13)$$

которая нелинейно зависит от r в отличие от [4], где эта зависимость постулировалась линейной.

Аналогично получаем решение для давления:

$$p_{0r} = \frac{p_0^s}{\rho(V_{0\theta}^s)^2} - \frac{1-r_e^4}{2(1-r_e^2)^2} + \frac{1}{(r_e^2-1)^2} \left[\frac{r^2}{2} - 2r_e^2 \ln r - \frac{r_e^4}{2r^2} \right]. \quad (14)$$

Увеличение скорости вращения вала существенно влияет как на удерживаемый уплотнителем перепад давления, так и на ресурс МЖГ. Это связано с тем, что на распределение давления кроме магнитных сил влияют и центробежные силы, так что осевому градиенту давления, вызванному магнитной объемной силой $\mu_0 M_s \vec{\nabla} H$ добавляется радиальный градиент давления $\propto v^2 / r_s$, вызванный движением жидкости.

Для перепада давления в случае линейного закона изменения скорости получаем выражение [4]

$$\Delta p = \Delta p_{ct} - \rho(V_{0\theta}^s)^2 h / (2r_s). \quad (15)$$

В случае нелинейного закона (9) получаем

$$\Delta p = \Delta p_{ct} + \frac{2\rho(V_{0\theta}^s)^2 r_s^2}{((h+r_s)^2 - r_s^2)^2} \left(\frac{r_s^4 - (h+r_s)^4}{2r_s^2} + 2(h+r_s)^3 \left(\frac{4}{3} - \ln(h+r_s) \right) - 2(r_s+h)^2 r_s (\ln r_s - 1) + \frac{r_s^3}{6h} + \frac{(h+r_s)^4}{2hr_s} \right). \quad (16)$$

Расчеты перепада давления проводились по формулам (15) и (16) для различных величин зазора МЖГ.

Расчеты показали, что независимо от величины зазора при нелинейном законе изменения скорости вращения происходит плавное уменьшение удерживаемого перепада давления в отличие от линейного закона изменения вращения вала, когда наблюдается резкий скачок в уменьшении удерживаемого перепада давления.

Для учета совместного влияния магнитных и центробежных сил задача должна рассматриваться в более точной постановке на основе уравнений, описывающих поведение магнитной жидкости (уравнения(1) – (5)).

В отличие от предыдущей задачи, эта задача не может быть решена в плоской постановке, поскольку магнитные силовые линии H_r в зазоре сильно концентрированы в средней очень узкой по ширине зоне в пределах кольцевой области $z \in [-b, b]$, заполненной магнитной жидкостью. Эта сильная неоднородность магнитных силовых линий в осевом направлении z характеризуется большими градиентами.

В дальнейшем проводится приближенная оценка влияния магнитных сил в МЖГ. Следуя [4], будем полагать магнитное поле, линейно убывающим в обе стороны от плоскости симметрии $z = 0$ с градиентом напряженности $\vec{\nabla} H \equiv \vec{G}$. Такая система способна удерживать перепад давления $\Delta p_{ct} = \mu_0 M_s G 2l$, где $2l$ – длина магнитожидко-

стного запорного элемента, $G = \left| \vec{\nabla} H \right|$. Вращение вала отбрасывает магнитную жидкость к полюсу, и ее форма изменяется. При этом вблизи вала длина магнитожидкостной пробки уменьшается, т. е. уменьшается удерживаемый уплотнением перепад давления.

Из расчетов следует, что при малых величинах F_{r_m} имеет место резкое убывание удерживаемого перепада давления при линейном законе скорости и более плавное — при нелинейном, т. е. более точный анализ предсказывает меньшее влияние центробежных сил на удерживаемый перепад давления.

Экспериментальные исследования показали, что усилить нелинейность распределения скорости можно также организовав гидродинамический отрыв потока масла по валу и сливные масляные канавки в непосредственной близости от МЖГ.

МЖГ с подобными конструктивными решениями устанавливались, и в течение нескольких лет нормально эксплуатируются на подшипниках синхронных электродвигателей типа СДН, служащих для привода сетевых водяных насосов ЦНД, установленных на Черкасском ПО «Азот», подшипниках электродвигателя ГЕК – 42585 мощностью 2500 кВт привода турбокомпрессора окиси углерода Северодонецкого ГПП «Азот», подшипниках различных компрессоров РГХП «Сера» и Горловского ОАО «Концерн Стирол» и т.д. [6].

Работа поддерживается Фондом фундаментальных исследований Украины (Проект № 01.07/00079)

1. Такетоми С., Тикадзуми С. Магнитные жидкости: Пер. с японск.- М. Мир,1993.-272 с.
2. Яковенков К. Ф., Ярош В. М. Обеспечение ресурса магнитожидкостных уплотнений электромеханических устройств космических аппаратов // 18-я Международная Плесская конференция по магнитным жидкостям, Плес, Россия, 1998.- с. 207.
3. Радіонов О. В., Виноградов О. М. Досвід застосування магніторідинних пристроїв у НВВП «Ферогідродинаміка» // Вісті Академії інженерних наук України. – 1999, № 1.-с. 39-46.
4. Берковский Б. М., Медведев В. Ф., Краков М. С. Магнитные жидкости. М.: Химия, 1989. – 240 с.
5. Selezov I. Some wave problems of magnetofluids. Book of Abstracts // 9th Int. Conference on Magnetic Fluids, Bremen, Germany, 23-27 July, 2001.
6. Радионов А. В., Виноградов А. Н. Анализ опыта применения магнитожидкостных герметизаторов на химических и нефтеперерабатывающих предприятиях // Тр. IX междунар. науч.-техн. конф. «Герметичность, вибронадежность и экономическая безопасность насосного и компрессорного оборудования». – Сумы, 1999. – С. 245-249.