

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Решение ряда технических задач невозможно без использования магнитожидкостных герметизаторов. К таким задачам относятся: герметизация вращающихся валов, люков, крышек вакуумной арматуры, работающей в условиях глубокого вакуума до  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  Па, валов химических и биологических реакторов, энергетического и электротехнологического оборудования. Кроме того, замена традиционных уплотнений на магнитожидкостные герметизаторы улучшает технические характеристики действующего технологического оборудования, обеспечивает требуемую экологическую обстановку химических и биологических производств.

Потеря герметичности вводов вращающихся валов технологического оборудования приводит к нарушению эксплуатационных режимов работы, браку продукции, а в некоторых случаях — к аварии оборудования. Поэтому к уплотнениям вращающихся валов предъявляются высокие требования по надежности работы, степени герметичности, отсутствию утечек герметизируемой среды или перемешиванию сред друг с другом.

Применение магнитожидкостных герметизаторов (МЖГ) по сравнению с традиционными типами уплотнений [1], [2] создает условия для значительного повышения надежности и эффективности работы узлов технологического оборудования.

Основными преимуществами МЖГ перед традиционными уплотнениями является практически абсолютная герметичность, малый собственный момент трения, отсут-

ствие износа, высокая долговечность и простота технического обслуживания. МЖГ надежно эксплуатируется при вибрациях и ударах, обладает высокой радиационной стойкостью.

Представленная работа начиналась в коллективе сотрудников Специального конструкторско-технологического бюро «Полюс» (г. Иваново), в котором автор отработал более 20 лет, начиная с 1980 г.

За эти годы сотрудники СКТБ «Полюс» создали около 20 марок магнитных жидкостей, разработали отраслевые стандарты и ТУ на их изготовление. МЖГ прошли промышленную апробацию и успешно эксплуатируются на космических аппаратах, химических и биологических реакторах, в установках вакуумной плавки и электронно-лучевой сварки, в технологических газовых лазерах, в механизмах передачи движения.

Благодаря применению новых конструкций МЖГ удалось найти технические решения, не имеющие аналогов в отечественной и зарубежной практике и продлить их гарантийные сроки эксплуатации до 10–15 лет, например, на космической орбитальной станции «Мир».

Особый вклад в организацию СКТБ «Полюс», разработку стратегических направлений исследований по магнитным жидкостям и их применению в технике внес первый директор — главный конструктор, доктор технических наук, профессор Д. В. Орлов. Большой вклад в развитие научного направления внесли руководители организации доктор технических наук, профессор А. П. Сизов и доктор технических наук, заслуженный изобретатель России, академик Российской Академии космонавтики, профессор Ю. О. Михалев.

Следует отметить большую работу, проведенную в области исследований и конструкторских разработок, кандидата технических наук, доцента С. И. Евсина, кандидата технических наук, доцента Н. И. Дюповкина, начальников отделов А. Б. Потапова, члена-корреспондента Российской Академии космонавтики С. Г. Лысенкова, А. Г. Курченкова, ведущих инженеров А. М. Землякова, Н. А. Дубровина, Т. А. Липатовой, ведущих технологов С. И. Новиковой, А. В. Фингеровой, Т. В. Масленниковой, кандидата химических наук Л. А. Бобко, инженеров-конструкторов

---

А. А. Антипова, В. Ю. Егорова, А. И. Лапочкина, Н. Н. Королева, инженера-технолога Т. А. Арефьевой.

При непосредственном участии автора проводились разработки магнитожидкостных герметизаторов и их исследования для предприятий аэрокосмического комплекса: ОАО «Научно-производственного объединения Геофизика-НВ», ФГУП «Научно-производственного объединения им. С. А. Лавочкина», «ЦСКБ — Прогресс», Ракетно-космической корпорации «Энергия» им. С. П. Королева, предприятий машиностроительного комплекса: ОКБ «Гранат», ОКБ «Радуга», НПО «Гелиймаш», ПО «Волжский машиностроительный завод», Центрального научно-исследовательского института робототехники и технической кибернетики, предприятий химической, биологической и текстильной промышленности: ОАО «Славнефть-Ярославнефтеоргсинтез», ОАО «Лакокраска» (г. Ярославль), экспериментального завода ветеринарных биопрепаратов «Юрьецветбиопрепарат» (Владимирская обл.), НИЭЖМИ (г. Иваново), льнокомбината им. И. Д. Зворыкина (г. Приволжск, Ивановская обл.).

Работы этого коллектива явились основой для проведения дальнейших исследований, разработок и внедрений магнитожидкостных герметизаторов.

## Глава 1

---

# ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕРМЕТИЗАТОРАХ НА ОСНОВЕ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

### 1.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГЕРМЕТИЗАТОРА НА ОСНОВЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

Принцип действия МЖГ состоит в следующем (рис. 1.1). В рабочий зазор  $\delta$ , образованный между обращенными друг к другу внутренними цилиндрическими поверхностями полюсных приставок 1 и цилиндрической поверхностью вала 2, помещают магнитную жидкость (МЖ) 3.

Она представляет собой коллоидный раствор частиц магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в жидкости носителя [3]–[5]. Для предотвращения слипания ферромагнитных частиц друг с другом их покрывают стабилизатором, в качестве которого используют поверхностно-активные вещества (ПАВ). Малый размер частиц ферромагнетика (порядка 100 нм) и их тепловое движение препятствуют слипанию и оседанию частиц и обеспечивают устойчивость магнитной жидкости как коллоидной системы. Объемная концентрация частиц магнетита в жидкости-носителе (до 20%) обеспечивает значительный магнитный момент единичного объема

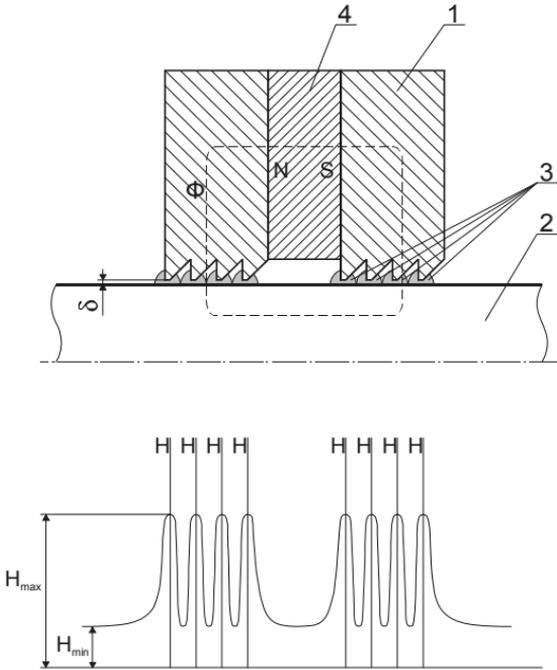
МЖ. Он определяется суммой магнитных моментов частиц, входящих в этот объем [6], [7]:

$$\bar{M} = \sum_{i=1} \bar{m}_i, \quad (1.1)$$

где момент одной частицы

$$\bar{m} = V' M', \quad (1.2)$$

$V'$  — объем одной частицы;  $M'$  — намагниченность насыщения магнетита.



**Рис. 1.1**

*Распределение напряженности магнитного поля в рабочем зазоре МЖГ*

МЖ 3 взаимодействует с полем постоянного магнита 4 и удерживается в рабочем зазоре пондеромоторной силой. Она возникает при взаимодействии магнитного момента единичного объема МЖ с неоднородным магнитным полем:

$$\bar{F} = \mu_0 \bar{M} \nabla \bar{H}, \quad (1.3)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная;  $\bar{M}$  — намагниченность насыщения магнетита (А/м);  $\nabla \bar{H}$  — градиент напряженности магнитного поля (А/м<sup>2</sup>).

Величина этой силы зависит от неоднородности магнитного поля, действующего на МЖ, и от свойств этой жидкости.

С целью создания неоднородного магнитного поля в рабочем зазоре на обращенных к валу цилиндрических полюсных приставках выполнены зубцы. Магнитная жидкость является парамагнетиком [3], [4]. Ее относительная магнитная проницаемость составляет  $1 < \mu_{\text{МЖ}} \leq 1,2$ . Таким образом, ее присутствие в рабочем зазоре герметизатора незначительно влияет на напряженность магнитного поля под зубцом МЖГ. Так как напряженность магнитного поля под каждым зубцом МЖГ достигает  $10^5 - 10^6$  А/м [3], [4], то при определении критического перепада давлений в МЖГ для существующих расчетных моделей принимают допущения [8], [9]:

- МЖ имеет одинаковую концентрацию дисперсной фазы во всем объеме;
- МЖ в рабочем зазоре находится в состоянии насыщения:  $M(H) = M_s$ , что обуславливает совпадение направлений векторов напряженности внешнего магнитного поля и намагниченности МЖ.

Согласно гидродинамическому уравнению для несжимаемой магнитной жидкости [7]

$$\rho \frac{d\bar{V}}{dt} = -\nabla p + \rho \bar{g} + \eta \nabla^2 \bar{V} + \bar{F}_m \quad (1.4)$$

на единицу ее объема действует магнитные  $\bar{F}_m$ , вязкостные  $\eta \nabla^2 \bar{V}$ , гравитационные  $\rho \bar{g}$  и гидродинамические силы, которые уравниваются силами внутреннего давления  $-\nabla p$  [10]. В статическом режиме, когда скорость движения магнитной жидкости равна 0, вязкостные силы отсутствуют. В МЖГ величина сил тяжести значительно меньше магнитных сил, поэтому ими можно пренебречь [11]. Тогда для статического режима уравнение (1.4) можно представить в виде

$$\nabla p = \bar{F}_m. \quad (1.5)$$

При вычислении магнитной силы через магнитную энергию единицы объема МЖ уравнение (1.5) преобразуется в уравнение Бернулли:

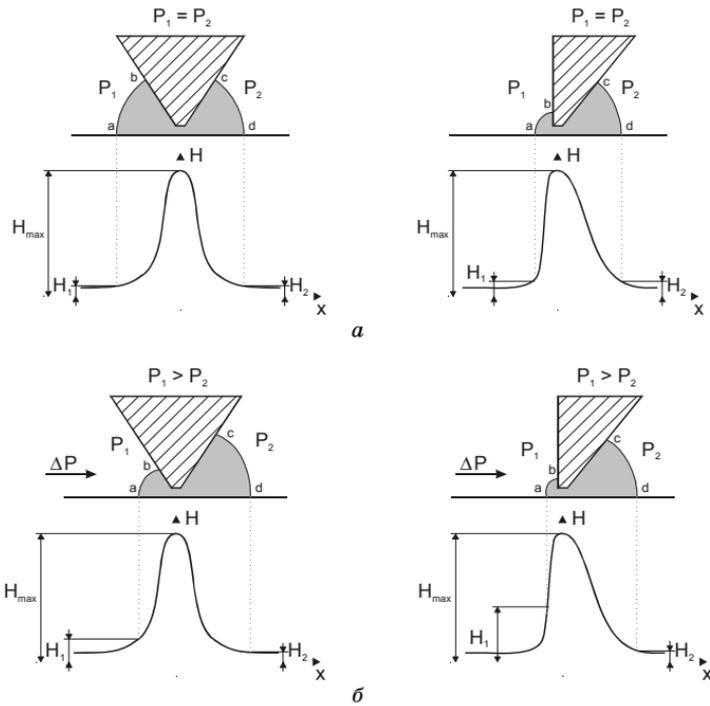
$$\nabla p = \nabla W \quad (1.6)$$

или

$$p = W_m + \text{const.} \quad (1.7)$$

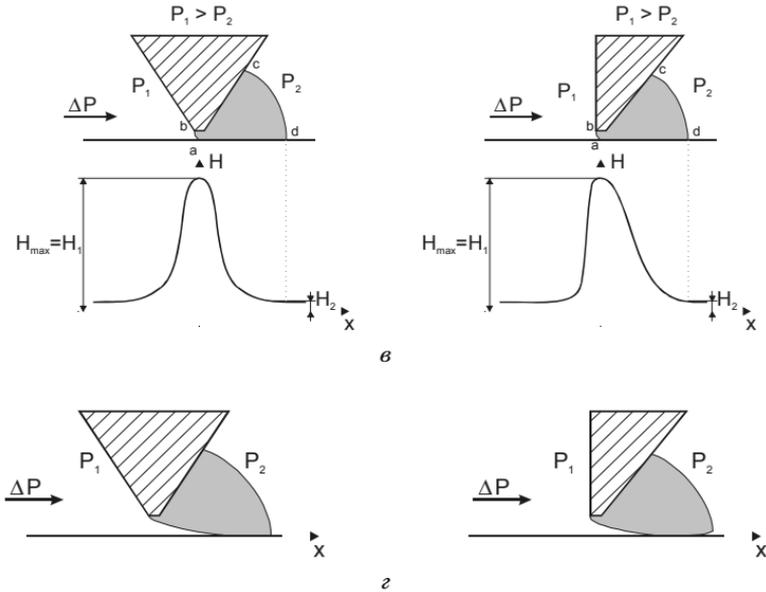
Для анализа работы МЖГ вводится понятие единичного уплотнителя, который представляет собой единичный зубец с магнитной жидкостью.

При отсутствии перепада давлений, действующего на единичный уплотнитель, он займет положение, соответствующее максимуму магнитной энергии рассматриваемого объема магнитной жидкости, вдоль линий  $a-b$  и  $c-d$  с равной напряженностью магнитного поля (рис. 1.2а).



**Рис. 1.2 (начало)**

*Положение единичного уплотнителя при отсутствии перепада давлений (а), при наличии перепада давлений (б)*



**Рис. 1.2 (окончание)**

*Положение единичного уплотнителя при критическом перепаде давлений (в), нарушение герметичности единичного уплотнителя (г)*

При воздействии на единичный уплотнитель давления  $P_1 > P_2$  происходит его смещение вдоль поверхности вала в направлении действия перепада давлений (рис. 1.2б).

Единичный уплотнитель занимает положение, при котором выполняется равенство

$$\Delta P = P_1 - P_2. \quad (1.8)$$

Принимая во внимание высказанные ранее допущения, выражение (1.8) с учетом (1.6), (1.7) можно представить в виде

$$\Delta P = W_{m1} - W_{m2}. \quad (1.9)$$

Так как изменение напряженности магнитного поля в единичном уплотнителе происходит в направлении нормальном к свободной поверхности, то перепад давлений можно представить в виде

$$\Delta P = \mu_0 M_s (H_1 - H_2), \quad (1.10)$$

где  $H_1$  и  $H_2$  — напряженности магнитного поля, соответствующие граничным поверхностям уплотнителя.

Перепад давлений, который удерживает единичный уплотнитель, ограничен максимальной величиной разности напряженностей магнитного поля по его границам в направлении оси вала. Положению единичного уплотнителя (рис. 1.26) соответствует критический перепад давлений МЖГ.

Под критическим перепадом давлений единичного уплотнителя понимают максимально возможный перепад давлений, превышение которого приводит к нарушению его герметичности (рис. 1.27).

$$\Delta P_{\text{кр1}} = \mu_0 M_{s0} (H_{\text{max}} - H_{\text{min}}), \quad (1.11)$$

где  $H_{\text{max}}$  и  $H_{\text{min}}$  — максимальная и минимальная напряженности на поверхности вала под единичным уплотнителем. Так как величина относительной магнитной проницаемости  $1 < \mu_{\text{мж}} \leq 1,2$  [3]–[5] и учитывая, что

$$\bar{B} = \mu_0 \mu \bar{H}, \quad (1.12)$$

величину критического перепада давлений единичного уплотнителя можно представить:

$$\Delta P_{\text{кр1}} = M_{s0} (B_{\text{max}} - B_{\text{min}}). \quad (1.13)$$

Критический перепад давлений МЖГ пропорционален числу единичных уплотнителей, сформированных магнитным полем под каждым зубцом полюса [12] (рис. 1.1).

$$\Delta P_{\text{кр}} = \Delta P_{\text{кр1}} \cdot N, \quad (1.14)$$

где  $N$  — число зубцов на полюсах МЖГ.

Основным показателем работы МЖГ является рабочий перепад давлений  $\Delta P$ , который меньше критического перепада давлений на величину коэффициента запаса:

$$K_3 = \frac{\Delta P_{\text{кр}}}{\Delta P}. \quad (1.15)$$

Его величина выбирается исходя из реальных условий эксплуатации и требуемого ресурса работы и составляет обычно  $K_3 = 1,5-3$ .

Снижение коэффициента запаса обусловлено старением магнитной жидкости во времени под действием магнитного поля, сдвиговых усилий и температуры [13], [14]. Это приводит к постепенному снижению критического перепада давлений и увеличению момента трения [15], [16].

Потеря работоспособности МЖГ характеризуется его разгерметизацией или увеличением собственного момента трения выше допустимого [17]:

$$\Delta P(t) \leq \Delta P_{кр}; \quad M_{тр}(t) \geq M_{доп}. \quad (1.16)$$

Зависимости (1.11) и (1.13), по определению критического перепада давлений единичного уплотнителя, справедливы при учете допущений, принятых для существующих расчетных моделей. Однако из-за неоднородности градиента индукции магнитного поля под зубцом происходит перераспределение концентрации дисперсной фазы МЖ, вызванное диффузией частиц магнетита в область большего градиента [18]. Это приводит к изменению намагниченности МЖ в объеме магнитожидкостного уплотнителя. Ее значение будет увеличиваться в областях большего градиента. Таким образом, значение намагниченности МЖ в приведенных формулах будет отличаться от исходного  $M_{с0}$ .

## 1.2. ВЗАИМОСВЯЗЬ ГРАДИЕНТА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ И КОНЦЕНТРАЦИИ ЧАСТИЦ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ В УПЛОТНИТЕЛЕ

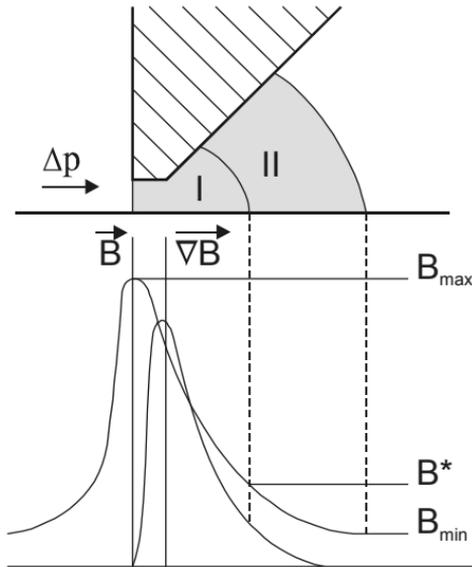
Основными характеристиками МЖГ являются рабочих перепад давлений и момент трения. Их значения зависят от интенсивности магнитного поля и степени его воздействия на МЖ в уплотнителе. Величина магнитной индукции и градиента в уплотнителе зависят от формы зубца.

При отсутствии магнитного поля частицы магнитной жидкости распределены по всему объему равномерно. Сила

тяжести, действующая на каждую из них, компенсируется броуновским движением. Концентрация частиц магнетита во всем объеме, занимаемом МЖ, постоянна.

При помещении МЖ в стационарное, неоднородное магнитное поле на каждую частицу с магнитным моментом действует сила (1.3), которая приводит к перемещению частиц магнитной жидкости по объему уплотнителя. Таким образом, весь объем разделяется на области с разной концентрацией магнитной жидкости. Большая концентрация МЖ будет в местах с наибольшей индукцией магнитного поля. В течение некоторого времени после заправки магнитной жидкости в МЖГ происходит возрастание статического перепада давлений  $\Delta p_{ст}$ . Чем больше градиент магнитного поля в зазоре МЖГ, который достигает  $\nabla B = 800 - 2000$  Тл/м, тем сильнее перераспределение концентрации частиц по объему уплотнителя.

Для учета этого эффекта возможно разделение МЖ на две области [19]–[21] с разной концентрацией (рис. 1.3) при



**Рис. 1.3**

*Разделение МЖ на две области.  
Распределение магнитной индукции  
и градиента по поверхности вала*

действию на уплотнитель критического перепада давлений. В области I концентрация магнитных частиц  $C_1$  больше, в области II —  $C_{II}$  меньше начальной  $C$ . Граница разделения областей может быть проведена для  $\bar{V}B = 150 - 350$  Тл/м, при соответствующей индукции  $B^*$ . Перераспределение концентраций частиц приводит к пропорциональному изменению намагниченностей насыщения областей уплотнителя.

Исходя из рисунка 1.3 и учитывая (1.13), разницу  $B_{\max} - B_{\min}$  можно представить в виде

$$B_{\max} - B_{\min} = (B_{\max} - B^*) + (B^* - B_{\min}). \quad (1.17)$$

С учетом перераспределения концентрации МЖ в неоднородном магнитном поле уплотнителя величина его критического перепада давлений  $\Delta P_{\text{кр}}^*$  определяется по уточненной формуле

$$\Delta P_{\text{кр}}^* = M_{s1} \cdot (B_{\max} - B^*) + M_{s2} \cdot (B^* - B_{\min}). \quad (1.18)$$

Выражение (1.18) можно представить в виде

$$\Delta P_{\text{кр}}^* = \Delta P_{\text{кр.в.к}} + \Delta P_{\text{кр.н.к}}, \quad (1.19)$$

где

$$\Delta P_{\text{кр.в.к}}^* = M_{s1} \cdot (B_{\max} - B^*) \quad (1.20)$$

— критический перепад давлений в области высокой концентрации частиц;

$$\Delta P_{\text{кр.н.к}}^* = M_{s2} \cdot (B^* - B_{\min}) \quad (1.21)$$

— критический перепад давлений в области низкой концентрации частиц.

Исследование влияния градиента магнитной индукции на концентрацию дисперсной фазы в уплотнителе проводилось на разработанном стенде (рис. 1.4) [22].

Стенд состоит из системы подачи сжатого газа и регистрации перепада давлений 1, привода 2 и корпуса 3, в котором на подшипниках 4 установлен вал 5 привода с цилиндрической насадкой 6 и винтом крепления 7. Магнитный узел стенда состоит из постоянного магнита 8, соединительного немагнитопроводного кольца 9, полюсных

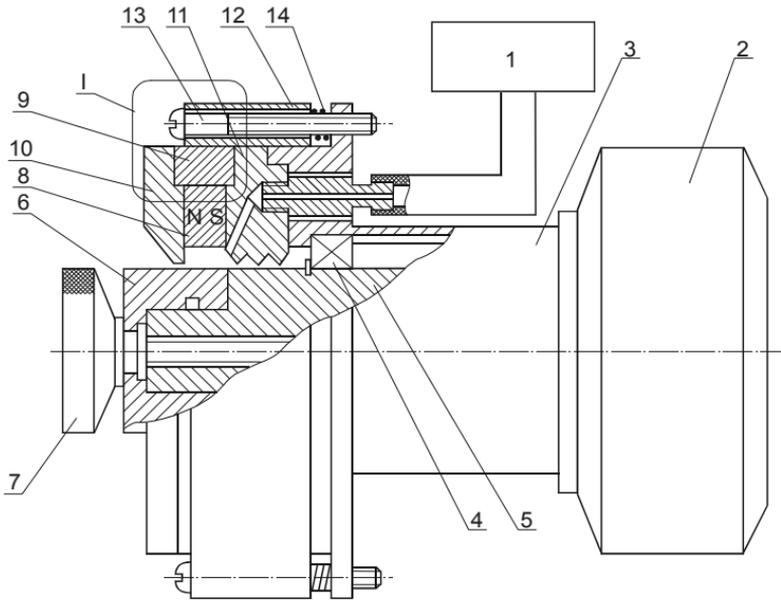


Рис. 1.4

*Стенд для исследования влияния градиента магнитной индукции на изменение концентрации магнитной жидкости в уплотнителе*

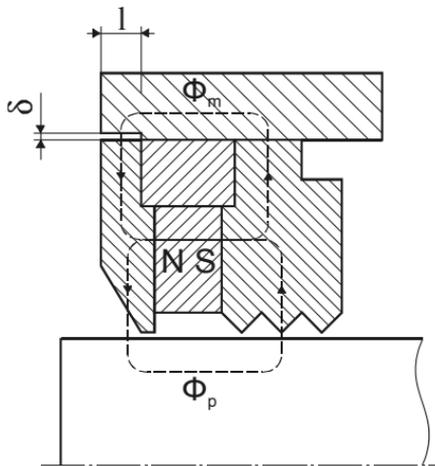


Рис. 1.5

*Распределение магнитных потоков в МЖГ*

приставок 10 и 11 и магнитного шунта 12. Для его перемещения предусмотрены винты 13 и пружины 14. Зазор между рабочей полюсной приставкой 10 и цилиндрической насадкой 6 заполняется исследуемой, а зазор между полюсной приставкой 11 и валом 5 защитной магнитной жидкостью соответственно. При этом должно соблюдаться условие, при котором критический перепад давлений защитного МЖГ был бы заведомо больше критического перепада давлений единичного уплотнителя.

Значение максимальной магнитной индукции и градиента в уплотнителе регулируется положением магнитного шунта. Магнитный поток, создаваемый постоянным магнитом, разделяется на два: рабочий поток  $\Phi_p$  и поток шунта  $\Phi_{ш}$  (рис. 1.5).

Изменяя положение шунта, поток магнита перераспределяется. Изменяются параметры магнитного поля в единичном уплотнителе. При минимальном значении  $l$  величина магнитной индукции и градиента в единичном уплотнителе будут иметь максимальное значение.

### 1.3. ГРАНИЦЫ ОБЛАСТЕЙ С РАЗНОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ЧАСТИЦ В МАГНИТОЖИДКОСТНОМ УПЛОТНИТЕЛЕ

Исследовалось три типа: МЖ С1-20В, С2-40М, Ф1-20. Они изготовлены согласно ТУ СКТБ «Полюс» [23]. Их основные параметры и области применения приведены в таблице 1.1.

Т а б л и ц а 1.1

Параметры и области применения магнитных жидкостей

Марка магнитной жидкости	Начальное значение намагниченности $M_{н0}$ , кА/м	Начальное значение концентрации магнетита, С%	Область применения
С1-20В	26,2	6,2	Вакуумные
С2-40М	45,6	11,15	Высокоскоростные парогазовых сред
Ф1-20	30,0	7,6	Высокоагрессивные парогазовых сред

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)