

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ИВАНОВСКАЯ ПОЖАРНО-СПАСАТЕЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ  
ПРОТИВОПОЖАРНОЙ СЛУЖБЫ МИНИСТЕРСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ  
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ»**

**А. В. ТОПОРОВ**

**П. В. ПУЧКОВ**

**В. В. КИСЕЛЕВ**

**РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫХ  
МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ УПЛОТНЕНИЙ  
ПОЖАРНОЙ ТЕХНИКИ И ИССЛЕДОВАНИЕ  
ИХ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

**Монография**

Иваново 2020

УДК 614.842  
ББК 68.8  
Т 58

Рецензенты

Д-р техн. наук, проф. В. А. Полетаев (ФГБОУ ВО  
«Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»)  
Д-р техн. наук, доц. А. А. Тувин (ФГБОУ ВО  
«Ивановский государственный политехнический университет»)

Научный редактор

Канд. техн. наук, заслуженный изобретатель Российской Федерации  
М. С. Сайкин

**Топоров, А. В.**

Т 58 Разработка комбинированных магнитожидкостных уплотнений пожарной техники и исследование их триботехнических характеристик : монография / А. В. Топоров, В. В. Киселев, П. В. Пучков. – Иваново : ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2020. – 115 с.

ISBN 978-5-6042853-9-8

В монографии обобщен опыт разработки и применения в пожарной технике комбинированных магнитожидкостных уплотнений. Приведены различные конструкции комбинированных уплотнений на основе применения магнитной жидкости, используемой в качестве как уплотняющей среды, так и смазочного материала. Показаны результаты трибологических исследований комбинированных уплотнений.

Работа ориентирована на инженеров и научных работников, занимающихся исследованиями повышения надежности резьбовых разъемных соединений деталей машин, а также на преподавателей, адъюнктов, курсантов и студентов.

УДК 614.842  
ББК 68.8

ISBN 978-5-6042853-9-8

© ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ</b> .....	6
<b>ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ</b> .....	8
1.1. Обзор конструкций уплотнительных устройств пожарной техники, анализ их триботехнических и рабочих характеристик.....	8
1.1.1. Бесконтактные уплотнения .....	8
1.1.2. Контактные уплотнения .....	10
1.1.3. Комбинированные уплотнения.....	13
1.2. Трение в паре резина-металл .....	16
1.3. Выводы к главе 1 .....	23
<b>ГЛАВА 2. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В КОМБИНИРОВАННЫХ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ В КАЧЕСТВЕ СМАЗОЧНО-УПЛОТНЯЮЩЕЙ СРЕДЫ.....</b>	<b>25</b>
2.1. Магнитные жидкости, структура, свойства.....	25
2.2. Механизм работы и процесс смазки трущихся элементов комбинированных манжетных магнитожидкостных уплотнений.....	26
2.3. Определение скорости проникновения МЖ в зазор уплотнения.....	31
2.3.1. Измерение поверхностного натяжения магнитной жидкости.....	34
2.3.2. Результаты расчета скорости проникновения в микрощель магнитной жидкости .....	36
2.4. Выводы к главе 2 .....	36
<b>ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СМАЗКИ ТРУЩИХСЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОМБИНИРОВАННЫХ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ УПЛОТНЕНИЙ</b> .....	<b>37</b>
3.1. Характеристика метода конечных элементов .....	37
3.2. Исследование влияния конфигурации магнитной системы КМЖУ на процесс смазки его трущихся частей .....	41
3.3. Исследование влияния магнитных материалов на магнитные характеристики комбинированных уплотнений .....	53
3.4. Расчет магнитного поля в подшипнике качения.....	58
3.5. Исследование влияния микроградиентов магнитного поля на процесс трения в присутствии магнитной жидкости при наложении магнитного поля .....	61
3.6. Выводы к главе 3 .....	70
<b>ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ В КМЖУ</b> .....	<b>71</b>
4.1. Экспериментальное исследование смазочных свойств магнитной жидкости.....	71
4.1.1. Исследование трения эластомерного материала по металлу .....	71
4.1.2. Анализ результатов исследования момента трения .....	79

4.2. Исследование износа элементов трения в присутствии магнитной жидкости.....	91
4.3. Выводы к главе 4 .....	92
<b>ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ И РАЗРАБОТКА КМЖУ ...</b>	<b>94</b>
5.1. Исследование герметичности КМЖУ .....	94
5.2. Разработка конструкций КМЖУ .....	99
5.3. Выводы к главе 5 .....	106
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>107</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>108</b>

## ВВЕДЕНИЕ

При герметизации вращающихся валов машин и механизмов пожарной техники встает задача создания надежных и простых уплотнений. Долговечность работы уплотнения оказывает значительное влияние на работоспособность узлов и агрегатов пожарной техники. Рост скоростей агрегатов, температур и давлений уплотняемых сред предъявляет к уплотнительным устройствам высокие эксплуатационные требования. Так, например, по статистическим данным [1] 90% случаев аварийных разрушений подшипниковых узлов вызван неудовлетворительной работой уплотнений. Даже незначительное нарушение герметичность подшипниковых узлов в условиях эксплуатации пожарной техники снижает надежность ее работы, повышает расход смазочных материалов и потребность в запасных частях, а так же необходимость выполнения внеплановых ремонтных работ и дополнительные трудовые ресурсы.

Таким образом, повышение эксплуатационных параметров уплотнительных устройств, их безотказность и долговечность – один из путей повышения надежности и долговечности пожарной техники.

В пожарной технике применяется целый ряд традиционных уплотнительных устройств. Однако, традиционные уплотнения (манжетные, торцевые, лабиринтные) не обеспечивают абсолютную герметичность.

Широкое применение магнитожидкостных уплотнений (МЖУ), например в пожарных насосах, ограничено низким рабочим перепадом давлений при котором допускается их эксплуатация и интенсивным вымыванием магнитной жидкости из рабочего зазора при герметизации жидких сред [21].

Поэтому, в последнее время получили распространение комбинированные магнитожидкостные уплотнения (КМЖУ). В таких уплотнениях сочетаются достоинства традиционных и магнитожидкостных уплотнений и взаимокompенсируются их недостатки.

В большинстве случаев конструирование КМЖУ проводилось лишь на основе опыта и интуиции инженеров, применявших при их разработке и общие методы проектирования деталей машин. Однако такой подход не позволяет получить КМЖУ, имеющие наиболее рациональную конструкцию и достичь наилучших рабочих характеристик. Поскольку в уплотнениях этого типа магнитная жидкость может выступать не только в роли уплотняющей среды, но так же выполнять другие функции, например смазки трущихся частей уплотнения, возникает необходимость исследования влияния магнитной жидкости на процесс трения.

## СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

1. МЖ - магнитная жидкость.
2. МЖУ - магнитожидкостное уплотнение.
3. КМЖУ - комбинированное магнитожидкостное уплотнение.
4.  $f$  - коэффициент трения.
5.  $P$  - давление.
6.  $\Delta P$  - перепад давлений.
7.  $U_m$  - магнитная энергия.
8.  $\mu_0$  - магнитная постоянная, магнитная проницаемость вакуума.
9.  $H$  - напряжённость магнитного поля.
10.  $M$  - намагничённость магнитной жидкости, намагничённость материала частиц, крутящий момент.
11.  $M_s$  - намагничённость насыщения.
12.  $P_k$  - контактное усилие, капиллярное давление.
13.  $P_0$  - давление окружающей среды.
14.  $\Delta P_m$  - перепад давлений, удерживаемый магнитожидкостным уплотнением.
15.  $P_m$  - магнитное давление.
16.  $P_k$  - давление, обусловленное поверхностными явлениями на стенках микрощели.
17.  $P_{тр.}$  - перепад давлений, обусловленный потерями на трение магнитной жидкости о стенки микрощели.
18.  $\sigma$  - поверхностное натяжение.
19.  $R$  - радиус кривизны поверхности.
20.  $Re$  - число Рейнольдса.
21.  $Re_{кр.}$  - критическое значение числа Рейнольдса.
22.  $v$  - средняя скорость течения жидкости в щели.
23.  $D$  - гидравлический диаметр щели, диаметр корпуса.
24.  $\nu$  - кинематическая вязкость жидкости.
25.  $h$  - величина зазора, щели.
26.  $\varepsilon$  - отношение величины эксцентриситета к высоте зазора.
27.  $Q$  - расход жидкости через щель.
28.  $D$  - диаметр вала.
29.  $\lambda$  - коэффициент сопротивления трению о стенки капилляра.
30.  $Re_\omega$  - критерий Рейнольдса для окружного течения.
31.  $\omega$  - угловая скорость вала.
32.  $\rho$  - плотность жидкости.
33.  $l$  - длина щели.
34.  $r$  - радиус трубки.
35.  $B_m$  - магнитная индукция.
36.  $W_{max}$  - максимальная удельная энергия.

## Список условных обозначений и сокращений

---

- 37.  $H_{cm}$  - коэрцитивная сила по намагниченности.
- 38.  $H_{cb}$  - коэрцитивная сила по индукции.
- 39.  $B_T$  - остаточная индукция.
- 40.  $G_m$  - магнитная проницаемость стали.
- 41.  $H$  - напряжённость магнитного поля.
- 42.  $H_s$  - напряжённость магнитного поля, при которой наступает насыщение.
- 43.  $R_z$  - высота пиков микронеровностей.
- 44.  $F_m$  - магнитная сила, действующая на частицы.
- 45.  $d$  - диаметр сечения резинового кольца.
- 46.  $D_k$  - внутренний диаметр кольца.
- 47.  $D_{тр.}$  - диаметр торцевой кромки кольца.
- 48.  $\eta$  - вязкость жидкости.
- 49.  $M_{тр.}$  - момент трения.

# **ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

## **1.1. Обзор конструкций уплотнительных устройств пожарной техники, анализ их триботехнических и рабочих характеристик**

При разделении нескольких сред в пожарной технике возникает проблема герметизации подвижных соединений. В подвижных соединениях кинематических пар герметизация может быть достигнута только путем применения специальных уплотнительных устройств [1]. Уплотнениями называются устройства для разделения пространств с различными давлениями, рабочими средами и температурами. Они предотвращают проникновение посторонних частиц в рабочую среду и исключают утечку уплотняемой среды из корпуса уплотняемого узла [2,3,4]. Основная задача динамического уплотнительного устройства состоит в том, что бы каким либо образом заполнить пространство или зазор между подвижной и неподвижной частями механизма, тем самым обеспечивая выполнение его функций. Уплотнительные устройства применяются в различных отраслях техники, поэтому номенклатура уплотнений исключительно широка, а требования и условия эксплуатации разнообразны [5,6,7,8,9].

### **1.1.1. Бесконтактные уплотнения**

В центробежных и осевых компрессорах, пожарных насосах, паровых турбинах широко используются лабиринтные уплотнения рис. 1.1 [1, 3, 10, 13, 12]. Механизм работы лабиринтных уплотнений в газах заключается в многократном дросселировании рабочей среды протекающей через камеры и сужения с резкоменяющимся проходными сечениями. Механизм работы лабиринтных уплотнений в жидкостях основан на создании увеличенного гидродинамического сопротивления перетоку жидкости. В случае применения лабиринтных уплотнений для предотвращения попадания в уплотняемую область влаги и абразивных частиц, щель уплотнения заполняется консистентной смазкой [13,14,15].

Основным преимуществом лабиринтных уплотнений является отсутствие трения в сопрягаемых деталях уплотнения, а следовательно и их износа. Такие уплотнения просты в изготовлении, надежны и не требуют технического обслуживания. Недостатком уплотнений этого типа является принципиальное отсутствие герметичности, что связано с особенностями их конструкции. При



этом следует добавить, что неизбежные температурные деформации приводят к уменьшению зазоров в уплотнении. Уменьшение зазоров повышает опасность задиров, что ведет к износу щелевых уплотнений который является основной причиной сокращения межремонтных сроков герметизируемых узлов [16,17,18,19].

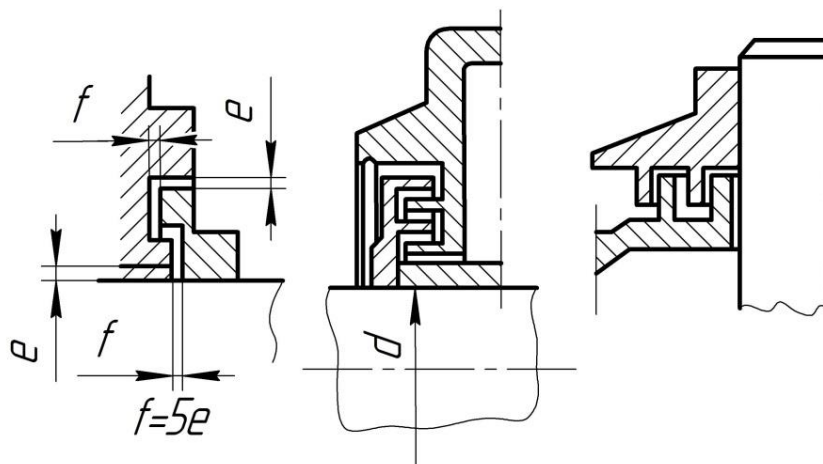


Рис. 1.1. Лабиринтные уплотнения

К классу бесконтактных уплотнений также относятся магнитожидкостные уплотнения. В магнитожидкостных уплотнениях пространство между подвижным и неподвижным элементами заполняется магнитной жидкостью, удерживаемой в рабочей области магнитным полем. [1,20,21].

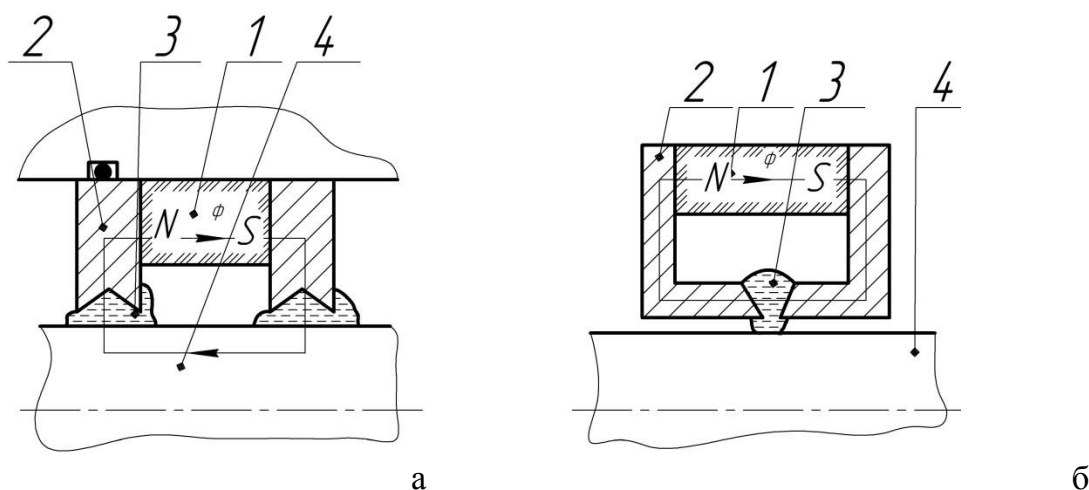


Рис. 1.2. Магнитожидкостные уплотнения:

а – с магнитопроводящим валом, б – с немагнитным валом.

1 – постоянный магнит, 2 – полюсные приставки, 3 – магнитная жидкость, 4 – вал

Принцип действия МЖУ основан на способности МЖ управляться магнитным полем. При наложении магнитного поля МЖ втягивается в область наибольшей напряженности магнитного поля и тем самым перекрывает имеющиеся зазоры [17,22,23,24,25,26,27]. Конструкция традиционного радиального МЖУ представлена на рис. 1.2. Радиальное МЖУ состоит из кольцевого постоянного магнита 4 и двух полюсов, на рабочих поверхностях которых выполнены кольцевые зубцы. Магнитный поток возбуждаемый магнитом 4 удерживает МЖ 3 в рабочем зазоре между неподвижными полюсами и подвижным валом 2, обеспечивая его герметизацию относительно неподвижного корпуса 5. Статические зазоры уплотнены прокладками 6. В настоящее время существует целый ряд МЖУ предназначенных для решения различных задач: термоморозоустойчивые МЖУ [21], высокоскоростные МЖУ [21,28,,29,31,32], торцевые МЖУ [21]. В СКТБ «Полюс» разработаны МЖУ со следующими характеристиками:

1. Диаметр уплотняемых валов от 8 до 2500 мм;
2. Критический перепад давлений до 0.2 мпа на 10 мм длины вала;
3. Диапазон рабочих температур 203-393°к с повышением (в кратковременном режиме) до 423°к;
4. Линейная скорость на поверхности вала до 15 м/с с повышением (в кратковременном режиме) до 50 м/с [54,75дс].

Достоинствами МЖУ, по сравнению с контактными и щелевыми уплотнениями, являются низкий момент трения, отсутствие износа, долговечность, герметичность, способность к самозалечиванию, малое тепловыделение [1,34,35,36,37,38,39]. К недостаткам этого типа уплотнений относятся: неудовлетворительная работа в контакте с жидкими средами, агрессивными средами, неудовлетворительная работа в условиях загрязнения абразивными частицами. Основным фактором ограничивающим применение МЖУ является сложность обеспечения равномерности рабочего зазора. В случае появления эксцентриситета вала в зазоре МЖУ возникают магнитные силы одностороннего действия, что может привести к разрыву слоя МЖ и пробоем уплотнения. Особенно остро эта проблема встает при диаметрах вала больше 150 мм [21]. В лишенных этого недостатка торцевых МЖУ [21] возникают проблемы, связанные с обеспечением величины рабочего зазора и вытеснением из него МЖ под действием радиально направленных сил.

### **1.1.2. Контактные уплотнения**

Среди контактных уплотнений наиболее распространены торцевые уплотнения и контактные уплотнения с эластомерным элементом. В узлах и агрегатах работающих в исключительно тяжелых условиях широко используются торцевые уплотнения [1,40,41,42,43,44,45,46]. Торцевое уплотнение состоит в

основном из трех элементов: двух колец (вращающегося и неподвижного) образующих плоскую пару трения и упругого элемента обеспечивающего контакт в паре трения. Примером торцевого уплотнения может послужить уплотнение рис. 1.3. Торцевые уплотнения сохраняют работоспособность при рабочем давлении герметизируемой среды до 20 МПа, скорости скольжения до 250 м/с и при температуре свыше 533°К [47].

Другими достоинствами торцевых уплотнений являются: простота эксплуатации, высокая надежность, нечувствительность к продольным перемещениям и радиальным биениям вала, возможность работать в любой абразивной, агрессивной среде при правильно сконструированных уплотнительных узлах [42]. К недостаткам торцевых уплотнений можно отнести увеличение габаритов и относительно высокую стоимость изготовления.

Широкое распространение в настоящее время получили контактные уплотнения с эластомерным элементом. К ним относятся манжетные радиальные уплотнения, грязесъемники, манжетные торцевые уплотнения [1].

Механизм герметизации этих уплотнений прежде всего связан с высокоэластичными свойствами резины – материала уплотнения, позволяющего осуществлять плотное контактирование поверхностей при небольшом контактном давлении. Применение этих уплотнений дает возможность герметизации относительно грубо обработанных поверхностей при малых усилиях на детали соединения. Уникальные свойства резины позволяют создать простые, самые дешевые и универсальные уплотнения совместимые с большинством рабочих сред [1]. Простота конструкции вытекает из возможности совмещения в одной детали уплотнения всех функциональных элементов контактного уплотнения. Одним из самых распространенных уплотнительных устройств с эластомерным элементом является радиальное манжетное уплотнение рис 1.4. Принцип действия радиального манжетного уплотнения основан на взаимодействии вращающегося вала с эластомерной кромкой манжеты. Эластомерный материал кромки манжеты контактируя с поверхностью вала предотвращает утечку уплотняемой среды.

Среди манжетных уплотнений следует особо выделить манжеты активного типа рис 1.5. В таких уплотнениях обеспечивается принудительная подача смазки в область трения за счет гидродинамических эффектов. В таком уплотнении микрошнеки на вращающемся валу подобно насосу отгоняют просачи-

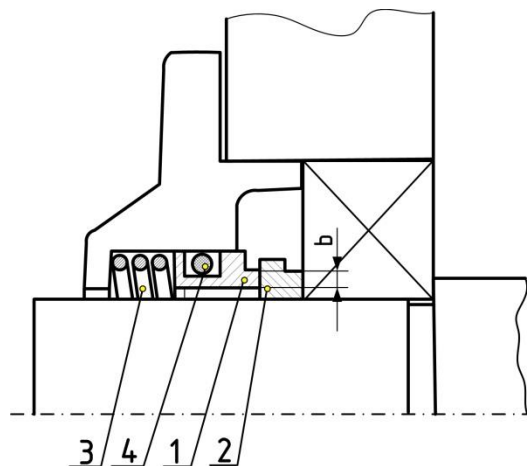
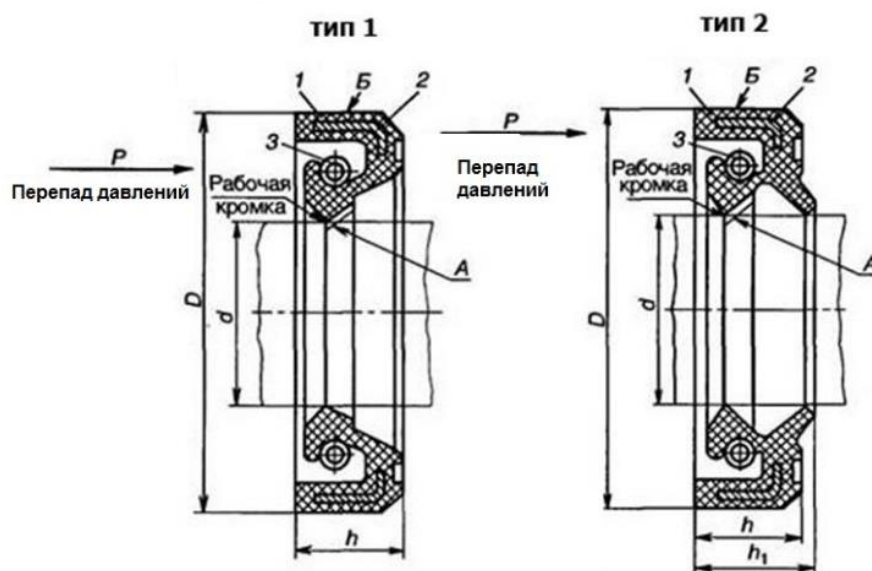


Рис. 1.3. Торцевое уплотнение.

1, 2 – рабочие элементы,  
3 – нажимная пружина,  
4 – резиновое уплотнительное кольцо

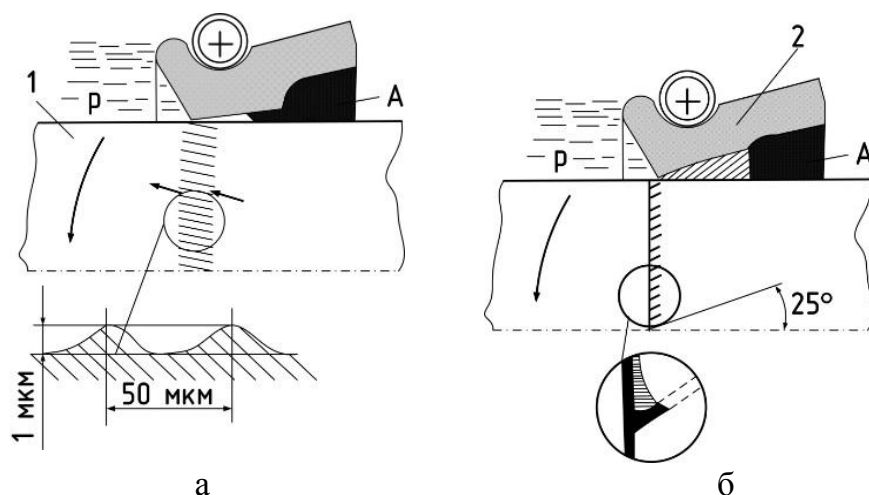
## Разработка комбинированных магнитожидкостных уплотнений пожарной техники и исследование их триботехнических характеристик

вающееся через кромку масло или другую уплотняемую среду во внутреннюю полость. При вращении вала из просачивающейся через кромку жидкости формируется смазочная пленка. Такие уплотнения имеют повышенный ресурс по сравнению с обычными манжетами [129]. Однако, применение таких уплотнений не допустимо для герметизации объемов заполненных веществами, не обладающими приемлемыми смазочными свойствами.



**Рис. 1.4.** Манжетные уплотнения.

Тип 1 – без пыльника,  
Тип 2 – с пыльником.  
1 – резина, 2 – каркас,  
3 – пружина



**Рис. 1.5.** Манжетные уплотнения активного типа:

а – с микрошнеками на валу,  
б – с выступами на кромке.  
1 – вал, 2 – кромка манжеты

При перепадах давлений до 0.15МПа радиальные манжетные уплотнения с нажимной пружиной являются самым распространенным типом уплотнений валов [1].

Недостатком контактных уплотнений является их ограниченная долговечность, при значительных потерях на преодоление сил трения. В связи с этим при высоких скоростях температурах и давлениях, развивающихся в зоне трения, уменьшается прочность применяемых для уплотнения полимерных ма-

териалов, увеличивается износ, приводящий к ухудшению герметизирующей способности уплотнительного узла [48, 49, 50]. Уплотнения быстро изнашиваются сами, а так же приводят к износу сопряженных с ними частей – валов, штоков, цилиндров [43,51,52,53,54].

### 1.1.3. Комбинированные уплотнения

Кроме контактных и бесконтактных уплотнительных устройств существуют системы, представляющие их сочетания [1]. Такие уплотнения называются комбинированными. Наибольший интерес представляют комбинированные манжетные магнитожидкостные уплотнения, поскольку в них сочетаются достоинства тех и других герметизаторов и взаимно компенсируются недостатки. Такие уплотнения представляют собой стандартную манжету, снабженную магнитной системой.

Ряд конструкций таких уплотнений приведен в [55], наиболее типичные из них описаны ниже.

На рис. 1.6 в, г представлено манжетное уплотнение с магнитной системой, состоящей из серии постоянных магнитов 1, расположенных вокруг пружины манжеты 2. Проходя через пазы, выполненные в нижней части магнитов, пружина удерживает их от выпадения при ударах и вибрации. На рис. 1.6 б представлено уплотнение с расположенными по обе стороны от рабочей кромки манжеты постоянными магнитами 42. Магниты могут быть намагничены как в осевом так и в радиальном направлении. Представленное на рис. 1.6 а уплотнение состоит из манжеты и закрепленного на валу под рабочей кромкой манжеты магнита 1, намагниченного в радиальном направлении.

Конструкция уплотнения рис. 1.6 д представляет собой традиционное манжетное уплотнение пружина которого выполнена из магнитного материала и намагничена в радиальном направлении.

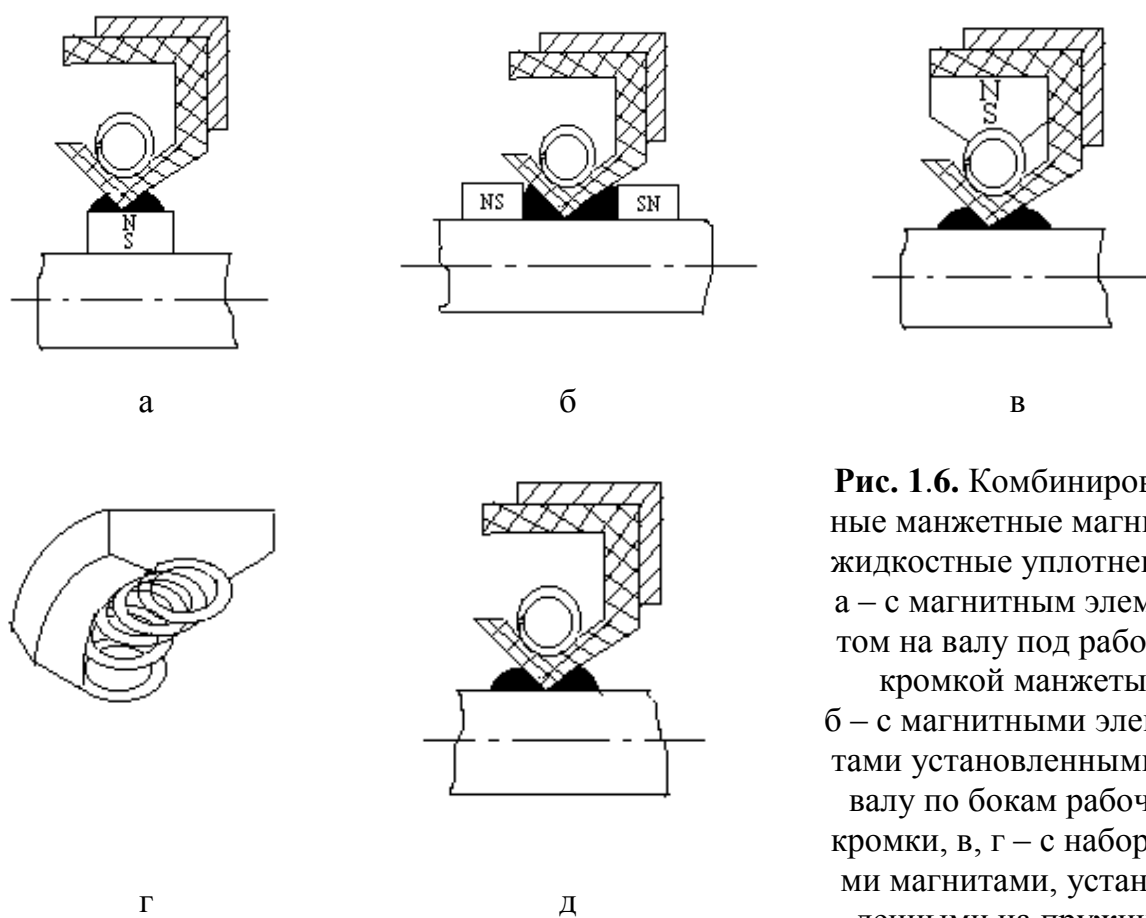
По мнению авторов изобретений, во всех представленных конструкциях магнитная жидкость удерживается магнитным полем под кромкой манжеты, обеспечивая ее смазывание, а образовавшиеся вокруг вала магнитожидкостные пробки увеличивают уплотняющую способность уплотнений.

Кроме вышеперечисленных существует ряд других конструкций комбинированных манжетных магнитожидкостных уплотнений [21].

На рис 1.7 представлено уплотнительное устройство, являющееся комбинацией магнитного и магнитожидкостного уплотнений [56]. Постоянный магнит установлен в полости, образованной уплотнительной и защитной кромками манжеты, которая заполнена магнитной жидкостью. Как видим размеры уплотнительного устройства определяются размерами используемой манжеты. Установка уплотнения на карданный вал грузового автомобиля ЗиЛ – 130 совершенно исключила утечку масла из заднего моста при эксплуатации автомобиля

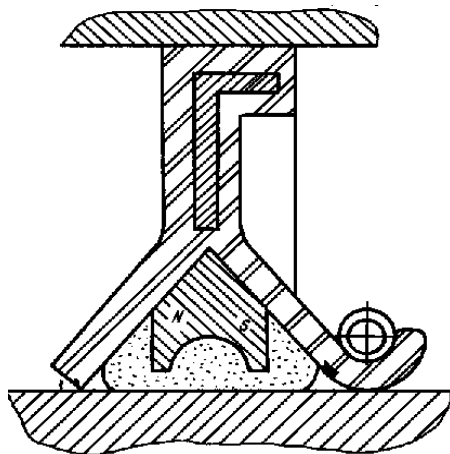
как в летний, так и в зимний периоды. Недостатком такой конструкции является возможность повреждения рабочей кромки манжеты при сборке уплотнения.

Такого недостатка лишена конструкция уплотнения, представленная на рис. 1.8. Уплотнение отличается от предыдущего тем, что источником магнитного поля является упругий элемент с поперечным щелевым разрезом, благодаря которому он может быть сжат до размера диаметра и введен в пространство между пыльником и рабочей кромкой.

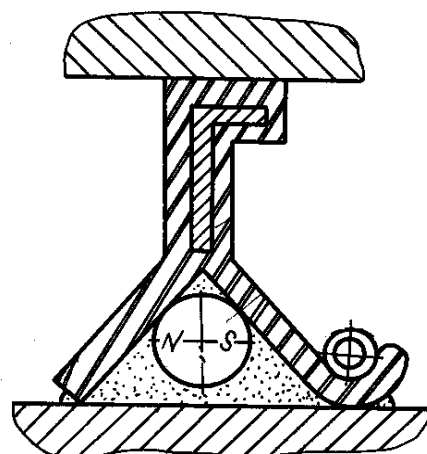


**Рис. 1.6.** Комбинированные манжетные магнито-жидкостные уплотнения: а – с магнитным элементом на валу под рабочей кромкой манжеты, б – с магнитными элементами установленными на валу по бокам рабочей кромки, в, г – с наборными магнитами, установленными на пружине, д – с намагниченной пружинной

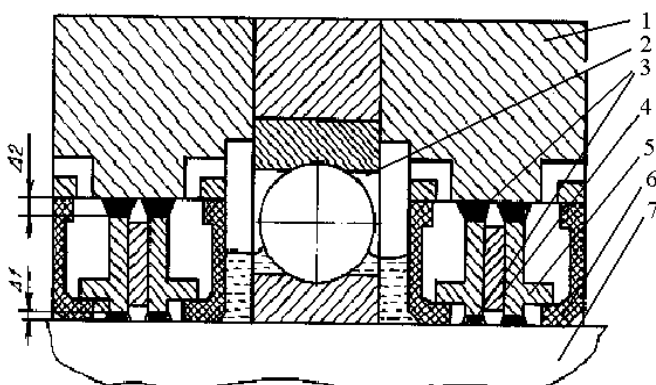
Представляет интерес конструкция опорно-уплотнительного узла магнитного вала. Узел (рис. 1.9) снабжен манжетами, установленными в крышках, магнитожидкостное уплотнение размещено между манжетами с опорой полюсных приставок на пружины манжет, с возможностью радиального перемещения при радиальном смещении вала. подшипник заполнен смазкой. Магнитная жидкость размещается в зазорах  $\Delta 1$  и  $\Delta 2$ . Магнитные потоки не протекают через кольца и тела качения подшипников. Уплотнительный узел успешно работал на шлихтовальных машинах с 1992 г. по 2000 г. без обслуживания и поломок.



**Рис. 1.7.** Комбинированное манжетное магнитожидкостное уплотнение с магнитным элементом, помещенным между кромкой манжеты и пыльником



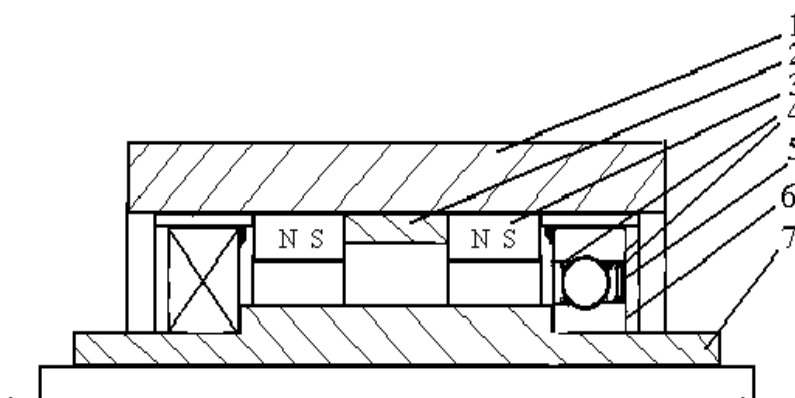
**Рис. 1.8.** Комбинированное манжетное магнитожидкостное уплотнение с намагниченным кольцом, установленным между кромкой манжеты и пыльником



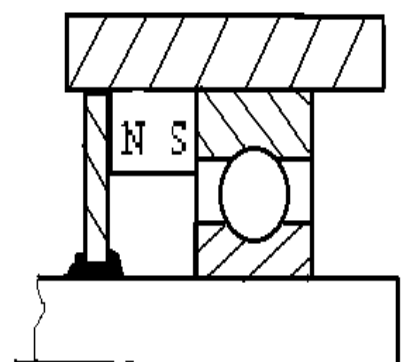
**Рис. 1.9.** Уплотнительно-опорный узел для текстильных машин: 1 – корпус, 2 – подшипник качения, 3 – магнитная жидкость, 4 – магнит, 5 – полюсная приставка, 6 – манжета, 7 – вал

На рис 1.10 представлена конструкция уплотнительного узла, предназначенного для защиты подшипников качения от попадания абразивных частиц. Устройство состоит из постоянных магнитов 3 и полюсных наконечников 5, которыми являются защитные магнитопроницаемые шайбы подшипников качения. В зазоре между шайбой 5 и обоймой подшипника 6, а так же на телах качения находится магнитная жидкость 4 [1,20,57,58]. В корпусе 1 подшипникового узла между магнитами 3 устанавливается дистанционная втулка 2, которая служит для замыкания магнитного потока.

Конструкция уплотнительного устройства рис 1.11 предназначена для защиты опорных узлов и передач. Оно состоит из источника магнитного поля и полюсной приставки. Такой уплотнительно-опорный узел предназначен для эксплуатации при малых перепадах давлений.



**Рис. 1.10.** Магнитожидкостное уплотнительное устройство для герметизации подшипников:  
1 – корпус подшипникового узла; 2 – втулка;  
3 – магниты; 4 – магнитная жидкость; 5 – полюсные наконечники; 6 – обойма подшипника; 7 – втулка



**Рис. 1.11.** Уплотнительно-опорный узел

Особенностью, отличающей две последних конструкции, является замыкание магнитного потока через тела качения уплотняемых подшипников. По мнению авторов, находящаяся во внутреннем пространстве подшипников магнитная жидкость будет выступать как магнитоуправляемый смазочный материал, надежно удерживаясь в рабочей области магнитным полем.

## 1.2. Трение в паре резина-металл

В контактных уплотнительных устройствах трение может оказывать значительное влияние на их работу.

В зависимости от параметров влияющих на механизм трения выделяют определенные режимы трения, соответствующие различным режимам работы контактного уплотнения с эластомерным элементом [28]. Процесс трения таким образом может быть разделен на 4 режима:

1. Начальное трение
2. Трение в сухую
3. Трение с граничной смазкой
4. Трение с жидкостной смазкой

Режим начального трения возникает при страгивании элементов трения после длительного состояния покоя. Согласно молекулярно-кинетической теории трение покоя должно быть равно 0, что подтверждается экспериментами [124]. Процесс страгивания включает в себя 2 этапа с разным механизмом процесса сопротивления сдвигу. Сила сопротивления  $P$  зависит от пути движения



Л контртела [125] на первой стадии происходит высокоэластичная деформация эластомера, взаимное скольжение контактирующих поверхностей отсутствует. Сила  $P$  линейно растёт с перемещением  $Z$ . На второй стадии происходит отрыв контактной поверхности уплотнения от контртела. Силу  $P$  в момент отрыва можно назвать начальной силой трения. Она определяется упругим деформированием поверхностного слоя в момент отрыва и разрывом химических связей, возникающих между полимером и контртелом. Потери на упругое деформирование поверхностного слоя при движении контртела определяются разностью работ затраченных на микро перемещение с двух сторон микронеровностей и незначительны в общей величине потерь трения. В момент отрыва необходимо преодолеть полную силу сопротивления деформации, действующую на площади фактического контакта, близкой и номинальной. Поэтому составляющая силы трения  $P$  на деформирование поверхностного слоя при страгивании имеет значительную величину [125]. Процесс образования химических связей резины с материалом контртела связан с наличием в ее составе наполнителя (сажи), вулканизирующего агента (серы), загрязнения в виде различных солей и других веществ [125]. Так как количество этих веществ в поверхностном слое ограничено, процесс хемосорбции характеризуется постепенным насыщением и приближением к определенному значению.

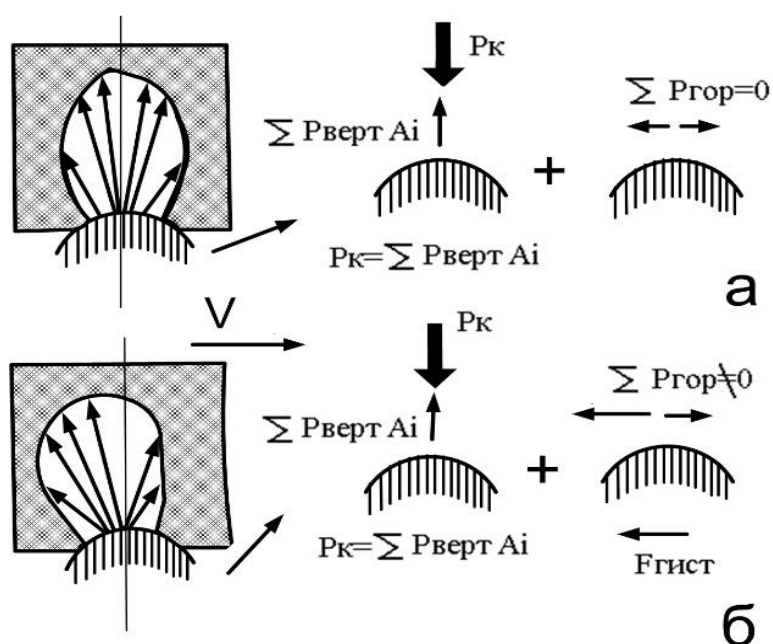
Этот режим характеризуется высоким износом трущихся частей, а при наиболее неблагоприятных условиях во время страгивания может произойти разрыв рабочей кромки контактного уплотнения.

В следующий момент времени после страгивания, трущиеся части контактного уплотнения начинают скользить друг относительно друга.

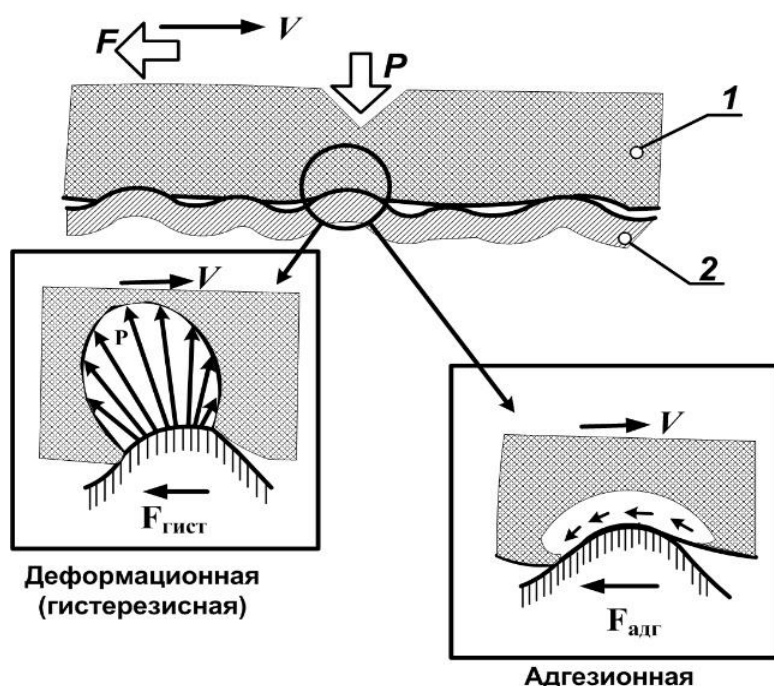
Этот режим характеризуется отсутствием смазочного материала в области трения. Постепенное исчезновение пленки смазочного материала из зоны контакта рабочего элемента уплотнения с валом в течение простоя объясняется процессом диффузии жидкой пленки смазки и граничной пленки в материал эластомера [1, 126]. Процесс дополняется частичным испарением или растворением пленок с наружных сторон области контакта. Время исчезновения смазочной пленки составляет несколько часов [126]. Трущиеся поверхности при этом контактируют непосредственно друг с другом, что приводит к возникновению механизма сухого трения. Площадь контакта между эластомером с металлическим элементом зависит от степени огибания эластомера вокруг отдельного выступа, как показано на рис 1.12 а,б.

Адгезионная составляющая силы трения обуславливается молекулярным взаимодействием атомов поверхностей пары трения во время цикла напряжения, разрыва, релаксации).

На рис. 1.13 отдельно показано возникновение силы трения при скольжении относительно одиночного выступа за счет адгезионной и деформационной составляющей.



**Рис. 1.12.** Трение эластомера по твердому телу:  
а – скольжения нет,  
б – образцы скользят друг относительно друга



**Рис. 1.13.** Трение эластомера по твердому телу в отсутствие смазочного материала

Деформационная составляющая обусловлена запаздыванием восстанавливаемости эластомера после вдавливания в него выступа твердого материала. При этом происходит рассеивание энергии за счет гистерезиса и рост силы трения, в результате чего эта его составляющая называется гистерезисной [127]. При скольжении эластомера по твердому материалу, отдельные цепи поверхностного слоя взаимодействуют с молекулами твердого элемента, образуя ло-

кальные связи. Во время скольжения происходит растяжение этих связей, их разрыв и релаксация, а затем образование новых связей. При этом молекулярные цепи совершают перескок в свое новое равновесное положение [127]. В настоящее время существует несколько теорий, объясняющих это явление [124,127]. Адгезия и гистерезис на макроскопическом уровне обусловлены вязкоупругими свойствами эластомера. На рис. 1.12 показано распределение давления вокруг отдельного выступа шероховатой поверхности в отсутствие скольжения (а) и при скольжении одного тела по другому (б). Рис. 1.12 иллюстрирует возникновение гистерезисной компоненты силы трения.

В отсутствие скольжения эластомер покрывает поверхность выступа симметрично. Если контактное давление распределяется нормально по отношению к контуру выступа, то оно может быть разделено на 2 составляющих: горизонтальную и вертикальную. Сумма вертикальных компонентов уравнивает силу  $P$ , а сумма горизонтальных компонентов равна нулю. Если эластомер движется с определенной скоростью  $V$ , то это приводит к нарушению симметрии его расположения относительно выступа: он в большей степени распределяется на передней поверхности, а контакт нарушается в более высокой точке на тыльной стороне выступа. Таким образом дуга контакта сдвигается вперед по сравнению со статикой, а это приводит к асимметричному распределению давления. Горизонтальные компоненты приводят к возникновению гистерезисной составляющей силы трения  $F$ , которая направлена в противоположную по направлению движения сторону. Исследования показывают, что, изменяя контактное давление, можно влиять на соотношение адгезионной и гистерезисной компонент [127].

Как показывают исследования именно страгивание и трение без смазочного материала являются причиной выхода из строя 40% контактных уплотнений с эластомерным элементом [1].

При определенной скорости скольжения происходит частичный или полный отрыв эластомерного элемента от контртела. В образующиеся таким образом зазоры из окружающего тела трения пространства в область трения проникает смазочный материал. В течение некоторого времени тонкая пленка смазочного материала образуется на всей поверхности трения. Механизм трения в этом случае принимает иной характер.

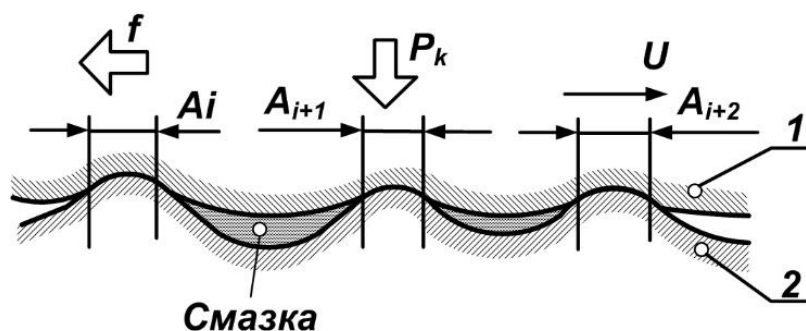
Случай трения эластомера в присутствии ограниченного количества смазки представлен на рис. 1.14. В этих условиях нельзя пренебрегать гидродинамическими эффектами. Когда скорость скольжения  $V$  достаточно мала и нельзя не учитывать наличие смазки на пиках неровностей, но в тоже время она достаточно велика для впадин между соседними выступами возникает граничное трение. Пленка на пиках выступов очень тонкая и имеет свойства, отличные от свойств массы смазки во впадинах между выступами. Вблизи вершин выступов максимальной величины в результате физико-химического взаимодействия смазки с эластомером, ее свойства существенно изменены [127]. Коэффициент трения при граничной смазке зависит от контактного давления, и

величины выступов поверхности твердого тела. Пренебрегая некоторыми условиями незначительно влияющими на процесс трения можно сказать, что  $f$ , то есть коэффициент трения при граничной смазке не значительно отличается от коэффициента трения при отсутствии смазочного материала. Иногда возникают случаи, например при трении нейлона, показывающие повышение коэффициента трения скольжения при введении смазки по сравнению с сухим трением [127].

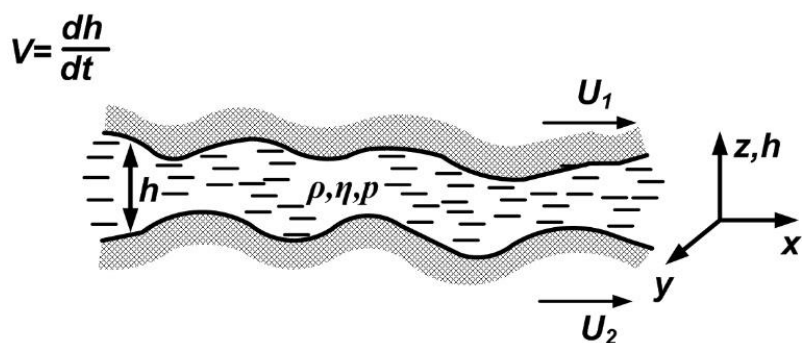
В результате экспериментальных исследований выявлена особая зависимость коэффициента трения от вязкости, которую можно объяснить уменьшением фактической площади контакта вследствие гидродинамических эффектов на начальном участке поверхности [1].

Трение при граничной смазке является наиболее распространенным режимом, возникающем при работе уплотнений. Однако, если при трении твердых элементов граничная смазка позволяет значительно уменьшить коэффициент трения [128], то при трении эластомеров такого эффекта не возникает.

При увеличении скорости скольжения в начальных участках зоны контакта развиваются гидродинамические процессы, приводящие к большему раскрытию стыка и дальнейшему проникновению смазочного материала в зону контакта. Далее зона раскрытия распространяется на всю поверхность трения. Между элементами трения возникает непрерывная пленка смазочного материала, разделяющая их рис. 1.15.



**Рис. 1.14.** Трение эластомера по твердому телу при граничной смазке



**Рис. 1.15.** Трение эластомера по твердому телу при жидкостной смазке

Процесс перехода от граничной к жидкостной смазке протекает следующим образом. В местах соединения поверхности выступов и эластомера в пленке жидкости возникает гидродинамическое давление клина, стремящееся поднять эластомер над поверхностью твердого тела. Этот эффект зависит в некоторой степени от упругости эластомера. Такое состояние эластогидродинамического равновесия вызывает постоянное искривление поверхности эластичного тела. В результате этого явления на характер обычного скольжения эластомера по жесткому телу оказывает влияние образование положительного приращения давления на передних склонах выступов и отрицательного на задних склонах. Сумма положительных приращений давления значительно больше суммы отрицательных. Этот эффект и приводит к разделению поверхностей.

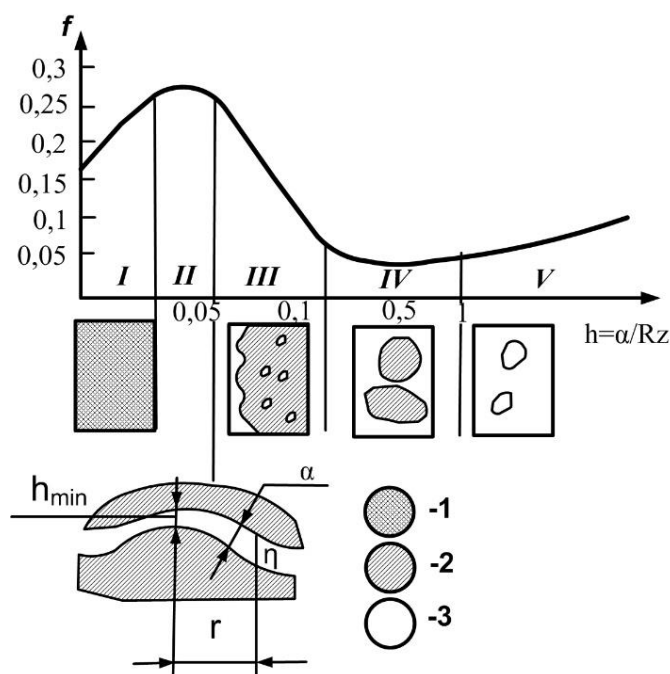
Основной отличительной особенностью жидкостной смазки является то, что в идеальном случае совершенно отсутствует износ движущихся деталей, а сопротивление движению возникает единственно вследствие вязкости смазки, причем чем ниже вязкость, тем ниже вязкостное сопротивление. Однако существует некоторый предел снижения вязкости, потому что чем ниже вязкость, тем больше сближение поверхностей [128]. На процесс гидродинамической смазки серьезное влияние оказывают следующие факторы:

1. Кавитация, разбивающая смазочный слой на отдельные части;
2. Влияние давления на вязкость смазочного материала. Вязкость смазки возрастает с увеличением давления, при этом изменяются физические свойства пленки смазочного материала;
3. Влияние температуры на вязкость смазки. При жидкостной смазке тепло трения разогревает масло, при чем температура может достигнуть большой величины. (Даже для лучших видов смазочных материалов увеличение температуры на 10% снижает ее вязкость до половины начальной величины.);
4. Влияние предельно высокой скорости сдвига на вязкость масла. Повышение скорости ведет к снижению вязкости. Все эти факторы очень трудно учесть теоретически.

Режим жидкостной смазки является наиболее благоприятным с точки зрения износа и момента трения рабочих элементов контактного уплотнения. Однако, стоит отметить, что разделение рабочего элемента уплотнения и вала может стать причиной утечки через уплотнения.

Таким образом, механизм трения зависит от наличия или отсутствия смазочного материала и параметров его состояния, характера физико-механического или физико-химического взаимодействия контактирующих поверхностей. При изменении величины контактного давления, скорости скольжения, вязкости смазочного материала, до определенных значений происходит переход от одного механизма трения к другому. Особенностью режимов трения эластомерного материала является зависимость вида смазки от сочетания таких параметров, как контактное давление, скорость скольжения, температура, продолжительность контакта при отсутствии движения. Смазочным материалом является окружающая элементы трения среда, проникающая в зону контакта

при перемещении контртела. Зависимость коэффициента трения от относительной толщины слоя смазочного материала, характерной для различных режимов трения, представлена на рис. 1.16 [125].



**Рис. 1.16.** Зависимость коэффициента трения эластомера от режима трения:  
1 – зона контакта поверхностей,  
2 – контакт граничных пленок,  
3 – жидкость

При различной толщине, наличии и сплошности пленки смазки возможно трение без смазочного материала (1), при граничной (II-III), полужидкостной (IV) или жидкостной (V) смазке. Во время страгивания в уплотнениях наиболее часто возникает режим сухого трения (I), а для эксплуатации уплотнений характерными являются режимы трения при граничной смазке (участки II -IV). Однако режим трения при полужидкостной смазке, являющейся наиболее благоприятным, может быть обеспечен не всегда. Обеспечение этого режима связано с рациональным выбором параметров, влияющих на механизм смазки. Рационально выбрать эти параметры во многих случаях достаточно сложно, поскольку при работе машин происходит изменение скорости вращения, давления уплотняемой среды, температуры. В этом случае желаемое сочетание параметров обеспечивающее наиболее благоприятный механизм смазки может быть получен лишь при узко определенном режиме работы механизма. В остальных случаях механизм трения будет носить иной характер, при котором величина коэффициента трения значительно превосходит его минимальное значение, что отрицательно сказывается на работоспособности уплотнения.

### 1.3. Выводы к главе 1

При анализе конструкций бесконтактных и контактных уплотнений установлено, что:

1. Бесконтактные уплотнения имеют низкий момент трения, малый износ рабочих элементов, однако им присущи некоторые недостатки, ограничивающие их применение: малый удерживаемый перепад давлений, а в некоторых случаях принципиальная негерметичность (щелевые, лабиринтные уплотнения), повышенные требования к точности изготовления (МЖУ).

2. К недостаткам контактных уплотнений относятся: высокие потери на трение, высокий момент сопротивления, часто есть утечки. На потери на трение, надежность, герметичность в контактных уплотнениях оказывают влияние следующие факторы: скорость скольжения, чистота обработки и параллельность контактных поверхностей, температура уплотняемой среды и контактных поверхностей ее изменение со временем, форма рабочего зазора зависящая от температурной и механической деформации в процессе работы, сочетание материалов пары трения, уплотняемая среда ее смазывающие свойства, режим трения, вибрация, гидравлические удары, перерывы в движении, течения жидкости по направлению центробежной силы, рабочие давления герметизируемой среды, радиальные биения, осевые перемещения.

3. Применение традиционных смазочных материалов не приводит к значительному улучшению условий работы контактных уплотнений с эластомерным рабочим элементом. В связи с этим встает вопрос об использовании для смазки контактных уплотнений веществ, по своим свойствам качественно отличающихся от традиционных смазочных материалов, применяемых для этой цели.

4. Комбинированные уплотнения позволяют добиться рационального сочетания рабочих характеристик традиционных и магнитожидкостных уплотнений и взаимно скомпенсировать их недостатки. В комбинированных уплотнениях магнитная жидкость может применяться не только как уплотнительная среда, но и в качестве смазочного материала, для смазки трущихся частей уплотнительных устройств.

Таким образом, наиболее перспективными являются комбинированные магнитожидкостные уплотнения. Однако, несмотря на существование множества конструкций комбинированных уплотнительных устройств в рассмотренных литературных источниках практически отсутствуют теоретические предпосылки или методика их проектирования.

При разработке таких уплотнительных устройств встает ряд задач, для решения которых требуется комплексный подход.

Присутствие в комбинированном уплотнении магнитожидкостной ступени предполагает наличие магнитной системы. Конфигурация магнитной системы, а также магнитные материалы, используемые при ее изготовлении, могут оказывать значительное влияние на магнитные характеристики уплотнения. В

отличии от МЖУ в комбинированных уплотнениях в состав магнитной системы могут входить магнитопроводящие части традиционного уплотнения, что так же может накладывать свой отпечаток на магнитные характеристики. Поэтому, при исследовании магнитной системы КМЖУ необходимо рассматривать все уплотнение в целом.

Поскольку в конструкцию КМЖУ могут входить различные устройства (традиционные уплотнения, подшипники) наличие магнитной жидкости и магнитного поля может оказывать влияние на их работоспособность.

При использовании магнитной жидкости в качестве смазки ее структура и свойства, а так же наличие магнитного поля могут оказывать значительное влияние на процесс трения.



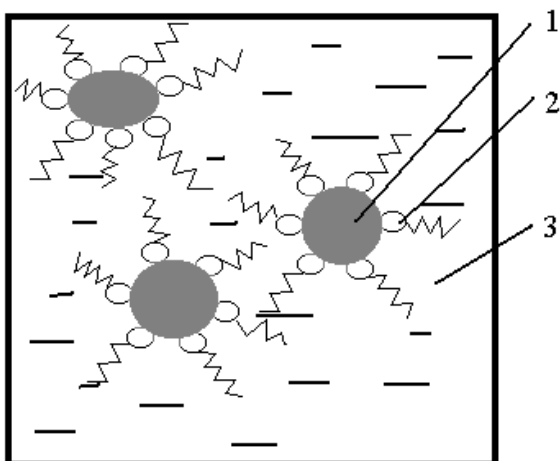
## ГЛАВА 2. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В КОМБИНИРОВАННЫХ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ В КАЧЕСТВЕ СМАЗОЧНО-УПЛОТНЯЮЩЕЙ СРЕДЫ

### 2.1. Магнитные жидкости, структура, свойства

Магнитная жидкость представляет коллоидный раствор частиц ферромагнитных веществ в жидкостях [59,60,61,62,63,64].

Магнитные жидкости макроскопически однородны, не расслаиваются в магнитных и гравитационных полях неограниченное время. Их физико-химические свойства зависят от характеристик приложенного магнитного поля и могут изменяться в широких пределах.

Магнитные жидкости подчиняются законам коллоидной химии как при наложении магнитного поля, так и без него [34,66,67,68,69,70]. Диаметр взвешенных частиц магнитной жидкости колеблется от 5 до 20 нм. Магнитные частицы имеющие размеры менее 5 нм обладают слабовыраженным магнитным моментом. При наличие в жидкости частиц имеющих диаметр более 20 нм наложение магнитного поля приводит к их коагуляции [67]. В зависимости от технологии производства и материала частицы магнитного наполнителя могут иметь различную конфигурацию, физические, химические, магнитные свойства. Для предотвращения агрегатирования частиц, и улучшения химической совместимости с базовой жидкостью магнитные частицы покрывают молекулами поверхностно-активных веществ [71,72]. Структура и состав МЖ представлены на рис. 2.1.



**Рис. 2.1.** Структура магнитной жидкости:  
1 – магнитные частицы;  
2 – поверхностно-активное вещество;  
3 – жидкость-носитель

Магнитная жидкость состоит из трех основных компонентов: дисперсионной среды, дисперсной фазы и поверхностно – активных веществ.

Дисперсионной средой для магнитных жидкостей являются: вода, предельные, ароматические, перфорированные углеводороды и их функциональные производные, минеральные масла керамические полимеры Дисперсной фазой в МЖ являются металлы, обладающие ферромагнитными свойствами, ферриты, оксиды двух и трехвалентного железа. В качестве поверхностно – активных веществ используют: спирты, олеиновую, ленолевую, алкибензосульфокислоты [67].

## **2.2. Механизм работы и процесс смазки трущихся элементов комбинированных манжетных магнитожидкостных уплотнений**

Герметичность уплотнения является одним из основных показателей его работоспособности. Характеристикой герметичности уплотнения является отсутствие утечек при определенной разности давлений окружающей и уплотняемой сред. Чтобы дать оценку герметичности манжетного магнитожидкостного уплотнения необходимо изучить механизм его работы.

Известно, что в манжетных уплотнениях для увеличения их герметичности и срока службы используются смазочные масла. Их подача в область трения может осуществляться например за счет гидродинамических сил, как в манжетах активного типа [1]. В случае применения в качестве смазки магнитной жидкости ее подача в область трения кромки манжеты и вала осуществляется за счет магнитных сил, действующих на МЖ.

На рис. 2.2а представлено уплотнение состоящее из манжеты и магнитной системы, создающей магнитное поле с наибольшей напряженностью в области кромки манжеты. Такое уплотнение можно условно разделить на две части – магнитное уплотнение и манжетное уплотнение.

В статическом режиме при отсутствии внешнего перепада давлений МЖ занимает симметричное положение относительно кромки манжеты, как показано на рис. 2.2б, так, что значения магнитной энергии на ее свободных поверхностях одинаковы. При наложении внешнего перепада давлений МЖ смещается в направлении его действия до критического положения рис. 2.2 в, при котором дальнейшее увеличение перепада давлений приведет к пробое магнитожидкостной пробки. По уравнению Бернулли:

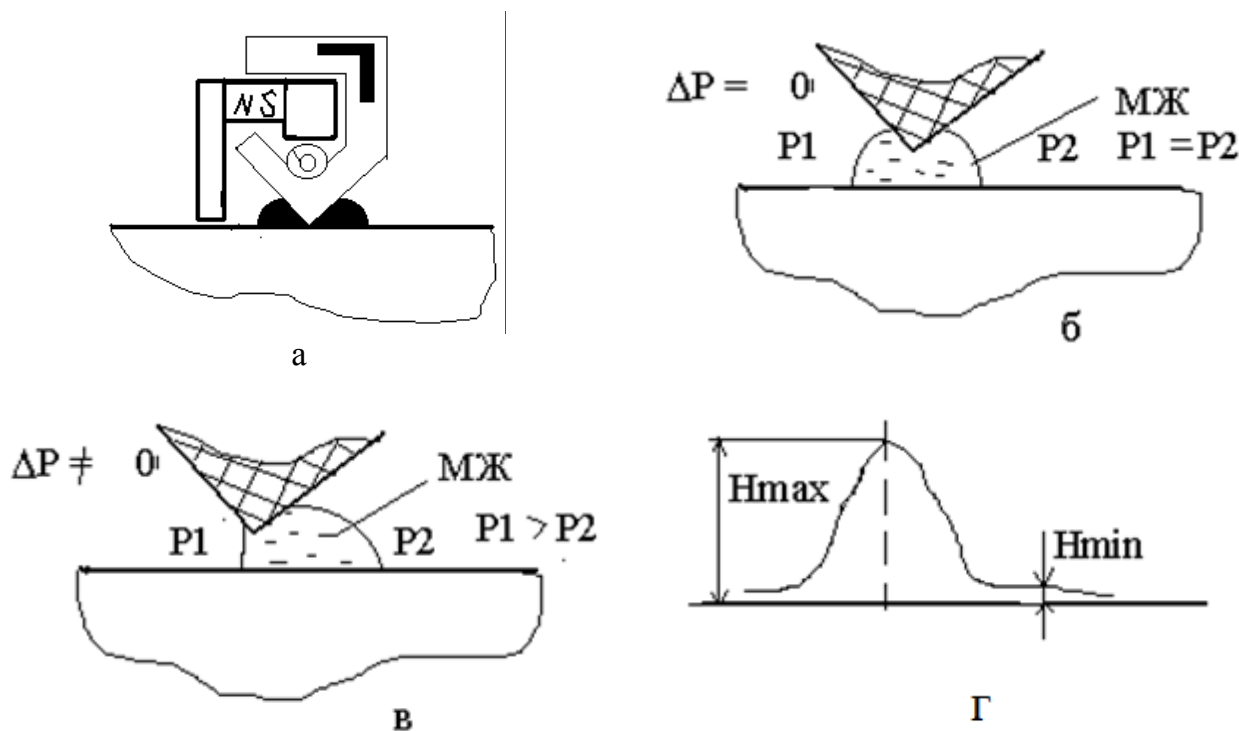
$$P - U_m = const, \quad (2.1)$$

где  $P$  – давление,  $U_m$  – магнитная энергия.

**Глава 2. Оценка возможности применения магнитной жидкости в комбинированных уплотнительных устройствах в качестве смазочно-уплотняющей среды**

Перепад давлений определяется разностью магнитных энергий на свободных поверхностях, ограничивающих объем МЖ, которая в неоднородном магнитном поле стремится занять положение, соответствующее максимальной магнитной энергии:

$$\Delta P = U_{m1} - U_{m2} . \quad (2.2)$$



**Рис. 2.2.** Принцип работы комбинированного магнитожидкостного уплотнения:  
 а – комбинированное манжетное магнитожидкостное уплотнение,  
 б – положение МЖ в рабочей области при  $\Delta P=0$ ,  
 в – положение МЖ в рабочей области при  $\Delta P>0$ ,  
 г – распределение магнитной индукции в рабочей области уплотнения

Магнитная энергия единицы объема МЖ :

$$U_m = \mu_0 \int_{H_{\min}}^{H_{\max}} M dH, \quad (2.3)$$

где  $\mu_0$  - магнитная постоянная,  $H$  – напряженность магнитного поля,  $H_{\max}$ ,  $H_{\min}$  максимальное и минимальное значение напряженности (рис. 2.2г),  $M$  – намагниченность МЖ.

Подставляя 2.1 в 2.2 получим:

$$\Delta P = \mu_0 \int_{H_{\min}}^{H_{\max}} M dH. \quad (2.4)$$

МЖ имеет насыщение при достаточно низкой напряженности магнитного поля, поэтому можно считать, что  $M=Ms$ , где  $Ms$  – намагниченность насыщения магнитной жидкости, тогда получим:

$$\Delta P = \mu_0 Ms (H_{\max} - H_{\min}). \quad (2.5)$$

Обычно в уплотнениях  $H_{\max} \gg H_{\min}$  поэтому критический перепад давлений определяется как:

$$\Delta P = \mu_0 Ms H_{\max}. \quad (2.6)$$

Напряженность в КМЖУ несколько ниже чем в МЖУ и составляет порядка 0.3 мА/м, намагниченность насыщения МЖ обычно находится в пределах 20–60 КА/м, при этих условиях  $\Delta P$  составляет порядка 0.01 МПа. Однако, как показывают исследования [1, 20, 21] удерживаемый МЖУ критический перепад давлений в динамическом режиме, в зависимости от скорости вращения, снижается по сравнению со статическим режимом в 2–3 раза. Поскольку в отличие от МЖУ комбинированное уплотнение имеет лишь одну область концентрации МЖ, удерживаемый магнитной ступенью перепад давлений будет составлять порядка 0.003–0.005 Мпа. Такое снижение удерживаемого перепада давлений в динамическом режиме происходит вследствие влияния на положение МЖ ряда факторов, таких как центробежные силы, эксцентриситет вала и других [20, 21].

Механизм герметизации манжетного уплотнения в статическом режиме заключается в заполнении под действием контактного давления микронеровностей вала материалом рабочего элемента уплотнения.

Основываясь на теории трения эластомера по металлу [127] можно представить механизм работы манжетного уплотнения в динамическом режиме.

В момент страгивания смазочный материал в области трения отсутствует (глава 1.2). Кромка манжеты отрывается от вала и происходит утечка уплотняемой среды через образовавшиеся между валом и кромкой манжеты микрощели. В момент пуска происходит разгерметизация уплотнения, характеризуемая 2-3 классом негерметичности [1].

При страгивании сила трения и интенсивность изнашивания имеют максимальные значения [74]. Поэтому, в момент страгивания крайне необходимо обеспечить наличие смазочного материала в области контакта рабочего элемента уплотнения с валом.

При вращении вала под действием сил трения участки кромки манжеты увлекаются в направлении его движения. Помимо этого каждая точка кромки манжеты совершает радиальные перемещения для восстановления контакта с валом, совершающим радиальные перемещения вследствие биения. Под влиянием этих факторов точки кромки манжеты совершают движения, траектории которых похожи на эллипсы [75]. Движение от центра происходит вследствие возмущающего воздействия поверхности твердого тела со скоростью набегания неровности поверхности. Движение к центру и против скольжения происходит под действием упругих и высокоэластичных напряжений со скоростью восстановления формы материала. На каждый элемент эластомера также действуют силы инерции, возникающие при рассматриваемых движениях. При низкой частоте вращения вала амплитуда колебаний точек кромки равна величине эксцентриситета, т.е. каждая кромка манжеты повторяет радиальные перемещения вала. С увеличением частоты вращения амплитуда колебаний точек кромки манжеты уменьшается, т.е. контакт между кромкой и валом восстанавливается с некоторым запаздыванием. За время запаздывания вал поворачивается на определенный угол. При повороте вала вследствие эксцентриситета возникает зазор между валом и кромкой. Величина зазора определяется разностью эксцентриситета вала и амплитуды колебания точек кромки. Величина зазора зависит от ряда параметров, основными из которых являются: частота вращения вала, эксцентриситет вала, жесткость эластомерного материала, конфигурация кромки манжеты, сила трения.

Нужно отметить, что радиальные колебания совершает каждая точка кромки манжеты. При этом появившийся при определенной частоте вращения вала зазор перемещается по окружности кромки манжеты со скоростью вращения вала.

Определение величины зазора связано с решением сложной задачи упругоэластичной деформации эластомера.

Проведенные исследования [75] показали, что зазоры между кромкой и валом возникают уже при частотах вращения порядка 600–800 об/мин. С ростом частоты вращения амплитуда колебаний кромки манжеты достигает определенного значения и практически не изменяется. Величина зазора, по данным этих же исследований составляет 20–50 % от величины эксцентриситета вала.

Возникающие зазоры могут являться причиной гарантированной утечки уплотняемой среды через уплотнение. Для традиционных манжетных уплотнений согласно действующим нормативам [1] допускаются утечки, составляющие 3–5 капель в час (класс негерметичности 2-2).

Удерживаемый манжетным уплотнением перепад давления определяется уравнением [1,75]:

$$\Delta P = 0.556P_k - P_0, \quad (2.7)$$

где  $P_k$  – контактное давление.

Контактное давление в манжете создается за счет растяжения губки манжеты, изгиба губки манжеты, от растяжения пружины, от давлений уплотняемой и окружающей сред на профиль губки манжеты. В манжетах с нажимной пружинной контактное давление может в определенных пределах регулироваться за счет изменения усилия пружины. Зависимость контактного давления от перепада давлений может быть выражена очень сильно, так как давления с различных сторон действуют на всю поверхность губки манжеты, а контактное давление лишь на узкую кромку шириной 0.2–0.8 мм. Увеличение перепада давлений на 0.5 МПа вызывает увеличение контактного давления, что приводит к значительному возрастанию момента трения, повышению износа кромки манжеты и может стать причиной разрушения кромки манжеты от скручивания [1]. В этом случае работоспособность манжеты в значительной мере определяется наличием в области трения и качеством смазочного материала, применяемого для смазывания кромки манжеты. Чем лучше смазочные свойства смазки, тем выше допустимое контактное давление, тем больше удерживаемый перепад давлений.

Представим механизм работы комбинированного уплотнения. В статическом режиме герметизация обеспечивается за счет плотно прилегающей к валу кромки манжеты. Магнитное уплотнение в этом случае практически не играет ни какой роли.

В динамическом режиме в зависимости от скорости вращения между кромкой манжеты и валом образуются и исчезают капилляры и микрощели. В зависимости от перепада давлений возможно несколько режимов работы уплотнения:

$\Delta P < \Delta P_m$ . Так как кромка манжеты находится в слое МЖ а величины магнитной энергии достаточно для компенсации перепада давлений, уплотнение осуществляется за счет магнитной ступени. При этом исключаются какие – либо утечки.

$\Delta P > \Delta P_m$ . В этом случае возможен пробой магнитожидкостного уплотнения через возникающий между кромкой манжеты и валом зазор и возникновение утечек через уплотнение.

Независимо от режима работы комбинированного уплотнения через образовавшиеся капилляры происходит проникновение под трущуюся кромку манжеты магнитной жидкости. В этом случае МЖ выполняет функции смазочного материала и осуществляет процесс смазки.

Поэтому применение МЖ может значительно снизить износ трущихся частей и увеличить ресурс уплотнения.

При этом в области трения магнитными силами удерживается значительное количество МЖ, достаточное для удовлетворительной смазки тел трения. Магнитные силы так же препятствуют исчезновению смазки из области трения в следствии разбрызгивания.

### **2.3. Определение скорости проникновения МЖ в зазор уплотнения**

На магнитную жидкость, находящуюся в рабочей области уплотнения действует ряд сил, под влиянием которых происходит ее проникновение в образующихся при вращении вала микрощели. Из проникающего под кромку манжеты смазочного материала в области трения образуется пленка смазки снижающая момент трения и износ трущихся частей уплотнения.

В традиционных манжетных уплотнениях смазка трущихся частей осуществляется материалом уплотняемой среды, проникающей в область трения под действием перепада давлений.

В манжетах активного типа подача смазки в область трения обеспечивается насосным эффектом при вращении вала. В обоих случаях смазка кромки осуществляется материалом уплотняемой среды.

В комбинированном манжетном уплотнении смазка кромки осуществляется магнитной жидкостью, удерживаемой в рабочей области магнитным полем. Для МЖ находящейся на начальном участке микрощели можно записать уравнение перераспределения давлений (рис. 2.3):

$$\Delta P + P_m + P_k = P_{тр}, \quad (2.8)$$

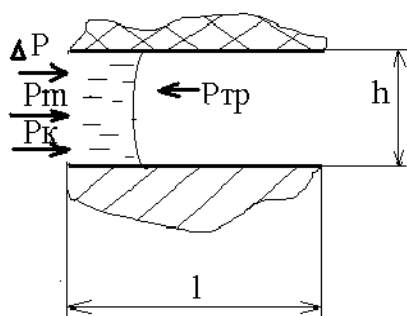
где  $\Delta P$  – перепад давлений на уплотнении;  $P_m$  – магнитное давление;  $P_k$  – давление, обусловленное поверхностными явлениями на стенках микрощели;  $P_{тр}$  - перепад давлений, обусловленный потерями на трение МЖ о стенки микрощели.

Величина магнитного давления  $P_m$  определяется исходя из 2.6 и зависит от свойств МЖ и параметров магнитного поля.

Капиллярное давление  $P_k$  определяется из уравнения Юнга – Лапласа:

$$P_k = \frac{\sigma}{R}, \quad (2.9)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение;  $R$  – радиус кривизны поверхности жидкости на границе раздела. Несмотря на то, что стенки микрощели состоят из различных материалов, можно принять, что для таких размеров капилляра (порядка 0.1–0.4 мм) радиус кривизны равен  $1/2$  высоты микрощели.



**Рис. 2.3.** Перераспределение давлений на микрощели:  $\Delta P$  – перепад давлений на уплотнении,  $P_m$  – магнитное давление,  $P_k$  – капиллярное давление,  $P_{тр}$  – перепад давлений, обусловленный потерями на трение о стенки микрощели

Чтобы определить величину падения давления, обусловленную трением МЖ о стенки микрощели необходимо представить характер течения жидкости в щели. При напорном течении жидкости ламинарный режим существует при условии:

$$Re < Re_{кр}, \quad (2.10)$$

где  $Re = vD\Gamma/v = 2hv/v$  (для уплотнительных устройств гидравлический диаметр щели равен удвоенной величине зазора  $D\Gamma = 2h$  [76,77,78,79],  $v$  – средняя скорость течения жидкости в щели,  $v$  – кинематическая вязкость жидкости,  $Re_{кр}$  – критическое значение числа Рейнольдса, соответствующее нарушению устойчивости ламинарного режима течения.

Величина  $Re_{кр}$  зависит от наличия возмущений, действующих на поток жидкости. Для гладких щелей, по данным различных исследований [6,11,76,77,78,79,80] значение  $Re_{кр}$  колеблется от 1000 до 2800. По уточненным данным [77] для цилиндрических эксцентрических щелей при относительном эксцентриситете  $\varepsilon = 1$  ( $\varepsilon$  – отношение величины эксцентриситета к высоте зазора)  $Re_{кр} = 1100$ .

Чтобы оценить характер течения жидкости в щели необходимо определить скорость ее течения. Оценить скорость течения можно исходя из расхода жидкости через щель:



$$Q = \pi \cdot D \cdot h \cdot v, \quad (2.11)$$

где  $D$  – диаметр вала,  $h$  – высота щели,  $v$  – скорость течения жидкости.

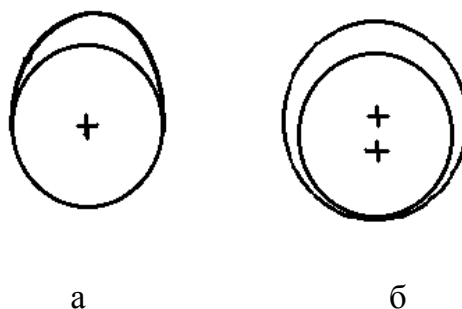
Для нормально функционирующих манжетных уплотнений величина утечки не должна превышать  $0.1 \text{ см}^3/\text{ч}$  (для манжет диаметром до 50 мм). Средняя скорость течения жидкости в этом случае составит (при  $D=25 \text{ мм}$ ,  $h=0.1 \text{ мм}$ )  $v=3.5 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$ .

Критерий Рейнольдса для этих условий будет равен (при  $v=710 \text{ мм}^2/\text{с}$ ),  $Re=0.97 \cdot 10^{-6} < 1100$ , что значительно ниже чем  $Re_{кр}$ . Поэтому, можно утверждать, что течение жидкости в осевом направлении носит ламинарный характер.

Чтобы определить коэффициент сопротивления первоначально необходимо представить конфигурацию самой щели. Принимая во внимание изменение формы кромки манжеты, происходящее при вращении вала [75], можно представить конфигурацию микрощели рис. 2.4 а.

Однако, определить коэффициент сопротивления щели, ограниченной эллипсом (рабочая кромка) и кругом (вал) достаточно сложно. Поэтому, учитывая малость величины эксцентриситета по отношению к радиусу вала в первом приближении, при дальнейших расчетах можно принять что кромка манжеты имеет форму окружности рис. 2.4 б.

Для такого характера течения коэффициент сопротивления трению определяется следующим образом [78]:



**Рис. 2.4.** Конфигурация капилляра: а – реальная, б – принимаемая при расчетах

$$\lambda = \frac{96}{1+(1.5-0.926 \cdot 10^{-2} \cdot Re_{\omega}^2) \varepsilon^2 \cdot Re}, \quad (2.12)$$

где  $Re_{\omega} = \omega r h / v$  – критерий Рейнольдса для окружного течения,  $\varepsilon$  – относительный эксцентриситет вала.

В данном случае отсутствует относительное скольжение вала и стенки микрощели, поэтому можно не учитывать влияние на коэффициент сопротивления течению жидкости  $Re_{\omega}$ .

С учетом вышеперечисленных допущений выражение 2.12 примет вид:

$$\lambda = 38.4 / Re.$$

Перепад давлений, обусловленный трением жидкости в рабочем зазоре уплотнения определяется следующим образом [1,76,77]:

$$P_{\text{тр}} = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot \lambda \cdot l}{4 \cdot h}, \quad (2.13)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $v$  – средняя скорость течения в щели,  $\lambda$  – коэффициент сопротивления трению,  $l$  – длина щели,  $h$  – высота щели.

Записав выражение 2.13 с учетом коэффициента сопротивления трению получим зависимость, определяющую падение давления за счет трения жидкости о стенки микрощели:

$$P_{\text{тр}} = \frac{9.6 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot l}{h \cdot Re}. \quad (2.14)$$

Подставив в выражение 2.8 выражения 2.5, 2.9, 2.14, можно выразить среднюю скорость течения МЖ в щели

$$v = \sqrt{\frac{(\Delta P + \mu_0 \cdot M_s \cdot (H_{\text{max}} - H_{\text{min}}) + \sigma/R) \cdot h \cdot Re}{9.6 \cdot \rho \cdot l}}. \quad (2.15)$$

### **2.3.1. Измерение поверхностного натяжения магнитной жидкости**

Чтобы определить скорость проникновения МЖ в микрощель, необходимо знать величину поверхностного натяжения МЖ.

Определение поверхностного натяжения МЖ производилось сталагмометрическим методом. Он основан на том, что в момент отрыва капли от нижнего конца вертикальной трубки вес капли  $M_k$  уравнивается силой поверхностного натяжения, которая действует вдоль окружности шейки капли и препятствует ее отрыву. Вес капли рассчитывается по [81]:

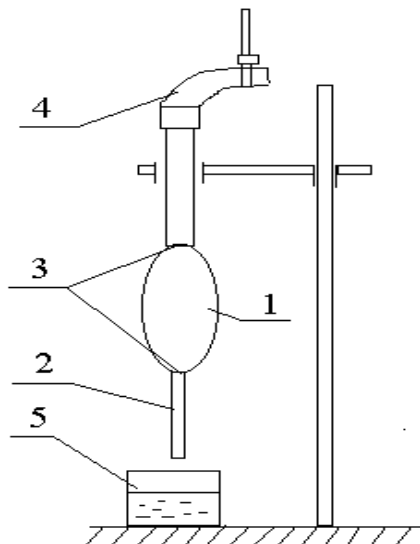
$$M_k = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sigma,$$

где  $r$  – радиус трубки,  $\sigma$  – поверхностное натяжение Н/м.

Сталагмометр (рис. 2.5) включает в себя стеклянную трубку 1 с расширением в центральной части и капилляром 2 в нижней. На трубке нанесены две круговые метки 3. Капилляр предназначен для ограничения скорости образования капель, которая не должна превышать 20 капель в минуту. При большей скорости вес капель изменяется. Для регулировки частоты падения капель используется резиновая трубка с зажимом 4. Для измерения сталагмометр закрепляется в штатив, через резиновую трубку 4 засасывается жидкость выше верх-

**Глава 2. Оценка возможности применения магнитной жидкости в комбинированных уплотнительных устройствах в качестве смазочно-уплотняющей среды**

ней метки. Затем отсчитывается число капель, вытекающих из объема от верхней до нижней круговой метки, собирается в емкость 5 и взвешивается.



**Рис. 2.5.** Схема измерения поверхностного натяжения сталогмометрическим методом.  
1 – трубка, 2 – капилляр,  
3 – круговые метки, 4 – зажим

Результаты измерений для жидкости на ПЭС – 5 с комбинированным магнитным наполнителем и чистой ПЭС – 5 приведены в табл. 2.1.

*Таблица 2.1. Физические характеристики жидкостей, принятые при расчетах*

Параметры	Магнитная жидкость	Жидкость-носитель
Внешний перепад давлений $\Delta P$ МПа	0.03	0.03
Намагниченность насыщения $M_s$ КА/м	30	-
Максимальная величина напряженности $H_{max}$ МА/м	0.6	-
Поверхностное натяжение $\sigma$ Н/м	22.39	23.11
Длина микрощели $l$ мм	0.5	0.5
Высота микрощели $h$ мм	0.1	0.1
Плотность $\rho$	0.98	0.91

### **2.3.2. Результаты расчета скорости проникновения в микрощель магнитной жидкости**

Результаты расчетов скорости проникновения МЖ в микрощель, проведенные с использованием зависимости 2.15, представлены в табл. 2.2. Используемые при расчетах величины параметров, входящих в зависимость 2.15, приведены в табл. 2.1.

При сравнении полученных результатов, видно, что для магнитной жидкости при наложении магнитного поля скорость заполнения микрощели возрастает незначительно.

*Таблица 2.2. Результаты расчета проникновения жидкостей в микрощель*

	Магнитная жидкость		Жидкость-носитель
	В магнитном поле	Без магнитного поля	
Скорость проникновения жидкостей в микрощель м/с	1.549	1.49	1.71

Скорость заполнения микрощели чистой жидкостью-носителем больше скорости заполнения МЖ. Незначительное влияние магнитной индукции на скорость проникновения МЖ в щель обусловлено малой величиной магнитной составляющей давления. При размерах микрощели порядка 0.1 мм основной вклад в суммарное значение действующего на жидкость давления вносит капиллярный эффект. Величина капиллярного давления выше магнитного на два порядка. В этих условиях чистая жидкость-носитель, обладающая несколько большим, по сравнению с МЖ, поверхностным натяжением, будет быстрее проникать в образовавшуюся микрощель. По сравнению с чистой жидкостью-носителем скорость проникновения МЖ уменьшается не более чем на 10 %. Можно предположить, что некоторое уменьшение скорости проникновения МЖ в микрощель не значительно повлияет на ее смазочные свойства.

### **2.4. Выводы к главе 2**

1. При рассмотрении механизма работы КМЖУ с помещенной в область рабочей кромки манжеты магнитной жидкостью установлено, что в КМЖУ целесообразно использовать магнитную жидкость не только в качестве уплотняющей среды, но и как смазочный материал трущихся частей уплотнения.

2. Установлено, что скорость проникновения МЖ в микрощель на 10 % ниже скорости проникновения чистой жидкости-носителя.

## ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СМАЗКИ ТРУЩИХСЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОМБИНИРОВАННЫХ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ УПЛОТНЕНИЙ

Существует несколько методов расчета магнитных систем, из которых наиболее распространенными являются метод вероятных путей магнитного потока, метод конечных разностей и метод конечных элементов. Метод вероятных путей магнитного потока больше всего пригоден для инженерных расчетов. Погрешности, возникающие при применении этого метода могут достигать 20–30 % и в значительной степени зависят от опыта инженера.

Наиболее точными являются реализованные на вычислительной технике метод конечных разностей и метод конечных элементов. Однако метод конечных элементов позволяет более корректно описать расчетную область, что приводит к уменьшению погрешности вычислений. Поэтому, применение этого метода при исследовании магнитных полей в электромагнитных устройствах наиболее предпочтительно.

### 3.1. Характеристика метода конечных элементов

Решение полевых задач методом конечных элементов заключается в определении такого распределения потенциала, при котором сохранялась бы его непрерывность во всей расчетной области.

Внутри треугольного элемента (рис. 3.1) векторный магнитный потенциал «А» аппроксимируется выражением [82].

$$A_{(x,y)} = a + bx + cy. \quad (3.1)$$

Считая, что уравнение (3.1) справедливо для вершин треугольника Р,К,О, можно записать систему уравнений:

$$\begin{aligned} A_p &= a_p + bx_p + cy_p; \\ A_k &= a_k + bx_k + cy_k; \\ A_o &= a_o + bx_o + cy_o. \end{aligned} \quad (3.2)$$

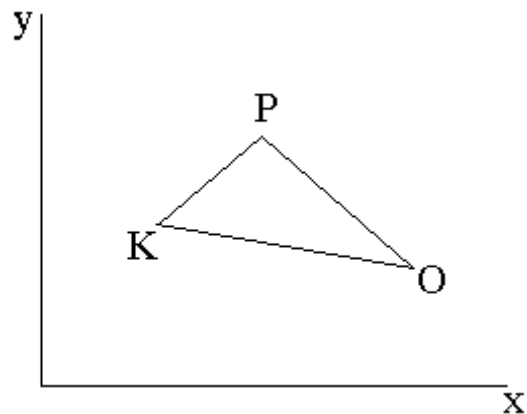


Рис. 3.1. Треугольный элемент

Решая систему уравнений (3.2) относительно коэффициентов  $a, b$  и  $c$  и подставляя полученные значения этих коэффициентов в уравнение (3.1), получим выражение для векторного магнитного потенциала:

$$A_{(x,y)} = \frac{1}{2S_1} \cdot A_p((x - x_o)(y_k - y_o) - (y - y_o)(x_k - x_o)) + \frac{1}{2S_1} \cdot A_k((x - x_p)(y_p - y_p) - (y - y_p)(x_o - x_p)) + \frac{1}{2S_1} \cdot A_o((x - x_k)(y_p - y_k) - (y - y_k)(x_p - x_k)), \quad (3.3)$$

где  $S_1$  – площадь треугольного элемента.

Из выражения (3.3) найдём выражения для проекций индукции на оси.

$$B_x = \frac{\partial A}{\partial Y} = \frac{1}{2S_1} (A_p(X_o - X_k) + (A_k(X_p - X_o) + A_o(X_k - X_p))) = \frac{1}{2S_1} \sum_{i=p,k,o} C_i A_i ;$$

$$B_y = \frac{\partial A}{\partial X} = \frac{1}{2S_1} (A_p(Y_o - Y_k) + (A_k(Y_p - Y_o) + A_o(Y_k - Y_p))) = \frac{1}{2S_1} \sum_{i=p,k,o} B_i A_i ,$$

где  $C_{p,k,o} = X_{p,k,o} - X_{k,o,p}$ ,  $B_{p,k,o} = Y_{k,o,p} - Y_{o,p,k}$

При расчете двухмерного стационарного магнитного поля применяется квазиуравнение Пуассона. В декартовой системе координат для плоскопараллельного поля оно будет иметь вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial A}{\mu \partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial A}{\mu \partial y} \right) = -J. \quad (3.4)$$

При использовании метода конечных элементов [83,84] решение находится из условия минимума некоторого функционала, выраженного в виде интеграла. Например, решение уравнения (3.4) заключается в поиске минимума энергетического функционала.

$$Q = \iint_{xy} \left[ \int_0^{B_x} H_x dB_x + \int_0^{B_y} H_y dB_y - JA \right] dx dy;$$

$$Q = \iint_{xy} \left[ \int_0^{B_x} \frac{B_x}{\mu} dB_x + \int_0^{B_y} \frac{B_y}{\mu} dB_y - JA \right] dx dy = \iint_{xy} \left[ \int_0^{B_x} \frac{B_x^2}{2\mu} + \int_0^{B_y} \frac{B_y^2}{2\mu} - JA \right] dx dy. \quad (3.5)$$

Учитывая (3.1)  $H_x = B_x / \mu$   $H_y = B_y / \mu$  и подставляя эти значения в (3.5), получим:

$$Q = \iint_{xy} \left[ \int_0^{B_x} \frac{B_x}{\mu} dB_x + \int_0^{B_y} \frac{B_y}{\mu} dB_y - JA \right] dx dy = \iint_{xy} \left[ \int_0^{B_x} \frac{B_x^2}{2\mu} + \int_0^{B_y} \frac{B_y^2}{2\mu} - JA \right] dx dy \quad (3.6)$$

Значения  $B_x^2$  и  $B_y^2$  можно записать в виде:

$$B_x^2 = \left( \frac{dA}{dy} \right)^2 \quad B_y^2 = \left( \frac{dA}{dx} \right)^2.$$

Тогда

$$Q = \iint_{xy} \left[ \int_0^{B_x} \frac{1}{\mu} \left( \frac{dA}{dy} \right)^2 dB_x + \int_0^{B_y} \frac{1}{\mu} \left( \frac{dA}{dx} \right)^2 dB_y - 2JA \right] dx dy. \quad (3.7)$$

Сделав соответствующие преобразования, можно показать, что минимизация функционала соответствует уравнению (3.4). В ходе минимизации функционала по векторным потенциалам возникает система не линейных алгебраических уравнений.

При решении этой системы применяется метод Ньютона-Рафсона с линеаризацией на каждом шаге, причем в приращении потенциалов учитывается коэффициент релаксации. Величина коэффициента релаксации определяется исходя из минимизации средней суммы квадратов невязок на узел, а сама зависимость носит квадратичный характер. Решению системы линейных уравнений осуществляется методом Холецкого. Для уравнений (3.4–3.5) следует задать граничные условия. Если конструкция КМЖУ состоит из двух симметричных частей, то в качестве расчетной достаточно рассмотреть одну симметричную часть. Для неё граничные условия определяются следующим образом: в узлах на границах, совпадающих с силовой линией магнитного поля, векторный магнитный потенциал принимается равным нулю:

$$A_{BC} = 0 \quad A_{AB} = 0 \quad A_{DA} = 0. \quad (3.8)$$

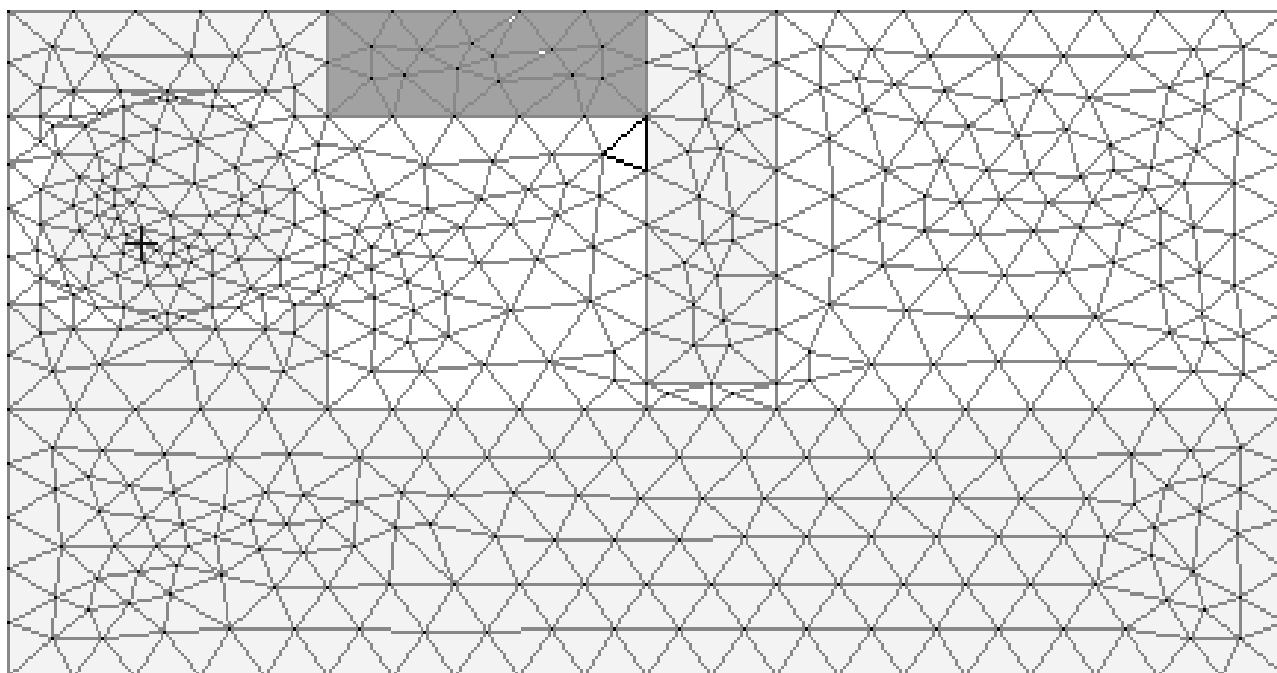
При пересечении границы силовыми линиями магнитного поля под прямым углом для узлов, лежащих на ней, выполняется условие Неймана:

$$\frac{dA}{dn_{CD}} = 0. \quad (3.9)$$

При расчете магнитных полей возникает необходимость в определении рабочей точки постоянного магнита.

При решении уравнения применяется интерполяция кубическими сплайнами зависимости намагниченности постоянного магнита от индукции в направлении от легкого намагничивания. Положение рабочей точки магнитной системы, в этом случае, определяется для каждого треугольного элемента.

Для осуществления процесса триангуляции расчетной области требуется достаточно много времени. Поэтому целесообразно использовать автоматическую генерацию для расчетной области МЖГ [85,86,87] (рис. 3.2).



**Рис. 3.2.** Пример триангуляции расчетной области

Стороны треугольных элементов, на которые разбивается построенная расчётная область МЖГ с непрерывно изменяющимися параметрами, совпадают с границами раздела сред, имеющих разную магнитную проницаемость. Магнитная индукция и проницаемость принимаются одинаковыми в любой точке каждого элемента. Данное допущение тем справедливее, чем большее число элементов содержит вся область. Поэтому, в областях со значительным изменением градиента магнитного поля необходимо производить разбиение расчетной области на большее число треугольных элементов [88, 89].



### 3.2. Исследование влияния конфигурации магнитной системы КМЖУ на процесс смазки его трущихся частей

Основными характеристиками уплотнения являются величина удерживаемого перепада давлений  $\Delta P$  и момент трения  $M_{тр}$ . Для КМЖУ эти показатели находятся в непосредственной зависимости от величины магнитной индукции, и ее распределения в рабочем зазоре. В свою очередь величина индукции и ее распределение определяются конфигурацией магнитной системы уплотнения.

Магнитная система включает в себя источник магнитного поля и магнитопровод. В качестве источника магнитного поля в КМЖУ используются постоянные магниты. Магниты могут быть намагничены как в осевом, так и в радиальном направлении. Вектор намагниченности постоянного магнита может оказывать влияние на величину и распределение магнитной индукции в уплотнении. Магнитопровод может включать в себя как специально предназначенные для проведения магнитного потока элементы, так и магнитопроводящие части традиционного уплотнения, входящего в состав КМЖУ.

В настоящее время существует ряд конструкций КМЖУ, имеющих различные магнитные системы. Выбрать наиболее рациональную конструкцию можно лишь на основании ее магнитного расчета.

Основными результатами расчета магнитного поля являются распределение магнитной индукции и картина магнитного поля. По этим параметрам возможно провести оценку магнитной системы уплотнения.

Критериями оценки в этом случае являются:

1. Максимальная величина магнитной индукции в рабочей области уплотнения.
2. Распределение магнитного поля в рабочей зоне уплотнения.

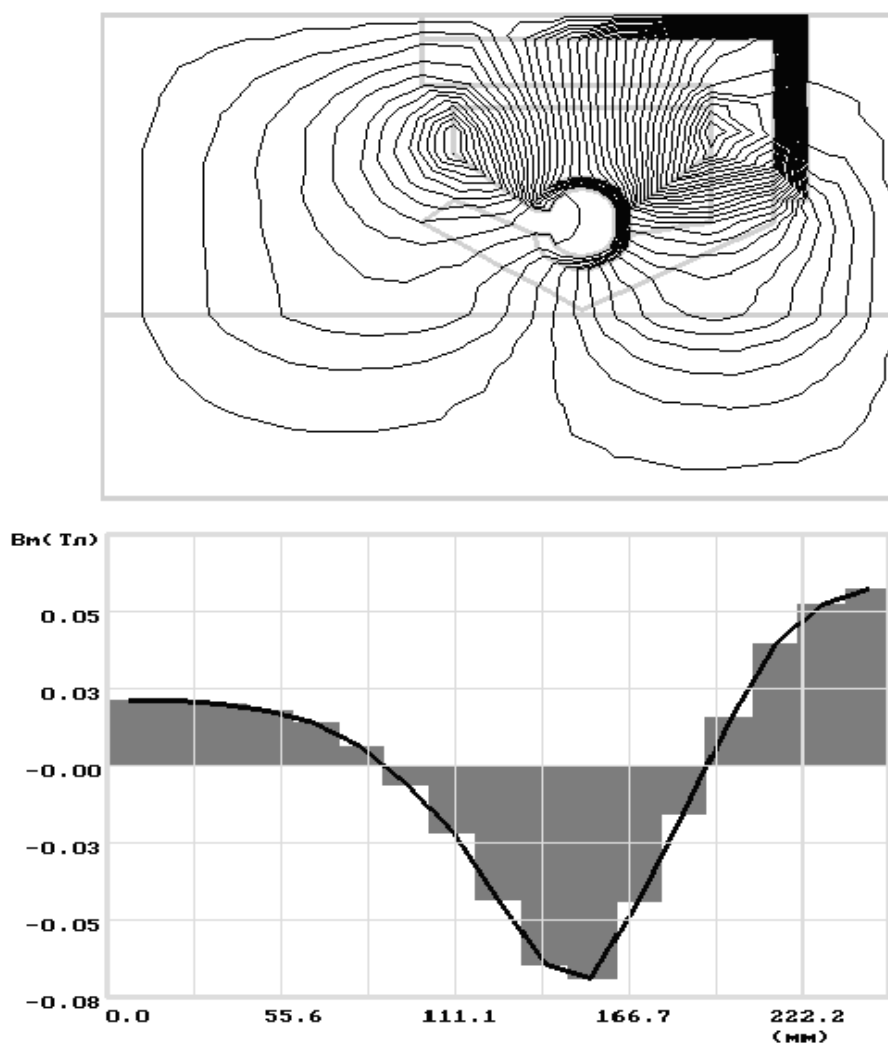
Первый критерий обуславливает герметичность магнитной ступени КМЖУ, поскольку именно этот показатель влияет на удерживаемый перепад давлений (глава 2.2). Критерий 2 вытекает из условия наличия магнитной жидкости в области трения уплотнения, т.к. в этом случае его рабочие характеристики могут быть улучшены за счет использования МЖ в качестве смазки.

Для анализа были выбраны конструкции КМЖУ состоящие из манжетного уплотнения, снабженного магнитной системой (рис.1.6, рис. 1.8, рис. 1.9, рис. 1.11). Такие уплотнения наиболее просты и не требуют серьезного изменения конструкции манжеты. Они могут быть получены путем помещения в стандартное манжетное уплотнение источников магнитного поля и магнитопровода.

В соответствии с методом расчета магнитного поля (глава 3.1) на основании конструкций уплотнений были построены расчетные области, проведена их триангуляция. При расчетах принималось, что источниками магнитного поля являются постоянные феррит – стронциевые магниты 24СА200, материал вала – сталь 45, материал арматуры манжеты – сталь 20, материал пружины –

сталь 45. Для конструкций (рис. 1.6 б, 1.8) расчет проводился как при осевой, так и при радиальной намагниченности магнитов. В результате расчетов было получено распределение магнитной индукции и картины магнитного поля для всех расчетных областей.

На рис. 3.3 представлена картина магнитного поля и кривая распределения магнитной индукции вдоль вала для КМЖУ, имеющего в качестве источников магнитного поля постоянные магниты, установленные между внешней кромкой манжеты и ее пружинной.



**Рис. 3.3.** Картина магнитного поля и кривая распределения индукции по поверхности вала

Анализируя картину магнитного поля можно прийти к выводу, что основной магнитный поток шунтируется арматурой манжеты, и лишь небольшая его часть, протекая через пружину, пересекает рабочий зазор. Следствием этого

является крайне низкая величина магнитной индукции под кромкой манжеты, порядка 0.07 Тл (рис. 3.3). При таком значении  $B_m$  перепад давлений, удерживаемый магнитной ступенью уплотнения настолько мал (при  $M_s=30$  Ка/м,  $\Delta P=0.02$  Ати, по номер формулы) что им можно пренебречь.

При работе уплотнения неизбежно разбрызгивание магнитной жидкости вследствие вибрации. С течением времени возможно полное исчезновение МЖ из рабочей области, поскольку возникающих магнитных сил явно недостаточно чтобы втянуть МЖ обратно в область трения. В этом случае эффект от применения МЖ в качестве смазки будет минимален.

На рис. 3.4, 3.5 представлены картины магнитных полей для уплотнения с установленными на валу по обе стороны рабочей кромки манжеты постоянными магнитами. В том случае, когда вектор намагниченности направлен вдоль вала, линии магнитного поля, концентрируясь на углах и боковых гранях магнитов замыкаются через вал и пружину уплотнения, минуя рабочую область (рис. 3.4).

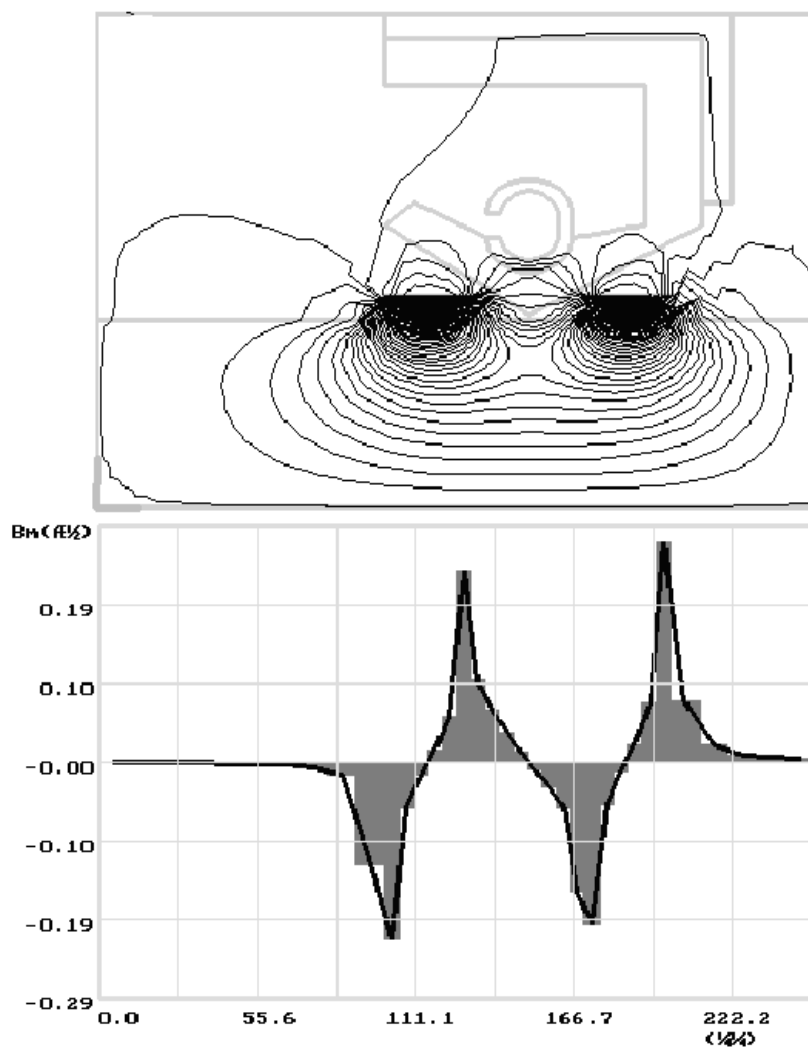
Величина магнитной индукции в этом случае имеет наибольшее значение, порядка 0.2 Тл, в областях, находящихся в непосредственной близости от боковых граней магнитов.

Магнитная индукция под кромкой манжеты равна 0 (рис. 3.4 а). Чтобы представить какое именно положение займет помещенная в рабочий зазор МЖ, необходимо рассмотреть распределение индукции по торцам магнитов, обращенных к рабочей кромке (рис. 3.4 б, в). Как видно из кривых, наибольшее значение индукции, порядка 0.2Тл соответствует области вблизи вала и уменьшается по мере удаления от него.

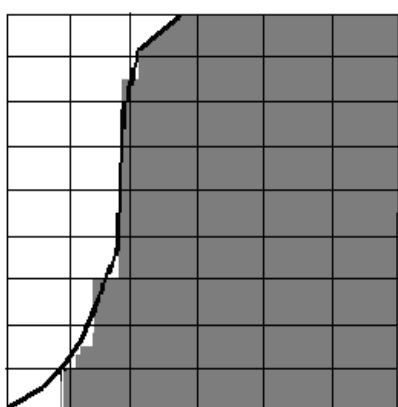
Основываясь на распределении магнитной индукции в рабочей области уплотнения, можно сказать, что МЖ займет положение в углах, образованных боковыми гранями магнитов и валом (рис. 3.4 г). Под кромкой манжеты МЖ будет либо отсутствовать вовсе, либо находиться в небольшом количестве.

Как видно из рис. 3.4 г в данной конструкции магнитожидкостные уплотнительные пробки а следовательно и магнитная ступень уплотнения отсутствуют. Эффект от смазочного действия МЖ так же минимален, поскольку она слабо удерживается в области трения.

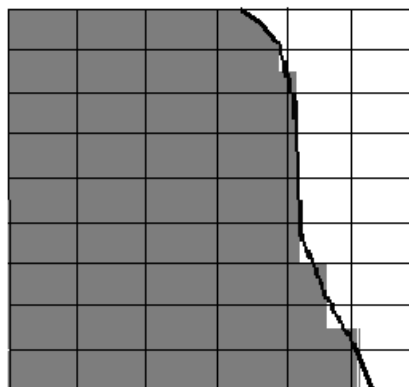
Картина магнитного поля коренным образом меняется при намагниченности магнитов в радиальном направлении (рис. 3.5). Магнитная индукция в рабочем зазоре уплотнения достигает 0.1 – 0.13 Тл. и наблюдается некоторое снижение индукции под кромкой манжеты (рис. 3.5 а). Для данной конструкции представляет интерес распределение индукции по наружным граням магнитов, обращенным к манжетному уплотнению.



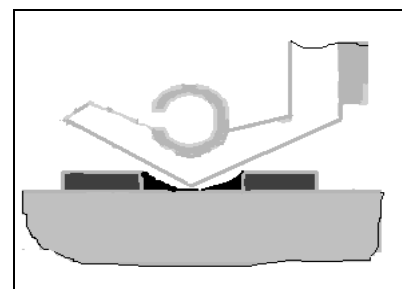
а



б

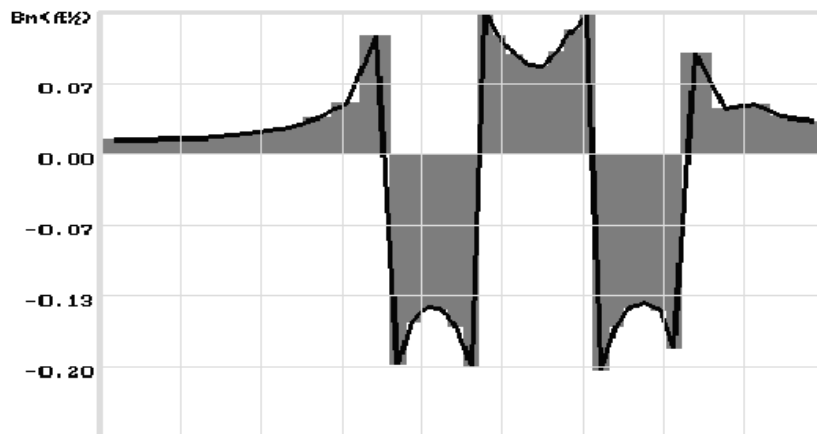
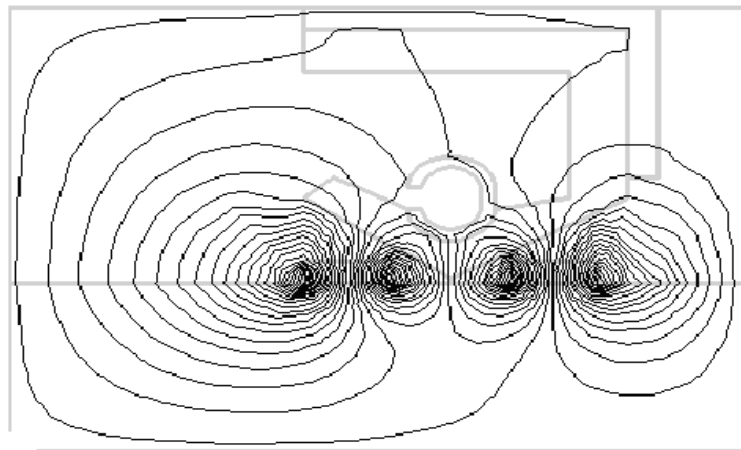


в

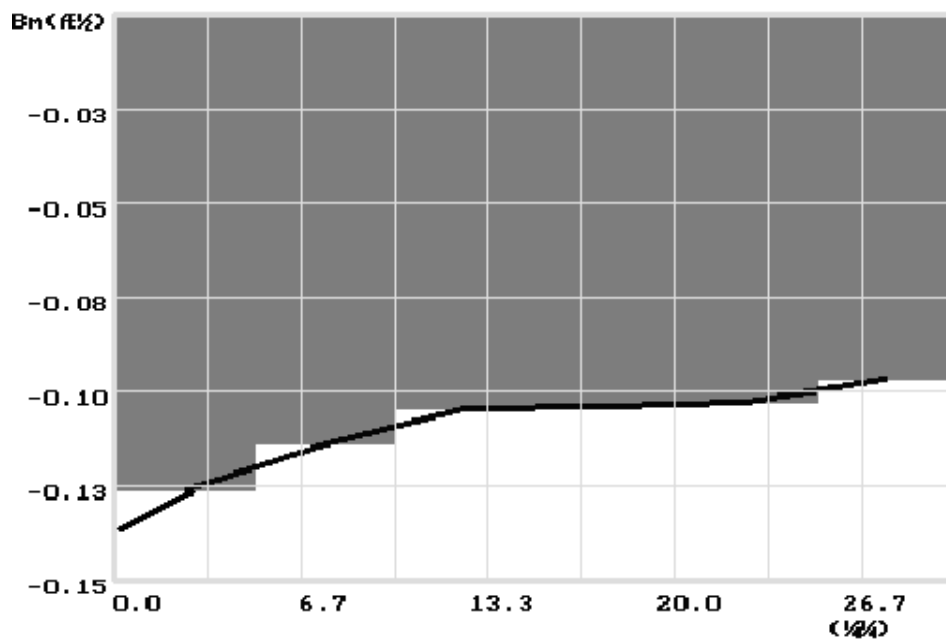


г

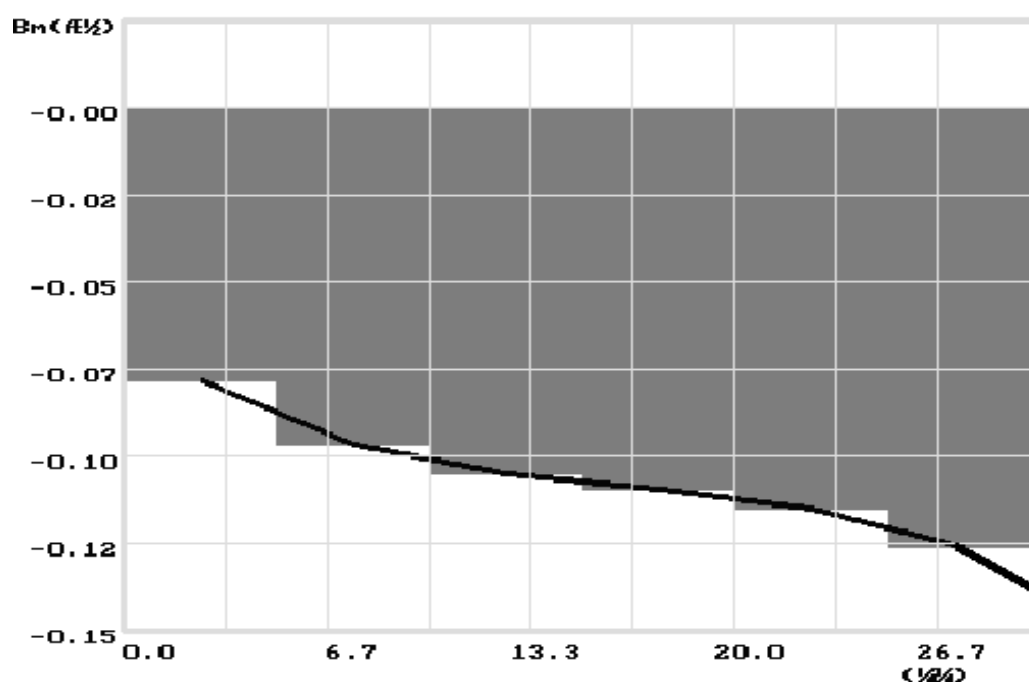
**Рис. 3.4.** Магнитный расчет уплотнения: а – картина магнитного поля и кривая распределения индукции по поверхности вала, б, в – распределение индукции по торцам магнитов, г – положение МЖ в рабочей области



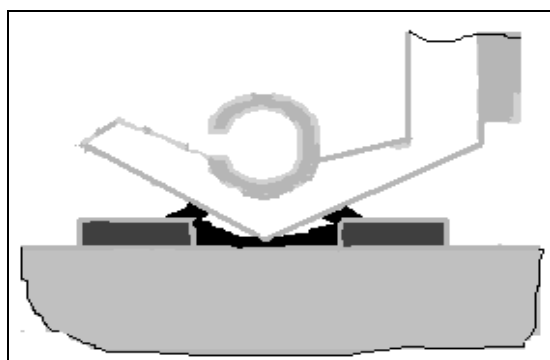
а



б



в



г

**Рис. 3.5.** Магнитный расчет уплотнения:  
а – картина магнитного поля и кривая распределения индукции по поверхности вала, б, в – распределение индукции по наружным граням магнитов, г – положение МЖ в рабочей области

Как видно из кривых (рис. 3.5 б, в), наибольшее значение индукции – порядка 0.2 Тл соответствует углам магнитов, обращенным к манжете. Магнитная жидкость, помещенная в рабочий зазор, под действием магнитных сил будет стремиться в области с наибольшей индукцией. Положение МЖ в рабочем зазоре показано на рис. 3.5 г. МЖ будет надежно удерживаться в области трения, обеспечивая смазывание трущейся кромки манжеты. Дополнительные магнитожидкостные пробки 1 и 2 (рис. 3.5) будут защищать рабочую область от попадания в нее пыли, влаги, частиц загрязнения.

На рис. 3.6 представлена картина магнитного поля и кривая распределения индукции для уплотнения с радиально намагниченным постоянным магнитом, установленным под рабочей кромкой манжеты. (В этом случае представ-

лена кривая распределения индукции соответствует уровню грани магнита, обращенной к рабочей кромке манжеты, показанному на рис. 3.6 штриховой линией). Из рис. 3.6 видно, что основная часть линий магнитного поля пересекает рабочий зазор. Величина магнитной индукции под кромкой манжеты остается практически постоянной и достигает 0.15 Тл (рис. 3.6). Магнитная жидкость надежно удерживается в области трения, обеспечивая смазывание кромки манжеты. МЖ проникая в зазор между валом и магнитом будет обеспечивать его герметизацию.

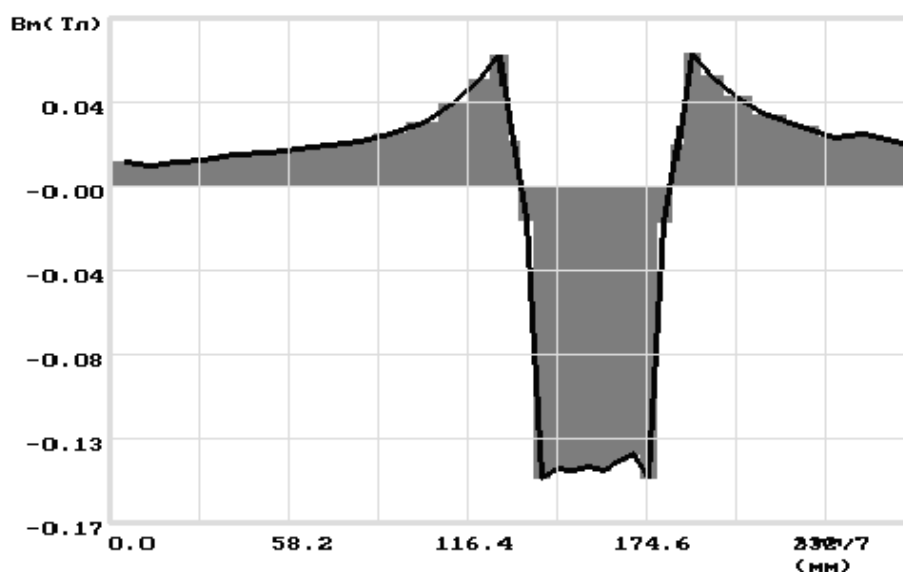
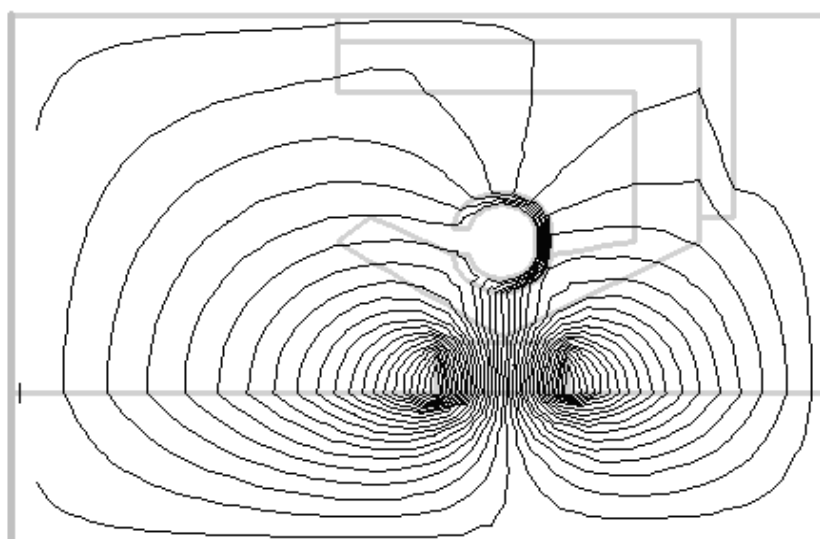
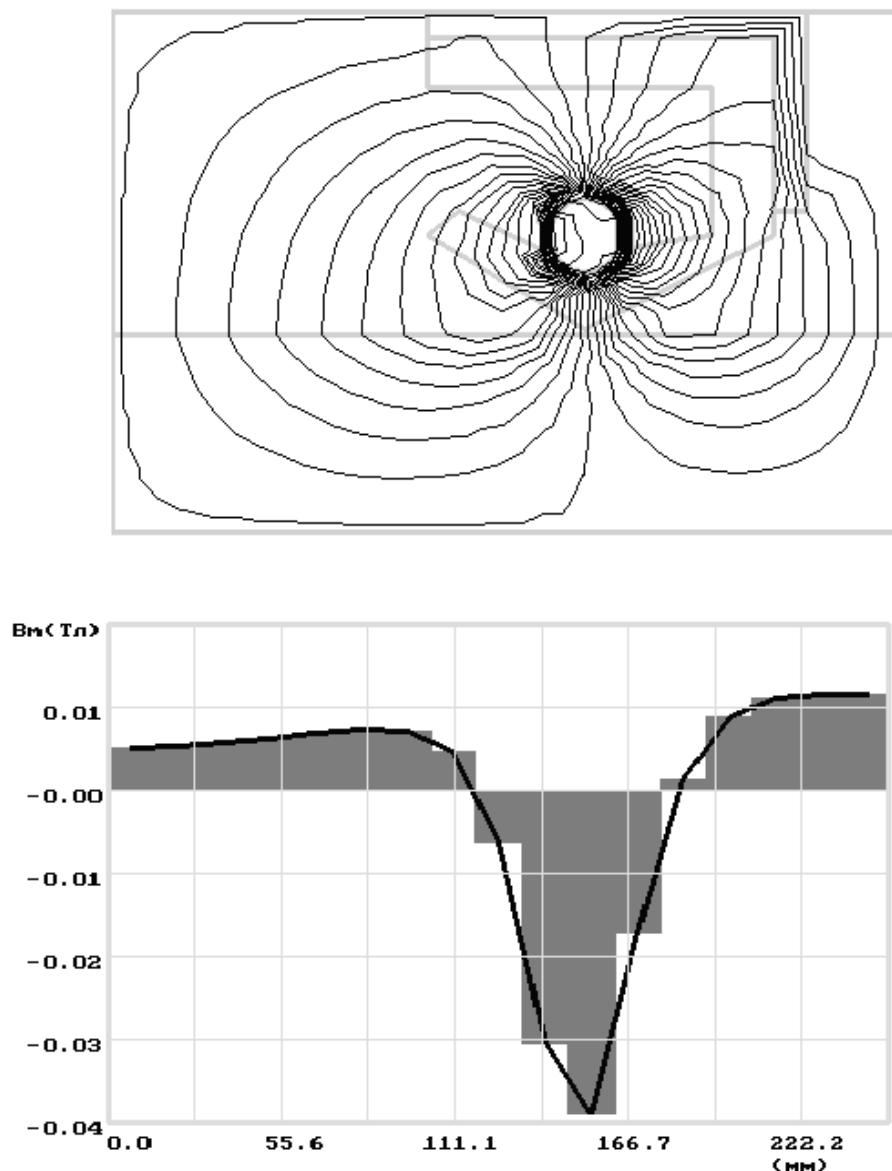


Рис. 3.6. Картина магнитного поля и кривая распределения индукции в рабочей области уплотнения на уровне наружной грани магнита

Применение в манжетном уплотнении намагниченной пружины рис. 3.7 практически не влияет на его работоспособность, поскольку величины магнитной индукции в рабочем зазоре, порядка 0.04 Тл, недостаточно для надежного удержания МЖ.



**Рис. 3.7.** Картина магнитного поля и кривая распределения индукции по поверхности вала

На рис. 3.8, 3.9 представлены картины магнитных полей для уплотнений с установленным между кромкой манжеты и пыльником магнитным элементом.

В случае осевой намагниченности рис. 3.8, в рабочем зазоре возникают две области, максимальная индукция в которых составляет 0.07 Тл. Удерживаемый магнитной ступенью перепад давлений составляет (при  $M_s=30$  Ка/м, для



двух концентрации МЖ по формуле)  $\cong 0.04$  Ати. В таком уплотнении МЖ защищена кромкой манжеты и пыльником от воздействий внешней среды.

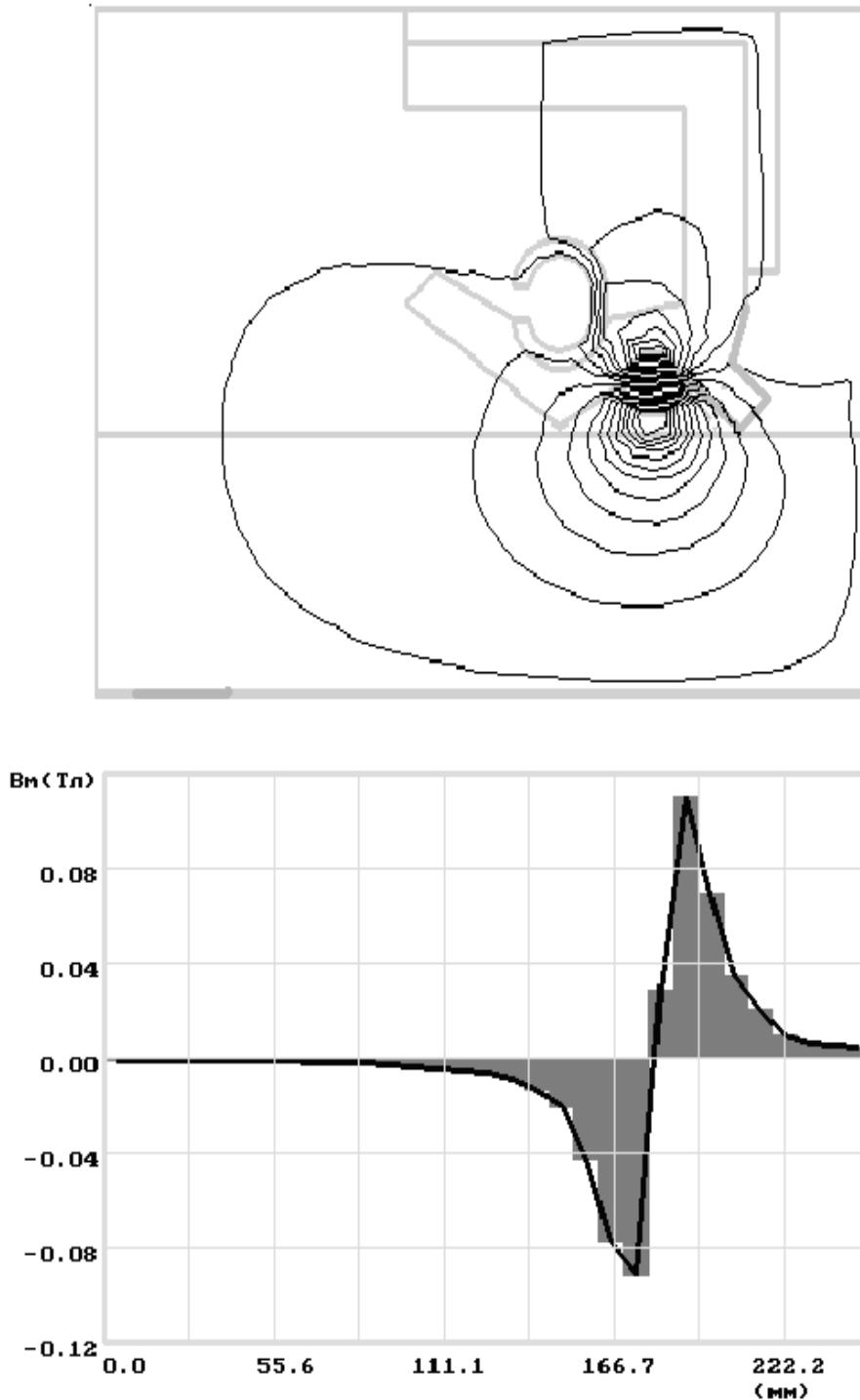


Рис. 3.8. Картина магнитного поля и кривая распределения индукции по поверхности вала

При радиальной намагниченности магнита (рис. 3.9) максимальная индукция в рабочем зазоре достигает 0.18 Тл. Для этого случая  $\Delta P$  составляет  $\cong 0.06$  Ати (при  $M_c=30$  Ка/м). При достаточном количестве МЖ, она заполняет пространство между кромкой, пыльником и валом постоянно присутствуя в областях трения.

Магнитная сила, удерживающая МЖ в рабочем зазоре для конструкции с осевой намагниченностью будет меньше, чем для системы с радиальной намагниченностью, т.е. во втором случае МЖ в рабочей области будет удерживаться более надежно.

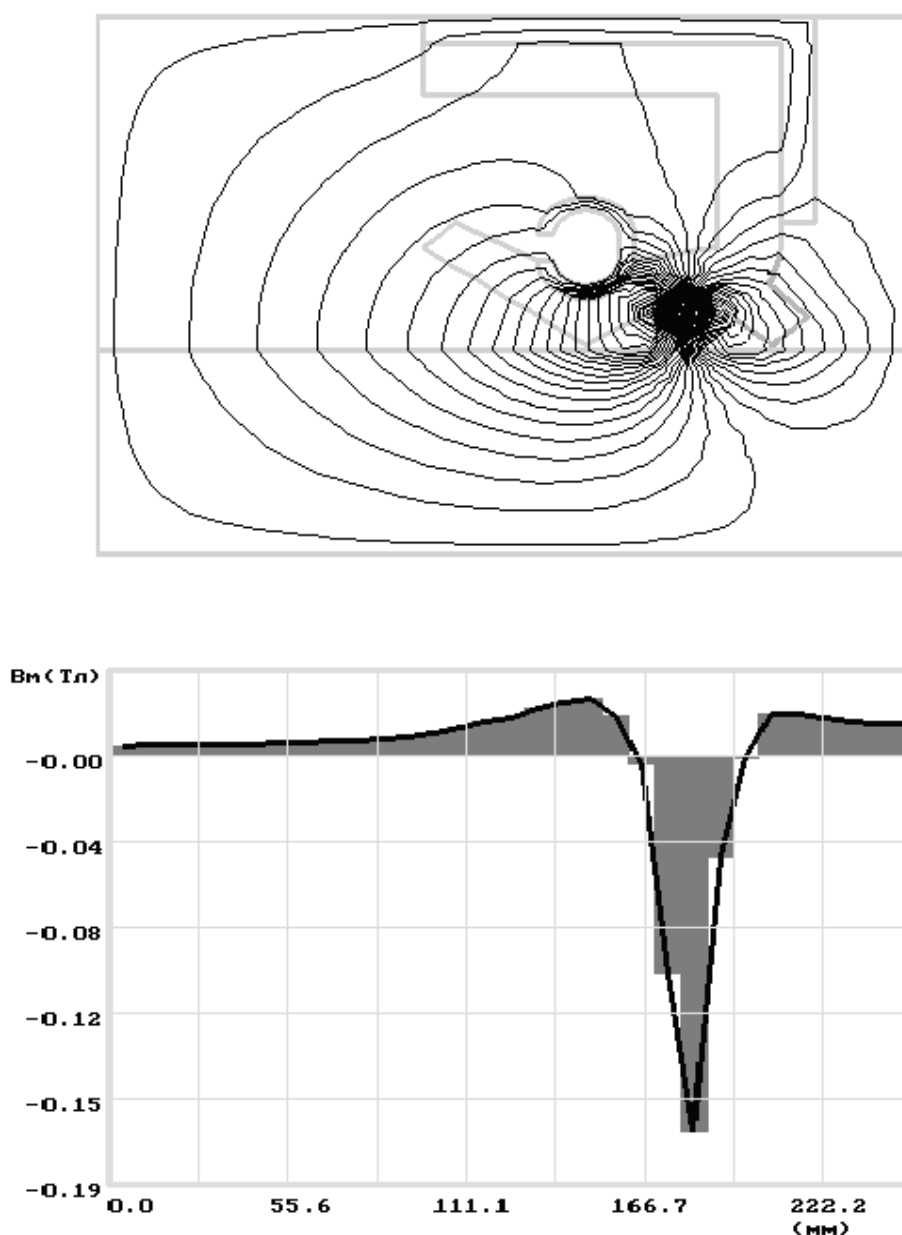


Рис. 3.9. Картина магнитного поля и кривая распределения индукции по поверхности вала

На рис. 3.10 представлены результаты магнитного расчета уплотнительного узла, состоящего из однозубцового уплотнительного узла и двух манжет (рис. 1.9). Поскольку уплотнение симметрично, расчет проводился для его части. Как видно из рис. 3.10, максимальное значение индукции, порядка 0.27 Тл соответствует области под зубцом магнитного уплотнения. Под кромкой манжеты величина индукции составляет 0.01 Тл. Магнитной силы, обусловленной таким значением индукции недостаточно для удержания МЖ в области трения, поэтому МЖ не оказывает смазочного действия.

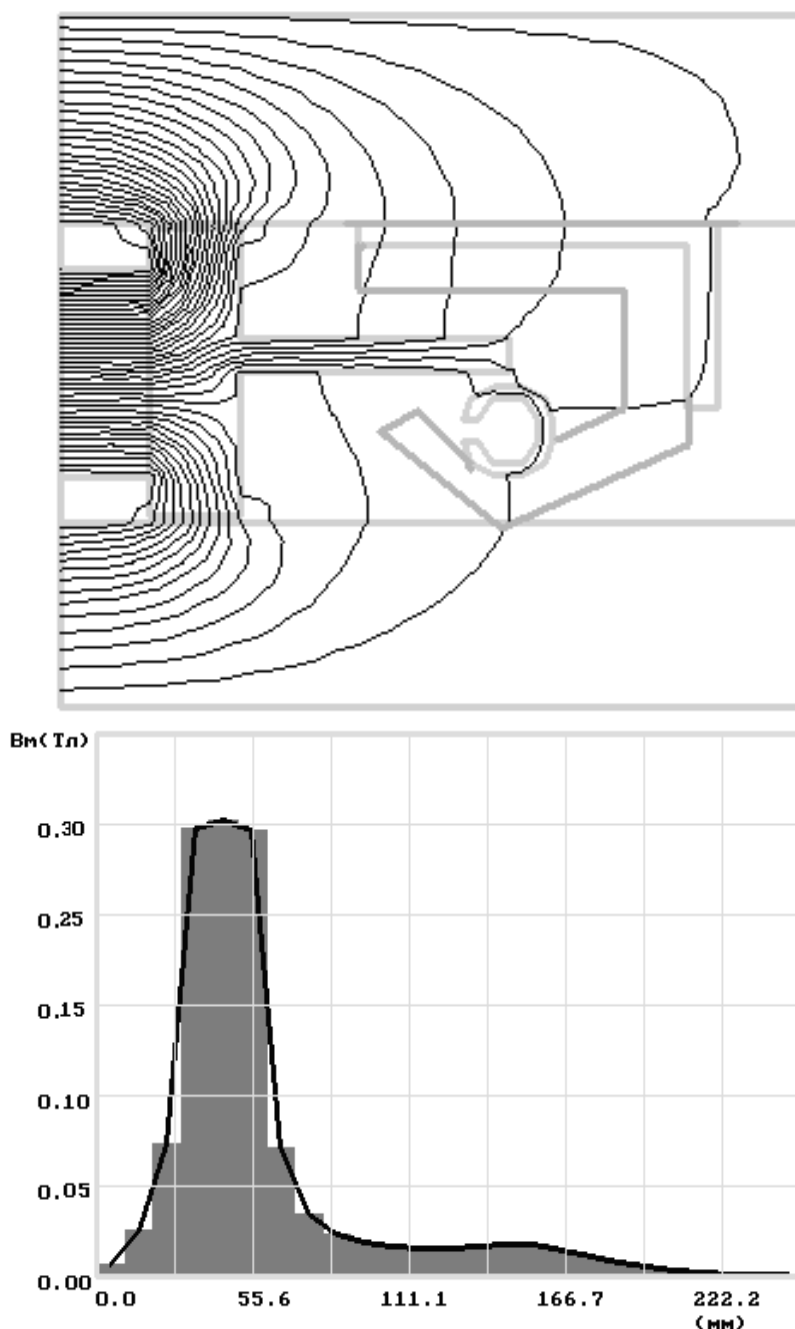


Рис. 3.10. Картина магнитного поля и кривая распределения индукции по поверхности вала

При анализе результатов магнитного расчета комбинированных магнито-жидкостных уплотнений установлено, что магнитные системы, состоящие из магнитов помещенных между внешней кромкой манжеты и пружины, намагниченной пружины, а так же помещенным между кромкой и пыльником намагниченным в осевом направлении магнитным элементом (рис. 3.3, 3.7, 3.8) не обеспечивают достаточной величины магнитной индукции в рабочем зазоре уплотнения.

В уплотнении с намагниченными в осевом направлении постоянными магнитами, установленными по обе стороны от рабочей кромки манжеты, распределение магнитного поля таково, что МЖ концентрируется за пределами рабочей зоны.

Применение магнитов с радиальной намагниченностью позволяет добиться концентрации МЖ в области трения и создать магнитожидкостные пробки, защищающие рабочую зону от загрязнения. Источники магнитного поля в этой конструкции не выступают за габариты уплотнения, поэтому оно может быть установлено взамен традиционного без внесения изменений в конструкцию уплотняемого узла.

Установка радиально намагниченного магнита на валу под кромкой манжеты так же позволяет добиться достаточного значения магнитной индукции и обеспечить концентрацию МЖ в рабочей области. Недостатком конструкции данного уплотнения является необходимость замены ранее установленной манжеты, на уплотнение, имеющее больший внутренний диаметр, соответствующий наружному диаметру постоянного магнита, что не всегда возможно. При установке на вал постоянного магнита необходимо обеспечить соответствующее значение эксцентриситета, поскольку при его повышенном значении рабочие характеристики как манжеты, так и магнитной ступени уплотнения резко ухудшаются [1, 21].

Уплотнительный узел, состоящий из двух манжет и однозубцового уплотнения, имеет магнитную систему, обеспечивающую достаточное значение индукции в магнитной ступени уплотнения, но исключает применение МЖ для смазки рабочих кромок манжет. Для установки этого уплотнительного комплекса необходимо пространство размещения дополнительной манжеты и однозубцового МЖУ, т.е. применение этого комплекса ограничено габаритами посадочного места уплотняемого узла.

Установка радиально намагниченного магнита между пыльником и губкой манжеты обеспечивает приемлемое значение индукции (порядка 0.18Тл) в рабочем зазоре уплотнения, достаточное для удержания МЖ. Магнитный элемент не выходит за габариты манжеты. Такое уплотнение может быть установлено взамен традиционного практически в любое устройство.

Таким образом, это уплотнение имеет наиболее рациональную конструкцию магнитной системы.

### 3.3. Исследование влияния магнитных материалов на магнитные характеристики комбинированных уплотнений

В комбинированных магнитожидкостных уплотнениях могут использоваться магниты, изготовленные из различных материалов и обладающие различными свойствами.

Постоянные магниты принято разделять на две группы [42, 43]. Первую группу составляют магниты, которые полностью восстанавливают магнитный поток после отделения от арматуры. Такие магниты называют «закритическими».

Во вторую группу водят магниты значительно снижающие магнитный с поток после извлечения из арматуры. Эти магниты называются «докритическими».

«Докритические» магниты имеют низкое значение коэрцитивной силы. При разборке уплотнения, смещении магнита или изменении магнитопроводящих свойств арматуры происходит снижение остаточной намагниченности. В результате этого происходит уменьшение магнитного потока, и как следствие – снижение величины магнитной индукции в рабочей области уплотнения.

«Закритические» магниты имеют высокое значение коэрцитивной силы. При разборке и ударах, вибрациях и других внешних воздействиях они сохраняют свои магнитные свойства [114, 118-122, 123, 124], что гарантирует сохранение постоянной индукции в рабочем зазоре. К этой группе магнитов относятся: самарий – кобальтовые магниты: КС – 37 [42, 114] и КС – 25 [44, 114], феррит-бариевые магниты: 16БА300, 16БА190, 25БА170, феррит-стронциевые магниты: 24СА200, 27СА220, [42, 114].

Магнитные характеристики некоторых постоянных магнитов приведены в табл. 3.1 (по данным [42, 44, 45, 106, 126]). Наиболее перспективным является применение в КМЖУ редкоземельных магнитов, поскольку они имеют наилучшие магнитные характеристики [114, 127-129]

Кроме монолитных постоянных магнитов источниками магнитного поля в КМЖУ могут являться магнитоэластомеры. Они представляют собой эластомерную основу, содержащую в себе мелкодисперсную фазу магнитного материала. Примером магнитоэласт может послужить РМ – 37, изготовленный из резины и содержащий самарий – кобальтовый магнитный наполнитель. Достоинством магнитоэластомеров является возможность придания изготовленных из них изделиям практически любой конфигурации.

**Разработка комбинированных магнитожидкостных уплотнений  
пожарной техники и исследование их триботехнических характеристик**

*Таблица 3.1. Магнитные характеристики постоянных магнитов*

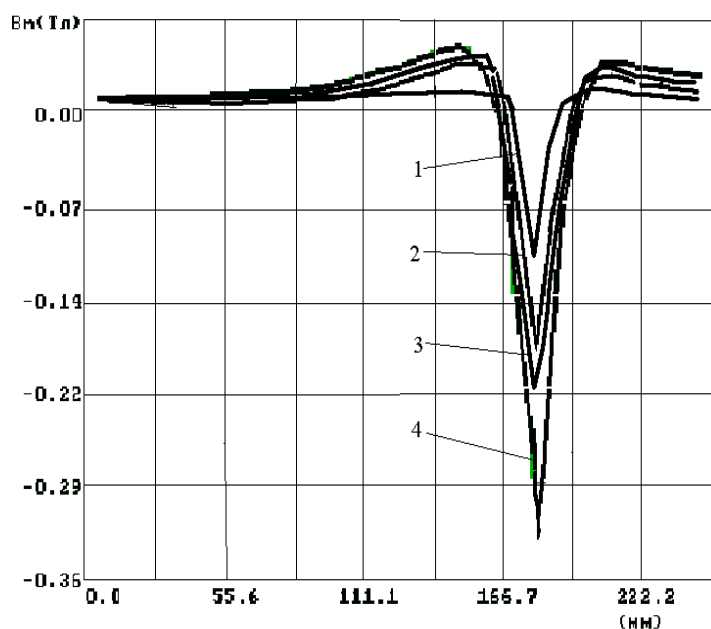
Материал постоянных магнитов	Марка магнитов	Магнитные свойства			
		Максимальная удельная энергия $W_{max, \rho}$ кДж/м	Коэрцитивная сила по намагниченности $H_{cm}$ кА/м	Коэрцитивная сила по индукции $H_{cb}$ кА/м	Остаточная индукция $B_r$ Тл
Самарий – кобальтовые магниты	КС-37	55	1300	540	0.77
	КС-25-1	60	1273	541	0.78
	КС-25-2	72	1273	589	0.85
	КС-25-3	84	1273	637	0.92
Ферритобориевые	6БИ2400	3	240	125	0.19
	22БА220	11	220	215	0.36
	16БА190	8	190	185	0.3
	25БА170	12.5	170	165	0.38
ферритостронциевые	24СА200	12	200	195	0.37
	24СА220	13.5	220	215	0.38

Для анализа влияния постоянных магнитов на характеристики КМЖУ были выбраны магниты: КС – 37; 6БИ240; 24СА200; РМ – 3.

Магнитный расчет проводился с использованием МКЭ на примере конструкции комбинированного манжетного магнитожидкостного уплотнения с установленным между кромкой манжеты и пыльник радиально намагниченным магнитным элементом. Как отмечалось в главе 1, такое уплотнение имеет наиболее рациональную конфигурацию магнитной системы. При расчетах принимались магнитные характеристики магнитопроводящих элементов конструкции (вал, пружина, арматура манжеты) аналогично главе 1. В результате расчетов были получены кривые распределения магнитной индукции в рабочей области уплотнения (рис. 3.11).

Наименьшее значение магнитной индукции в рабочей области уплотнения, порядка 0.1Тл, соответствует феррит – бариевому магниту 6БИ240, наибольшее – порядка 0.33Тл – самарий – кобальтовому магниту КС – 37. Применение магнитоэласта РМ – 37 с самарий – кобальтовым наполнителем позволяет получить магнитную индукцию порядка 0.22Тл. Такое уменьшение величины индукции, по сравнению с монолитным самарий – кобальтовым магнитом связано с ограниченным содержанием в магнитоэласте магнитной фазы, кото-

рая заполняет лишь часть его объема. Для феррит – стронциевого магнита индукция составляет порядка 0.18Тл. Таким образом самарий – кобальтовый магнит позволяет обеспечить наибольшую величину магнитной индукции. Однако, существует ряд причин, ограничивающих применение в КМЖУ самарий – кобальтовых магнитов. Так, этот материал крайне трудно поддается механической обработке, ему присущи повышенная хрупкость и твердость. Изготовить из него необходимый для уплотнения кольцеобразный магнит достаточно сложно. Этот недостаток так же присущ феррит – стронциевым и феррит – бариевым магнитам. Поэтому наиболее подходящим для данной конструкции источником магнитного поля является магнитоэласт РМЗ, обеспечивающий приемлемую величину магнитной индукции и достаточно хорошо поддающийся механической обработке.



**Рис. 3.11.** Распределение магнитной индукции в рабочем зазоре уплотнения при использовании различных магнитов. 1 – 6БИ244, 2 – 24СА200, 3 – РМ – 3, 4 – КС – 37

Кроме постоянных магнитов на величину магнитной индукции в рабочем зазоре существенное влияние могут оказывать материалы магнитопроводящих частей уплотнения и вала. Уплотнительные устройства применяются для герметизации различных узлов и агрегатов, имеющих валы, изготовленные из сталей различных марок, которые могут значительно отличаться по своим магнитным свойствам. Поэтому, материал вала может оказывать значительное влияние на величину магнитной индукции в рабочей области уплотнения.

Основной характеристикой определяющей свойства стали является кривая намагничивания, представляющая собой зависимость магнитной индукции в стали от напряженности магнитного поля  $B=f(H)$ . На характеристике принято выделять два основных участка. На начальном участке происходит пропорциональный рост индукции при увеличении напряженности магнитного поля. Да-

## Разработка комбинированных магнитожидкостных уплотнений пожарной техники и исследование их триботехнических характеристик

лее, с ростом напряженности возрастание индукции замедляется. Такое состояние, при котором не происходит увеличения индукции при возрастании напряженности магнитного поля называют магнитным насыщением стали. При насыщении резко снижается магнитная проницаемость стали, которая определяется как  $G_m = H/B$ . Следствием насыщения стали является снижение результирующего магнитного потока, а значит и индукции в рабочей области уплотнения [21, 114]. Насыщение стали оценивается по величине индукции насыщения.

В зависимости от легирующих добавок по магнитным свойствам стали можно разделить на электротехнические и конструкционные.

Электротехнические стали в качестве основной легирующей добавки имеют кремний. Такие стали имеют низкие потери на перемагничивание, высокую намагниченность насыщения [134-136]. Они, в основном, используются для изготовления магнитопроводов электромагнитных устройств и электрических машин. Для изготовления валов эти стали не пригодны из-за низких прочностных характеристик.

Для изготовления валов чаще всего применяются стали с высоким содержанием углерода – сталь 20, сталь 40; хрома – 30ХГСХА, которые обладают высокими механическими показателями [91, 114, 137, 138]. Магнитная проницаемость у таких сталей значительно ниже чем у электротехнических и имеет различные значения для разных марок сталей. В табл. 3.2 приведены магнитные характеристики для некоторых конструкционных материалов [40, 41, 114]. Валы уплотняемых устройств так же могут быть изготовлены из таких материалов, как легкие сплавы, бронза, полимеры, магнитная проницаемость которых приближается к магнитной проницаемости вакуума.

Таблица 3.2. Значение индукции насыщения магнитопроводящих материалов

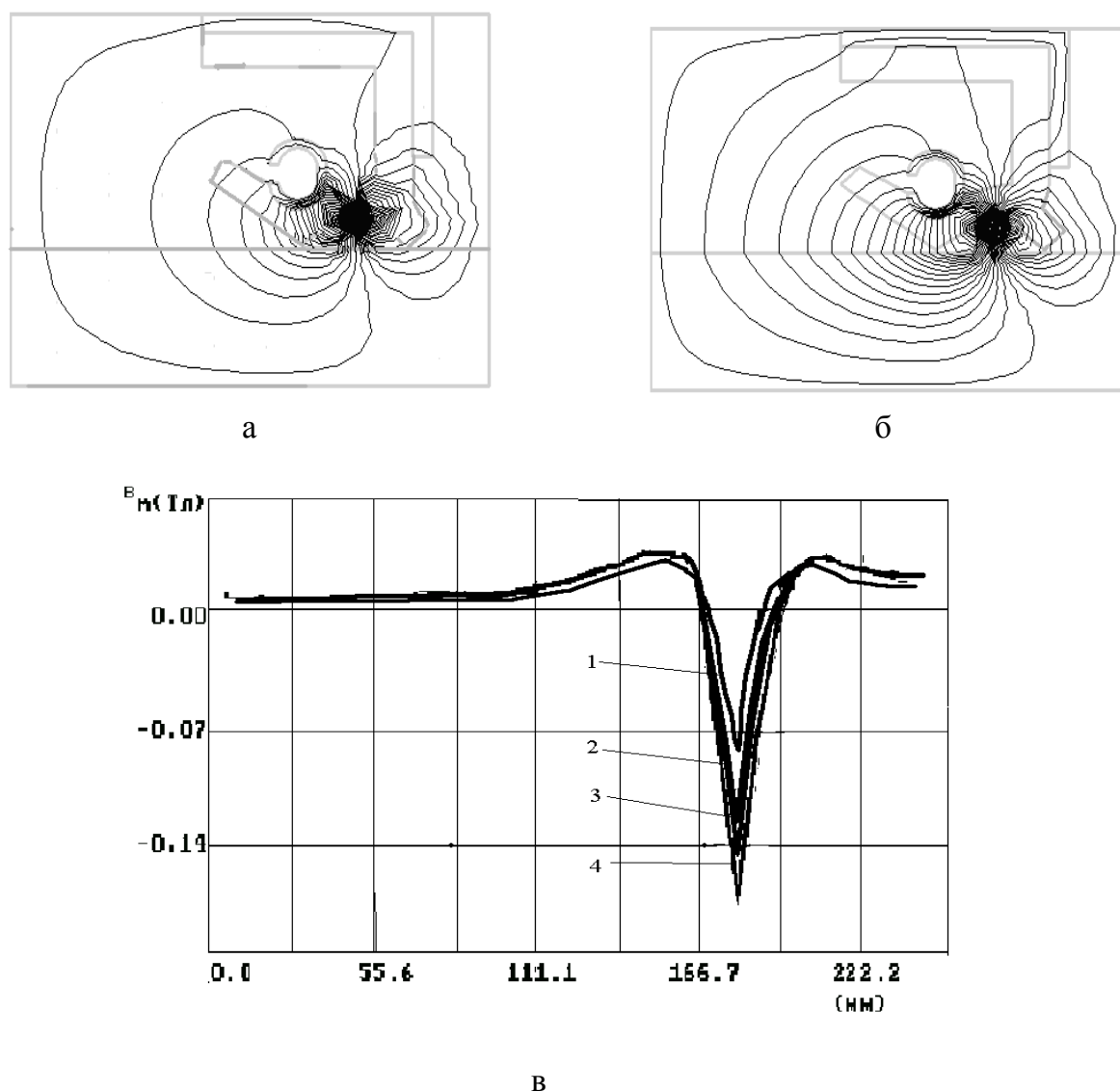
Марка стали	Индукция насыщения $B_s$ , Тл	Значение напряженности магнитного поля при котором наступает насыщение $H_s$ , кА/м
Ст.3	2.12	40
Сталь10	2.1	50
Сталь20	2.17	50
Сталь30	2.1	50
Сталь30ХГСХА	1.97	50
Сталь20Х	2.11	50
Сталь40Х	2.01	50
Чугун СЧ18-36	1.48	50

Для анализа влияния материала вала на распределение индукции в рабочей области были выбраны сталь 20, сталь 40, 30ХГСХА. Расчеты также проводились для конструкции с немагнитным валом. В качестве расчетной модели



было выбрано уплотнение с магнитным элементом, установленным между кромкой и пыльником манжеты. Расчеты проводились для феррит-стронциевых магнитов и материалов арматуры и пружины.

На рис. 3.12 представлены кривые распределения магнитной индукции в рабочей области уплотнения. Наименьшее значение индукции – порядка 0.07 Тл получено для конструкции с немагнитным валом, максимальное – порядка 0.2 Тл для стали 20. Для стали 40 и 30ХГСХА величины индукций составляют 0.185-0.195 Тл. Такое незначительное отличие величин индукции для сталей обусловлено отсутствием их насыщения.



**Рис. 3.12.** Картины магнитного поля в уплотнении: а – с магнитопроводящим валом, б – с немагнитным валом; в – кривые распределения магнитной индукции по поверхности вала: 1 – немагнитный вал, 2 – сталь 30ХГСХА, 3 – сталь 40, 4 – сталь 20

Уменьшение индукции в конструкции с немагнитным валом связано с изменением магнитной проницаемости вала. В том случае когда вал выполнен из магнитного материала он имеет значительно большую по сравнению с окружающим пространством магнитную проницаемость. Основной магнитный поток протекая по пути наименьшего сопротивления пересекает рабочий зазор, проходит через вал и замыкается через окружающее пространство. Если вал выполнен из немагнитного материала, его магнитная проводимость приближается к проводимости окружающей уплотнение среды. Поэтому основной магнитный поток минуя рабочий зазор замыкается через воздух в непосредственной близости от источника магнитного поля (рис. 3.12 а).

Таким образом, если вал выполнен из магнитного материала величина магнитной индукции в рабочей области уплотнения практически не зависит от марки стали. В конструкции с немагнитным валом происходит значительное уменьшение величины индукции. Поэтому в таких конструкциях что бы обеспечить достаточное значение индукции необходимо в качестве источника магнитного поля применять магниты с большей намагниченностью.

### **3.4. Расчет магнитного поля в подшипнике качения**

Существует ряд конструкций комбинированных уплотнительных устройств рис. 1.10–1.11 (глава 1), в которых магнитожидкостное уплотнение объединено в отдельный узел с подшипниками. Магнитный расчет одного из таких узлов показал, что магнитный поток замыкается через магнитную систему магнитожидкостного уплотнения и обеспечивает его надежную работу.

Кроме вышеуказанной, существуют конструкции, в которых магнитный поток замыкается через тела качения подшипников (см. главу 1.1).

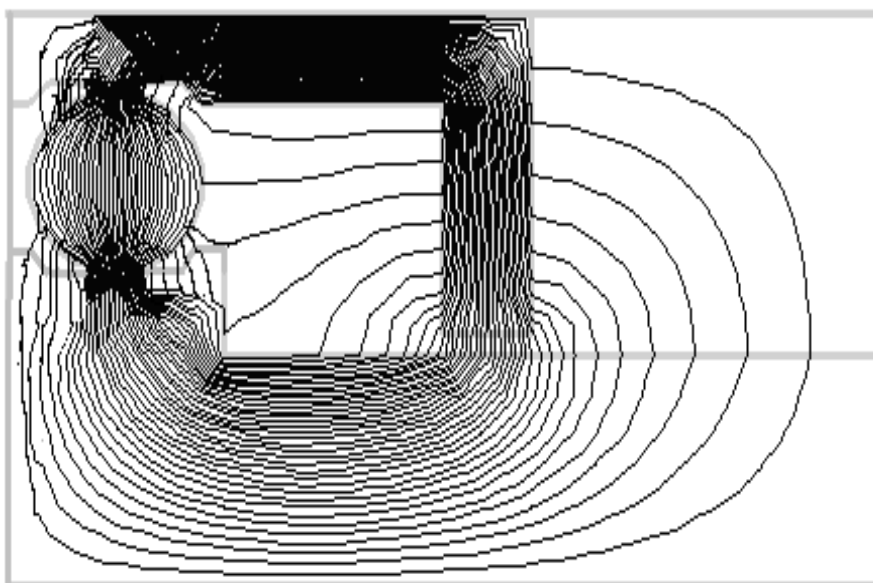
Наиболее часто магнитное поле в области тел качения создается постоянным магнитом, являющийся частью магнитожидкостного уплотнения. При этом, в области тел качения подшипника находится магнитная жидкость, которая либо помещается туда специально, либо притягивается магнитным полем из области рабочего зазора МЖУ. Предполагается, что магнитная жидкость, удерживаемая магнитными силами во внутренней области подшипника качения, будет обеспечивать надежное смазывание тел качения.

Можно предположить, что на свойства МЖ в области трения подшипника будут оказывать влияние параметры магнитного поля.

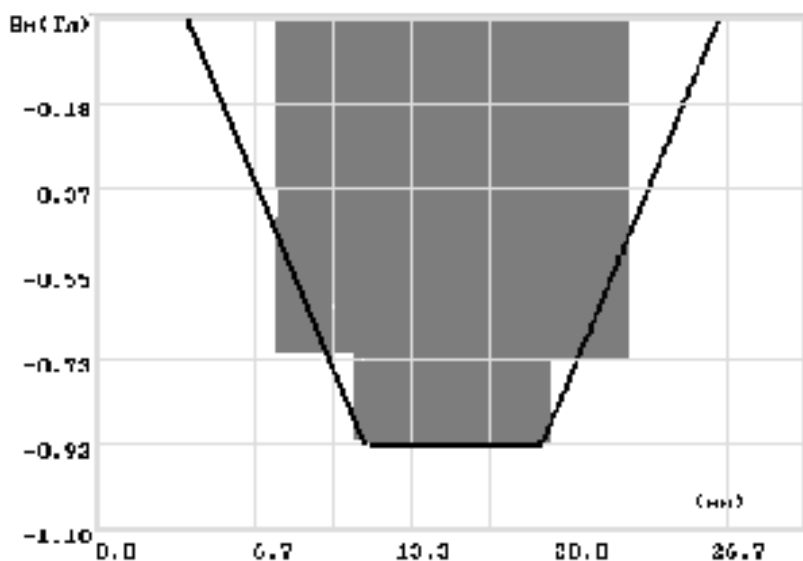
Расчет распределения магнитного поля в области контакта шариков и обоймы подшипника проводился с применением системы МКЭ на примере одноступенчатого магнитожидкостного уплотнения, объединенного с подшипником качения. Принималось, что в качестве источника магнитного используется феррит – бариевый магнит, обоймы и шарики подшипника изготовлены из стали

ШХ15, полюсная приставка магнитожидкостного уплотнения изготовлена из стали ст3, вал из стали 45.

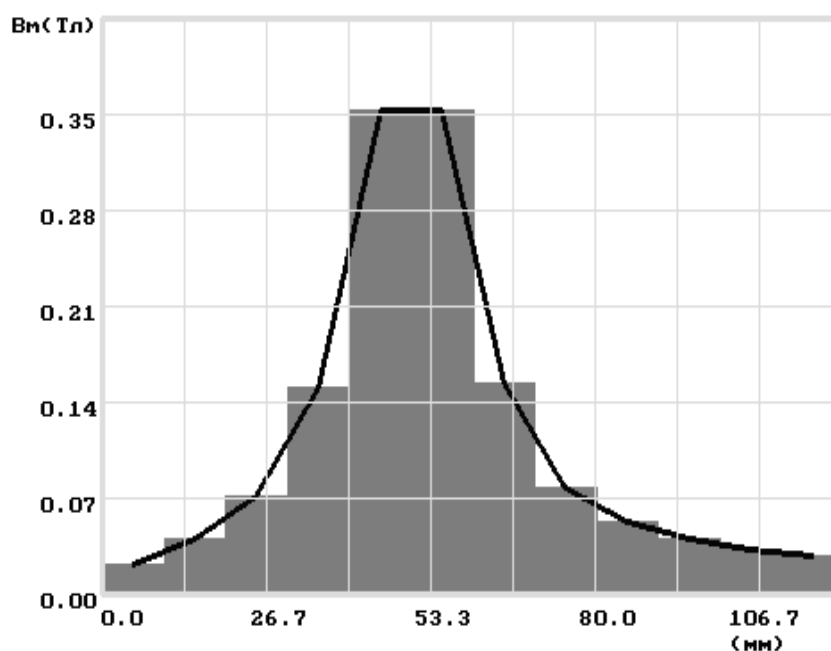
Полученные в результате картина магнитного поля (рис 3.13) и кривая распределения магнитной индукции по внутренней поверхности обоймы подшипника (рис. 3.13 в) показывают, что при наложении магнитного поля в этой области подшипника возникает градиент магнитного поля, направленный в точку соприкосновения шариков и обоймы. При этом, величина магнитной индукции в точке касания составляет порядка 0.7 Тл, при величине индукции в рабочем зазоре уплотнения порядка 0.17 Тл (рис. 3.13 б).



а



б



в



г

**Рис. 3.13.** К расчету магнитного поля в подшипнике качения:  
а – картина магнитного поля,  
б, в – распределение магнитной индукции на вершине тела качения и в рабочем зазоре,  
г – положение магнитного шунта

Такое значительное увеличение индукции на вершине шарика обусловлено малостью зазора между телом качения и обоймой подшипника.

Негативным последствием возникновения областей с такими значительными величинами индукции может являться расслоение в них магнитной жидкости на жидкость – носитель и магнитную фазу. В данном случае магнитный материал из магнитной жидкости будет откладываться на обойме подшипника по пути качения шарика. С течением времени напрессовывание магнитного материала на обойме может привести к уменьшению тепловых зазоров между обоймой и шариками и стать причиной заклинивания подшипника и выхода из строя опорного узла агрегата. Поэтому в случаях, когда невозможно исключить попадание МЖ в область тел качения подшипника, необходимо производить расчет магнитного поля.

При применении для смазки подшипников магнитной жидкости целесообразно выбирать минимально возможную величину магнитной индукции, обеспечивающую лишь удержание МЖ в рабочей области.

Для этого можно использовать магнитный шунт (рис. 3.13 г) помещаемый между магнитом и подшипником, или использовать уплотнение, имеющее две полюсных приставки.. Изменяя зазор между шунтом и валом можно добиться необходимого значения индукции в области тел качения подшипника, либо вообще исключить протекание магнитного потока через шарики подшипника.

### **3.5. Исследование влияния микроградиентов магнитного поля на процесс трения в присутствии магнитной жидкости при наложении магнитного поля**

Известно, что при различных способах обработки на поверхности образуются микронеровности, представляющие собой ряд пиков и впадин. Высота выступов микронеровностей характеризует чистоту обработки поверхности. С целью уменьшения шероховатости поверхности при обработке деталей применяются такие операции, как шлифование и полирование. При обработке деталей точением высота пиков микронеровностей Rz обычно составляет 40 мкм. Шлифованием поверхности абразивным кругом возможно добиться Rz порядка 10 - 20 мкм. Полирование поверхности войлочным кругом с применением пасты ГОИ может обеспечить высоту микронеровностей порядка 5–10 мкм.

Как отмечалось в главе 2 чистота обработки поверхности оказывает значительное влияние на процесс трения в паре эластомер–металл, и в частности на трение резиновой губки манжеты и вала.

Чтобы уменьшить износ рабочей кромки манжеты и снизить момент трения, вал в месте касания с кромкой манжеты шлифуется или полируется. Однако, операции шлифования и полирования являются достаточно дорогостоящими. Поэтому необходимо стремиться исключить их из технологического процесса и в то же время обеспечить приемлемые рабочие характеристики уплотнения.

Кроме повышения чистоты обработки вала для снижения момента трения и износа в область трения губки манжеты с валом подаются смазочные вещества. В традиционных уплотнениях применяются жидкие или консистентные смазки, в комбинированных уплотнениях – магнитные жидкости.

При применении в качестве смазки магнитной жидкости в области трения необходимо создать магнитное поле. В этом случае микронеровности вала могут выступить как концентраторы магнитных силовых линий. Это приводит к возникновению локальных зон концентрации частиц. Как показывают исследования [114] перераспределение магнитной индукции на уровне микронеровно-

стей практически не оказывает влияния на распределение магнитного поля в рабочем зазоре МЖГ и не влияет на его работоспособность. (Обычно МЖГ изготавливаются по второму классу точности и 7 классу чистоты  $R_z=3-5$  мкм). Однако, в МЖГ отсутствуют трущиеся части а рабочий зазор полностью заполнен магнитной жидкостью, что в значительной степени отличает его от комбинированного уплотнения. Вполне вероятно, что перераспределение частиц дисперсной фазы будет оказывать влияние на процесс трения.

Что бы представить картину перераспределения частиц на поверхности твердого тела необходимо учесть ряд факторов:

1. Распределение магнитной индукции на поверхности твердого тела при различной высоте микронеровностей,
2. Намагниченность частиц магнитной жидкости,
3. Конфигурацию частиц магнитной жидкости.

Трудности экспериментального определения картины магнитного поля на уровне микронеровностей обусловлены прежде всего малыми размерами объекта исследований. Произвести измерения величин магнитной индукции традиционно применяющимися для этих целей приборами не представляется возможным. Поэтому, наиболее рациональным является расчет распределения магнитного поля с применением метода конечных элементов.

Расчеты магнитного поля проводились для трех областей соответствующим различным обработкам поверхности металла.

Построение областей производилось следующим образом.

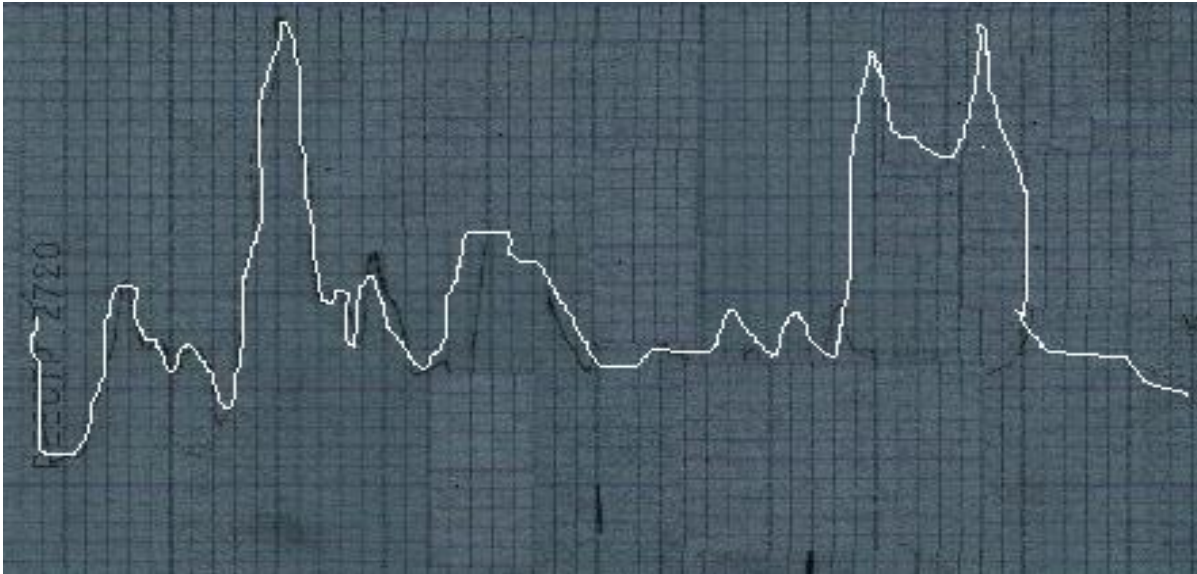
Первоначально были изготовлены три образца поверхности которых обрабатывались шлифованием на абразивном круге, точением и полированием на войлочном круге с пастой ГОИ Профили поверхностей были записаны на профилемере – профилографе (рис. 3.14).

Высота микронеровностей  $R_z$ , составила 8.5 мкм, 2.6 мкм, 0.6 мкм для шлифованной, проточенной и полированной поверхностей соответственно. Из каждой записи был выбран участок длиной 5 мм, что соответствует 0.25 мм длины поверхности. Координаты точек на этих и были приняты за основу при построении расчетных областей.

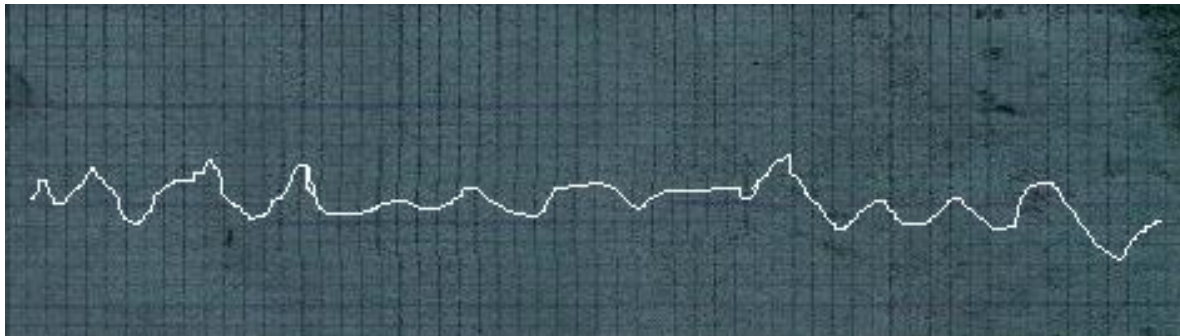
В результате расчетов были получены картины магнитного поля и кривые распределения магнитной индукции для всех областей рис. 3.15–3.17. Как видно из рисунков, уже на удалении порядка 3–4  $R_z$  от поверхности магнитное поле распределяется равномерно.

Наиболее сильно перераспределение магнитного поля проявляется на поверхности имеющей наибольшую высоту микронеровностей (рис. 3.15).

Перераспределение индукции так же имеет место на проточенной поверхности хотя выражено слабее чем на поверхности обработанной шлифованием (рис. 3.16). В расчетной области соответствующей полированию магнитная индукция на поверхности распределена практически так же, как и на максимальном удалении от нее (рис. 3.17).



а



б



в

**Рис. 3.14.** Профили твердой поверхности различной шероховатости:  
а –  $Rz=8.5$  мкм, б –  $Rz= 2.6$  мкм, в –  $Rz=0.6$  мкм

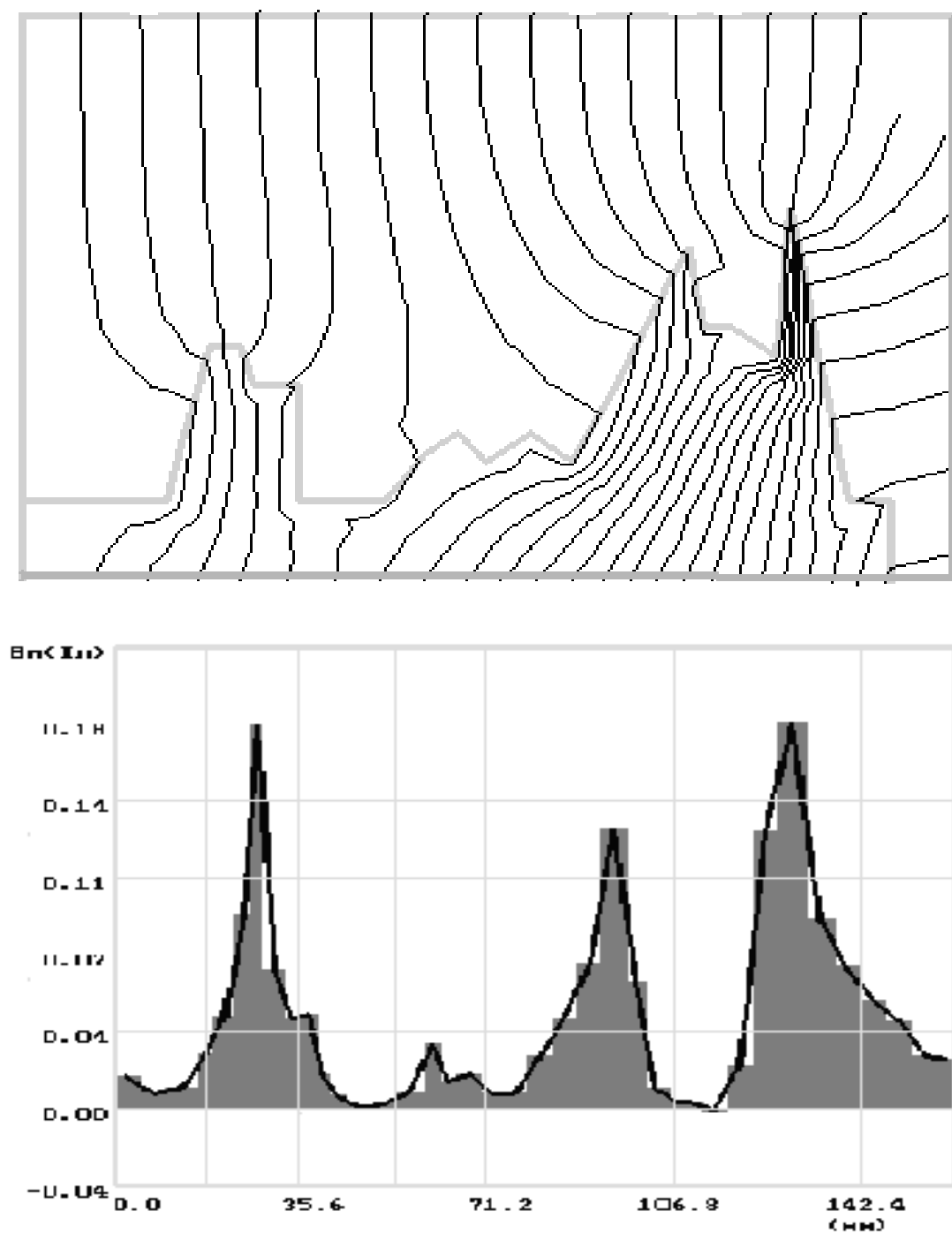
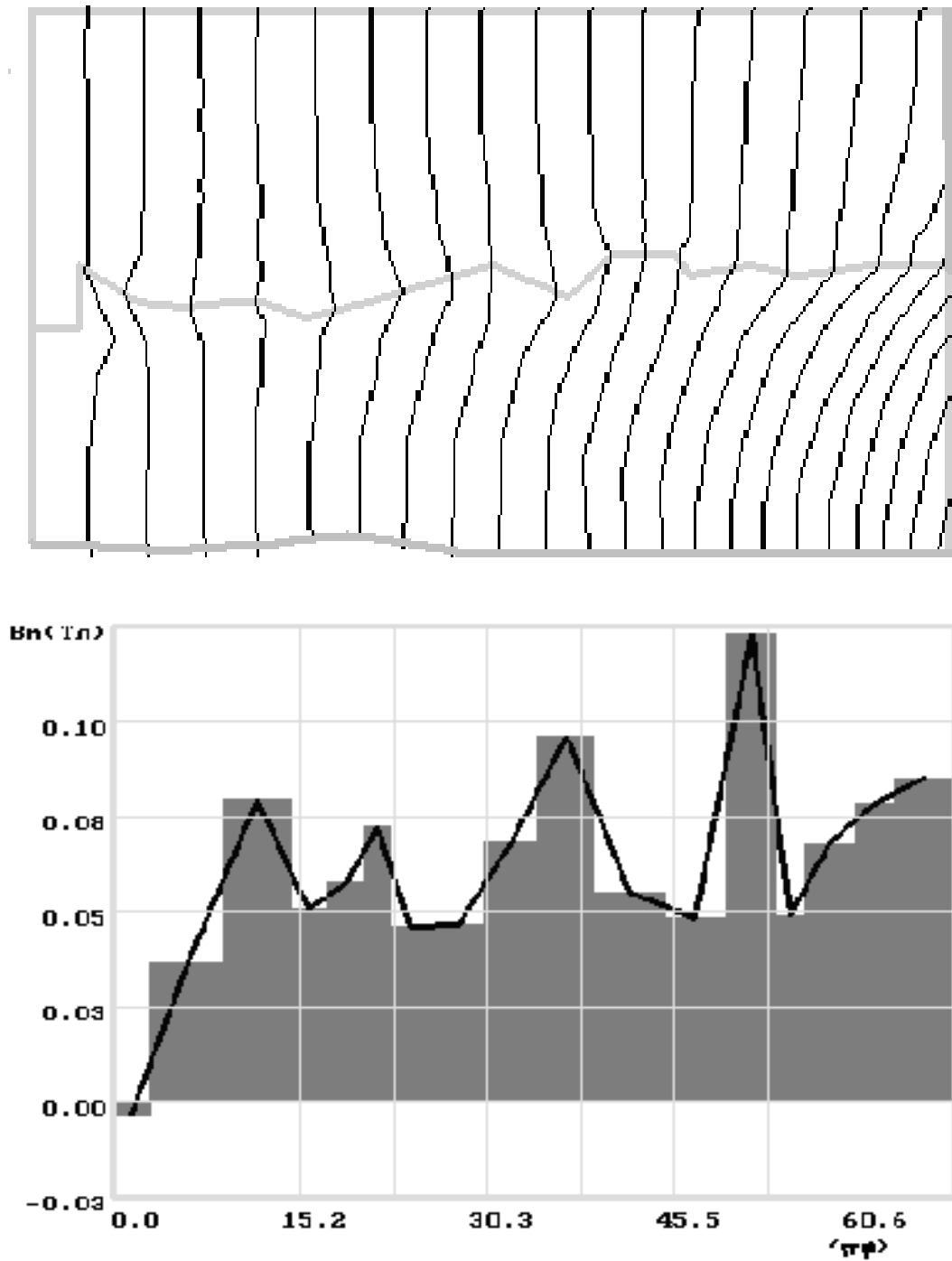
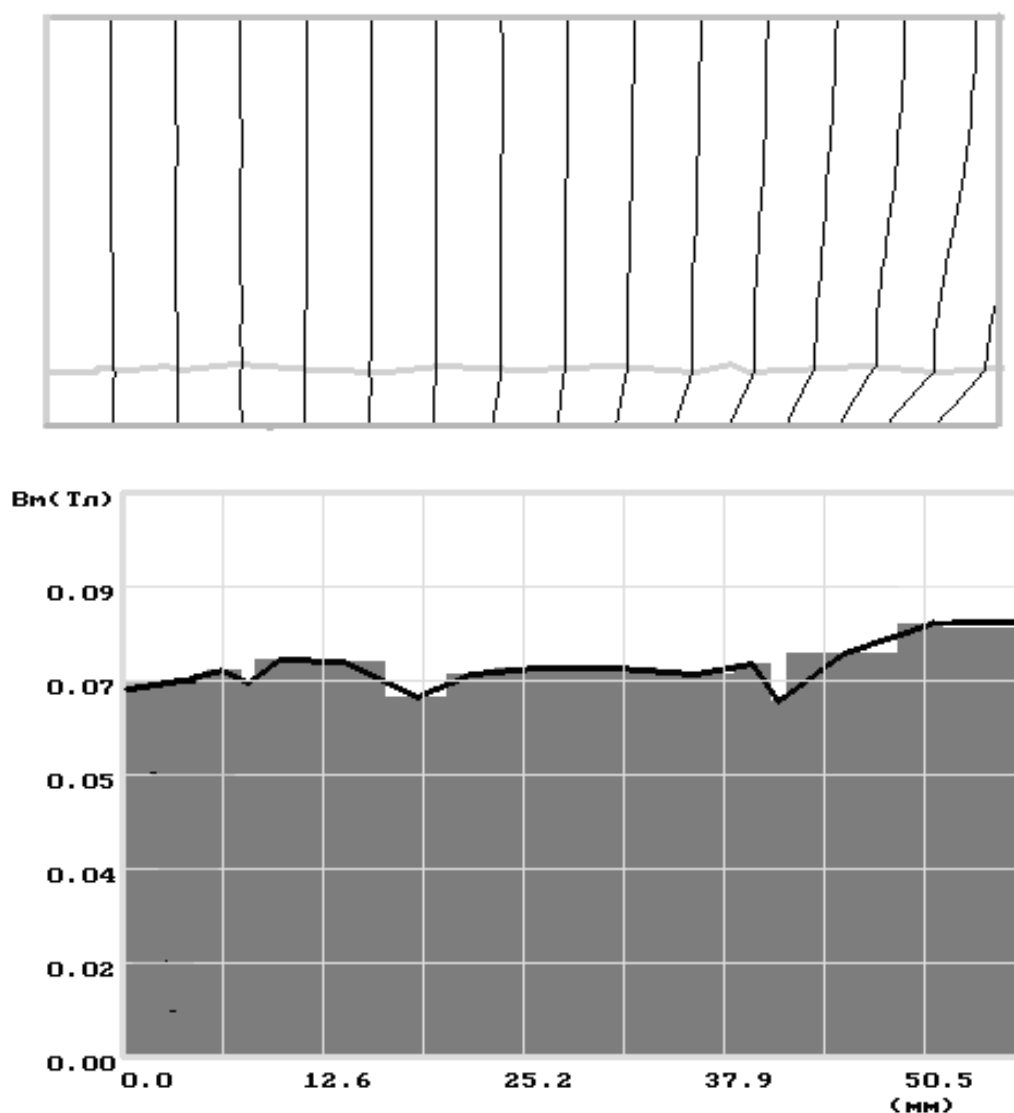


Рис. 3.15. Картина магнитного поля и кривая распределения магнитной индукции на поверхности с  $Rz=8.5$  мкм





**Рис. 3.16.** Картина магнитного поля и кривая распределения магнитной индукции на поверхности с  $Rz=2.6$  мкм



**Рис. 3.17.** Картина магнитного поля и кривая распределения магнитной индукции на поверхности с  $Rz=0.6$  мкм

Следствием концентрации линий магнитного поля у вершин микронеровностей является возникновение магнитной силы, действующей на частицы наполнителя, которая определяется следующим образом [5]:

$$\bar{F} = \mu_0 \bar{M} \nabla \bar{H},$$

где  $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$  (Гн/м)- магнитная постоянная,  $\bar{M}$  – намагниченность насыщения магнитного материала магнитной жидкости (А/м),  $\nabla \bar{H}$  – градиент напряженности магнитного поля (А/м<sup>2</sup>). В первом приближении возможно заменить градиент  $\bar{H}$  разностью максимальной индукции на вершине микронеровности

$H_{\max}$  и минимальной во впадине  $H_{\min}$ . Вектор магнитной силы направлен в область вершины микронеровности.

Наибольшее значение магнитной силы будет соответствовать наиболее грубо обработанной поверхности, поскольку в этом случае разность напряженностей поля на вершинах и во впадинах максимальна. Кроме характеристик магнитного поля на величину магнитной силы оказывает влияние намагниченность самих частиц. Так, поскольку намагниченность магнетита меньше чем у карбонильного железа магнитная сила, действующая на частицы магнетита, при тех же параметрах магнитного поля, будет меньше чем сила, действующая на частицы карбонильного железа.

В зависимости от характеристик магнитного поля возможно несколько вариантов распределения частиц на поверхности твердого тела. Значительное влияние на распределение частиц так же может оказывать их конфигурация. Частицы магнитного наполнителя могут иметь шаровидную и игольчатую структуру [21].

На полированной поверхности практически отсутствуют микроградиенты поля, поэтому, частицы на такой поверхности будут распределяться равномерно. Это относится как к шарообразным, так и игольчатым частицам (рис. 3.18 а, б). Отличием распределения частиц, связанным с их конфигурацией, будет их ориентация в магнитном поле. Частицы, имеющие игольчатое строение, будут выстраиваться вдоль линий магнитного поля, располагаясь под прямым углом к поверхности (рис. 3. 18 б). Такая ориентация частиц связана с различием магнитной проницаемости по продольной оси и в поперечном направлении. Для шаровидной частицы магнитная проницаемость во всех направлениях одинакова.

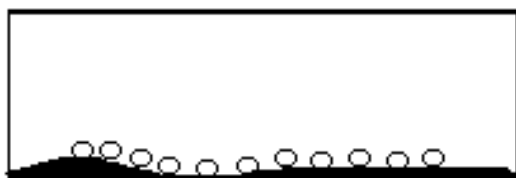
На более грубо обработанных поверхностях распределение частиц будет иметь иной характер. В условиях наличия микроградиентов частицы будут стремиться занять положение у вершин микронеровностей. Здесь возможно два варианта распределения частиц.

При малой неоднородности магнитного поля частицы будут окружать вершины микронеровностей (рис. 3.18 в, е). С возрастанием микроградиентов возможно смыкание агломераций частиц на соседних вершинах (рис. 3.18 г, д). И в том и в другом случае пространство во впадинах между выступами будет заполнено менее концентрированной магнитной жидкостью. Наиболее вероятно, что на практике будут иметь место оба механизма (рис. 3.18 ж).

Подобные эффекты перераспределения частиц возникают в зубцовой зоне традиционных магнитожидкостных уплотнений [114]. Ориентация частиц различной конфигурации относительно поверхности в зависимости от распределения магнитного поля будет происходить в соответствии с вышеописанным механизмом.

## Разработка комбинированных магнитожидкостных уплотнений пожарной техники и исследование их триботехнических характеристик

С учетом перераспределения частиц дисперсной фазы магнитной жидкости можно представить механизм трения эластомерного материала по металлу в присутствии магнитной жидкости.



а



б



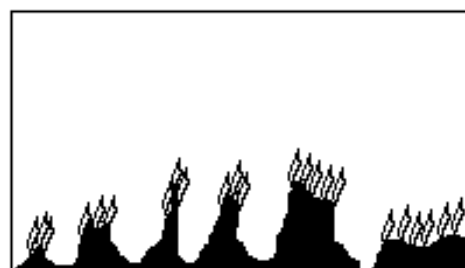
в



г



д



е



ж

**Рис. 3.18.** Распределение магнитных частиц по поверхностям, имеющим различные величины шероховатостей

При достаточно высокой чистоте обработки поверхности скольжение эластомера будет происходить не по самой поверхности твердого тела, а по прослойке из магнитных частиц. В этом случае важное значение имеет форма частиц. При наличии в области трения частиц шаровидной формы возможно их перекатывание по поверхностям трения.

Здесь частицы магнитной жидкости выступают как "ролики" аналогично подшипнику качения. Подобный эффекте перекатывания шариков малого диаметра лежит в основе смазочного материала, описанного в [115]. Однако, эффект перекатывания будет отсутствовать при трении в присутствии частиц игольчатой конфигурации. Наиболее вероятно, что игольчатые частицы переместятся из положения при которых их оси перпендикулярны поверхности в положение при котором их оси параллельны поверхности. В этом случае возможно как скольжение эластомерного элемента по прослойке частиц, так и скольжение увлекаемых эластомером частиц по поверхности твердого тела. Поскольку сила сопротивления качению обычно меньше силы трения скольжения можно предположить, что сила трения в присутствии МЖ, изготовленной с применением магнитной фазы шаровидной конфигурации уменьшится по сравнению с магнитной жидкостью включающей игольчатые магнитные частицы.

При снижении чистоты обработки и появлении микроградиентов возможно некоторое увеличение высоты выступов микронеровностей за счет появления на них агломераций частиц. При скольжении эластомера наиболее вероятным является срезание с вершин этих агломераций, что приведет к увеличению силы трения на величину, равную сумме магнитных сил на каждом выступе микронеровностей.

В случае возникновения мостов из частиц между соседними выступами происходит выравнивание поверхности. Поэтому можно ожидать некоторого уменьшения силы трения.

Поскольку наиболее вероятным является присутствие обоих вышеописанных механизмов сделать вывод относительно изменения результирующего момента трения достаточно сложно. Анализируя картины магнитных полей можно предположить что второй механизм будет преобладать в условиях большего градиента магнитного поля имеющего место на более грубо обработанных поверхностях. Преобладание первого механизма наиболее вероятно при снижении неоднородности поля возникающего на поверхностях с высоким качеством обработки.

И в том и в другом случае можно ожидать снижения момента трения для шаровидных частиц в следствии их перекатывания.

### **3.6. Выводы к главе 3**

1. При анализе магнитных расчетов конструкций комбинированных манжетных магнитожидкостных уплотнений установлено, что наиболее рациональной является конструкция в которой в качестве источника магнитного поля используется намагниченный в радиальном направлении кольцевой постоянный магнит, помещенный между кромкой и пыльником манжетного уплотнения.

2. Анализ влияния магнитных материалов на магнитные характеристики комбинированного уплотнения показал, что наиболее рациональным является применение в качестве источника магнитного поля магнитоэластомерных материалов.

3. Установлено, что различные магнитные материалы вала практически не оказывают влияния на величину и распределение магнитной индукции в рабочей области уплотнения. В конструкциях с немагнитным валом происходит некоторое уменьшение индукции в рабочей области. В этом случае необходимо применять постоянные магниты с большей намагниченностью.

4. В результате расчета магнитного поля в комбинации магнитожидкостного уплотнения с подшипником качения установлено, что на вершинах тел качения магнитная индукция может превышать величину индукции в рабочем зазоре в 2–3 раза. В этом случае при применении в качестве смазки подшипника качения магнитной жидкости может произойти ее расслоение на вершинах тел качения и заклинивание подшипника.

5. При анализе распределения магнитного поля на вершинах микронеровностей твердой поверхности установлено, что с уменьшением чистоты обработки на поверхности возникают микроградиенты магнитного поля направленные к вершинам микронеровностей. В этом случае возможна концентрация частиц магнитного наполнителя МЖ в области с наибольшей напряженностью магнитного поля. При этом можно предположить, что на процесс трения в присутствии МЖ будет оказывать влияние конфигурация частиц магнитного наполнителя. Так, для МЖ с шарообразными частицами можно ожидать снижения момента трения по сравнению с МЖ включающей магнитный наполнитель с частицами игольчатой формы.

## **ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ В КМЖУ**

### **4.1. Экспериментальное исследование смазочных свойств магнитной жидкости**

Проявление смазочных свойств внешней среды, в которой происходит трение заключается в образовании в области трения пленки смазочного материала.

Образующаяся в процессе трения пленка может значительно уменьшить непосредственный контакт трущихся поверхностей. Наличие смазки в области трения может значительно изменить характер контакта и режим трения, вызвать уменьшение силы трения и износа.

Оценка смазочных свойств какой-либо среды может быть произведена путем измерения силы (момента) трения и износа при трении образцов.

#### **4.1.1. Исследование трения эластомерного материала по металлу**

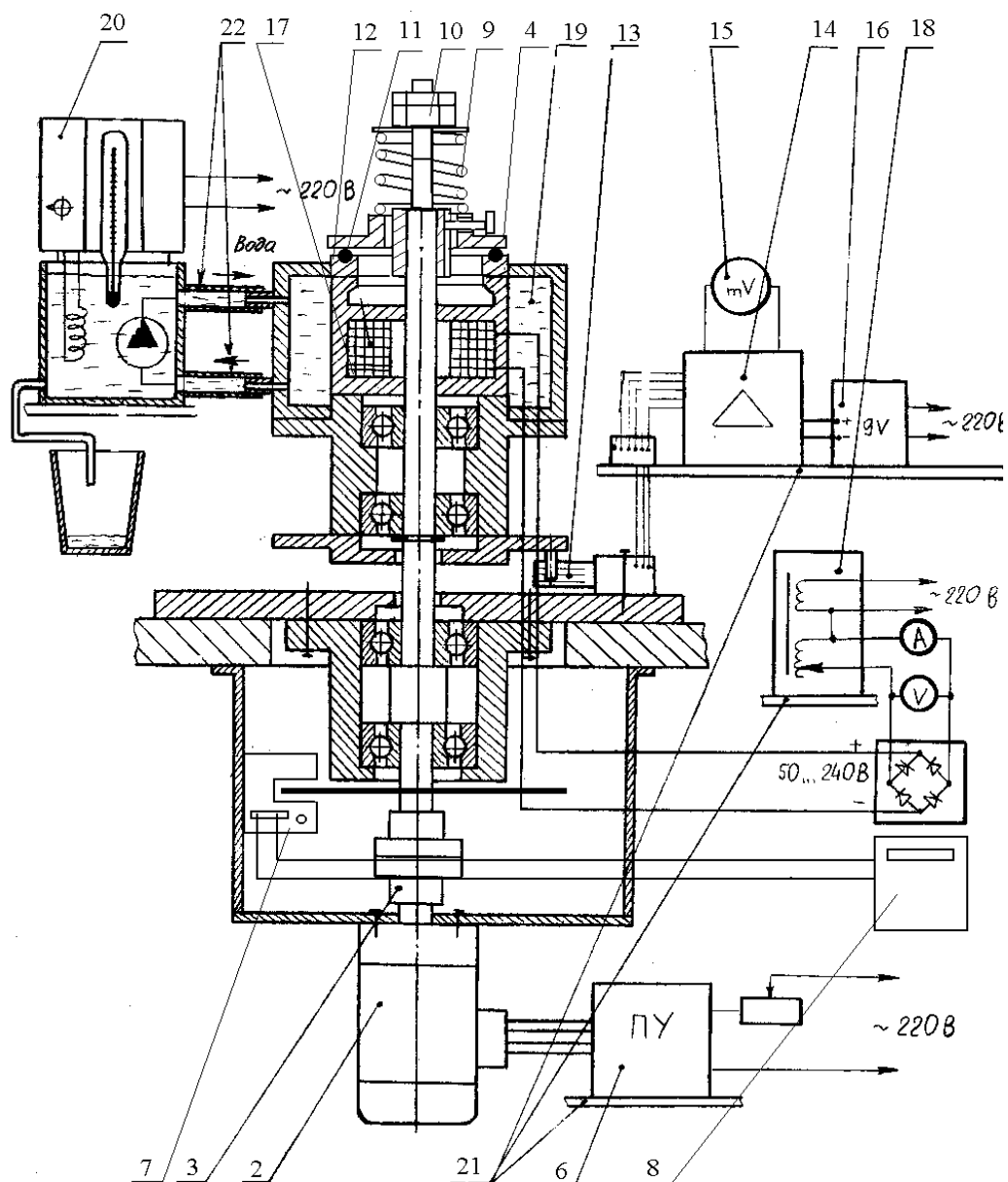
На основании теории трения в паре эластомер–металл (глава 1.2) установлено, что основное влияние на процесс трения оказывает ряд факторов:

1. Шероховатость металлического элемента, входящего в пару трения.
2. Контактное усилие в паре трения.
3. Скорость скольжения.
4. Смазочный материал.
5. Магнитная индукция в области трения (для случая трения в присутствии магнитной жидкости)

Эксперименты проводились на специальной экспериментальной установке, представленной на рис. 4.1, 4.2, 4.3.

Установка работает следующим образом. Вал 1, присоединен к приводному электродвигателю постоянного тока 2 посредством муфты с упругим элементом 3. на котором установлен металлический элемент трения 4. Частота вращения электродвигателя постоянного тока 2 регулируется при помощи комплектного электропривода 6 типа БУ3509-322У4. Частота вращения измеряется при помощи установленного на валу оптического датчика 7, подключенного к измерительному прибору МОРИОН 8. Соединение вала и металлического элемента трения выполнено таким образом, что обеспечивается передача момента от вала на металлический элемент трения и допускает его осевое перемещение вдоль оси вала. Контактное усилие в узле трения создается при помощи пружины 9. Путем изменения усилия пружины при помощи регулировочной гайки 10 можно регулировать контактное усилие в паре трения. Эластомерный элемент трения 11 закрепляется в проточке корпуса 12. В качестве эластомерного эле-

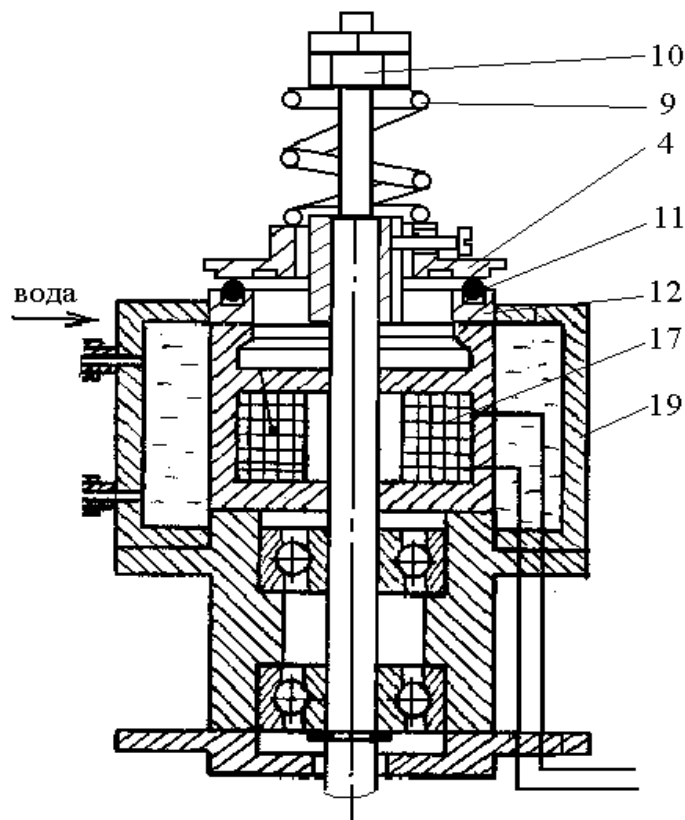
мента трения используется резиновое кольцо круглого сечения по ГОСТ 9833 - 73, удовлетворяющее техническим требованиям (включая группу резины, ее физико - механические показатели) ГОСТ 18829 -80.



**Рис. 4.1.** Установка для исследования процессов трения в паре резина–металл:  
 1 – вал, 2 – электродвигатель постоянного тока, 3 – муфта с упругим элементом,  
 4 – металлический элемент трения, 5 – диодный мост, 6 – комплектный электропривод, 7 – оптический датчик, 8 – измерительный прибор МОРИОН,  
 9 – пружина, 10 – регулировочная гайка, 11 – эластомерный элемент трения,  
 12 – корпус, 13 – тензодатчик, 14 – усилитель, 15 – милливольтметр,  
 16 – блок питания АГАТ, 17 – катушка, 18 – ЛАТР, 19 – рубашка охлаждения,  
 20 – термостат, 21 – стойка, 22 – шланги



Диаметр сечения кольца  $d=5$  мм, внутренний диаметр  $D_k=50$  мм. Трение происходит по торцевой кромке кольца, имеющей диаметр  $D_{тр}=55$  мм. Корпус 99 может вращаться независимо от вала. Такая конструкция корпуса позволяет производить измерение момента трения, возникающего в паре трения. Для измерения момента трения используются два тензодатчика 13 наклеенных на балку, конец которой жестко закреплен на неподвижной платформе. Выступ корпуса 12 воздействуя на тензобалку приводит к ее деформации, результатом чего является изменение сопротивления тензодатчиков. Поступающий с тензодатчиков сигнал усиливается при помощи усилителя 14 и регистрируется милливольтметром 15. Питание усилителя осуществляется при помощи блока питания АГАТ 16.



**Рис. 4.2.** Узел трения установки:  
 9 – пружина, 10 – регулировочная гайка,  
 11 – эластомерный элемент трения,  
 4 – твердый элемент трения,  
 17 – электромагнитная катушка,  
 19 – рубашка охлаждения

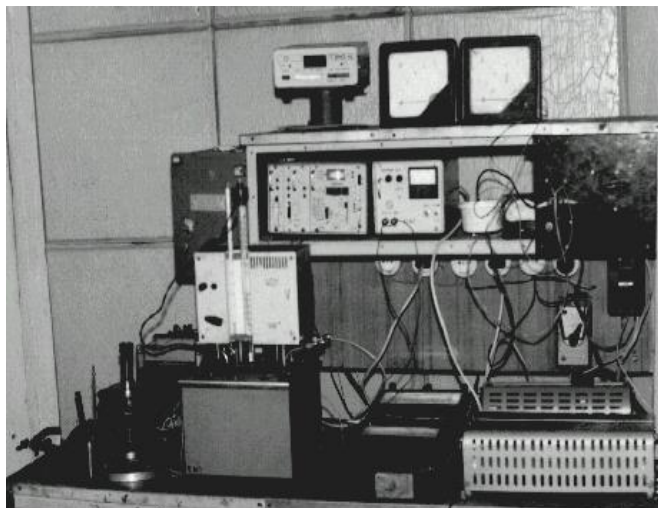
Изменение величины магнитной индукции осуществляется путем изменения величины постоянного тока в катушке 17, установленной в корпусе 12. Магнитная система сконструирована таким образом, что бы обеспечить наибольшее значение индукции в области трения образцов. Катушка через диодный мост 5 соединена со вторичной обмоткой ЛАТРа 18. Напряжение и ток в цепи электромагнитной катушки регистрируются при помощи амперметра и вольтметра.

Чтобы исключить влияние температуры окружающей среды на процессы трения необходимо обеспечить ее постоянное значение в течение эксперимента. С этой целью в корпусе 12 выполнена рубашка охлаждения 19, заполненная охлаждающей жидкостью. Рубашка охлаждения присоединена к термостату 20, который поддерживает постоянную температуру охлаждающей жидкости и обеспечивает ее циркуляцию в гидросистеме.

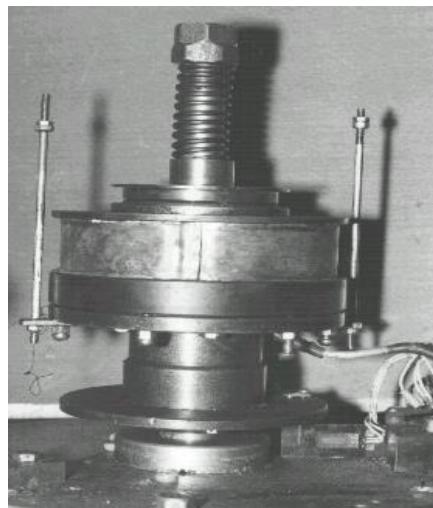
Конструктивно экспериментальная установка выполнена на раме, электрооборудование для защиты от вибраций, возникающих при работе установки, размещено на отдельной стойке 21, являющейся так же рабочим местом экспериментатора, термостат для удобства пользования размещен на собственной

## Разработка комбинированных магнитожидкостных уплотнений пожарной техники и исследование их триботехнических характеристик

подставке. Водопроводные соединительные шланги 22, имеют минимально возможную длину.



а



б

**Рис. 4.3.** Установка для исследования процессов трения:  
а – общий вид, б – узел трения

В качестве смазочного материала применялся ряд масел и магнитных жидкостей, отличающихся по своим свойствам. При проведении экспериментов использовались магнитные жидкости приготовленные на веретенном масле И-Л-А-32, моторном масле М6,10,32К, и полиэтилсилаксане (ПЭС-5) с различными магнитными наполнителями. Магнитной фазой в этих жидкостях являлось карбонильное железо, магнетит, и их смесь. Основным отличим между частицами магнетита и карбонильного железа, помимо физических и химических свойств, является их форма. Так, микрочастицы карбонильного железа имеют шаровидную форму, а частицы магнетита произвольную конфигурацию [20]. Поэтому, используя в качестве смазки жидкости с такими магнитными фазами можно установить влияние на процесс трения конфигурации частиц магнитного наполнителя. Характеристики МЖ приведены в табл. 4.1.

Кроме магнитных жидкостей, при проведении экспериментов для смазки трущихся поверхностей применялись традиционные смазочные материалы такие как веретенное веретенном масле И-Л-А-32, моторном масле М6,10,32К, и полиэтилсилаксане (ПЭС-5). Эти исследования дают возможность определить эффективность применения МЖ в качестве смазки по сравнению с обычными смазочными материалами. Выбор для экспериментов этих смазочных материалов и приготовленных на их основе МЖ обусловлен тем, что именно они наиболее часто используются в манжетных уплотнениях.

Таблица 4.1. Характеристики магнитных жидкостей

№	Состав магнитной фазы %		Жидкость-носитель	Намагниченность насыщения кА/м	Вязкость $\eta$ Па с	Плотность г/см <sup>3</sup>
	Магнетит	Карбонильное железо				
1	25		ПЭС 5	не ниже 26	0.5 - 1	0.98
2	8	17	ПЭС 5	не ниже 25	0.5 - 1	0.98
3		25	ПЭС 5	не ниже 21	1 - 1.5	0.98
4	25		Масло моторное М6 <sub>3</sub> 10Г <sub>2</sub> К	не ниже 26	3 - 4	1.12
5	8	17	Масло моторное М6 <sub>3</sub> 10Г <sub>2</sub> К	не ниже 25	3 - 4	1.12
6		25	Масло моторное М6 <sub>3</sub> 10Г <sub>2</sub> К	не ниже 21	4 - 4.5	1.12
7	25		Масло И-Л-А 32	не ниже 26	0.03 - 0.04	0.89
8	8	17	Масло И-Л-А 32	не ниже 25	0.03 - 0.04	0.89
9		25	Масло И-Л-А 32	не ниже 21	0.04 - 0.05	0.89

Эксперименты проводились при трех различных обработках поверхности твердого тела трения, соответствующих различным шероховатостям поверхности –  $Rz=8.5$  мкм,  $Rz=2.6$  мкм,  $Rz=0.6$  мкм. Исследования процессов трения в присутствии магнитной жидкости производились с использованием теории планирования многофакторного эксперимента [116, 117, 118, 119, 120, 121, 122]. За критерий оптимизации при планировании и проведении экспериментов принималась величина момента трения  $M_{тр}$ . В качестве факторов были выбраны скорость скольжения образцов  $V_c$ , контактное усилие  $R_k$ , магнитная индукция в области трения  $B$ .

Границы варьирования факторов выбирались следующим образом. Нижний и верхний уровни контактного усилия соответствовали минимальному и максимальному  $R_k$  рекомендованному [1] для манжет диаметр рабочей кромки которых соответствует диаметру эластомерного элемента трения. Пределы варьирования величины магнитной индукции принимались на основании расчета магнитных полей в комбинированных уплотнениях (глава 3.2). Основные уровни и интервалы варьирования факторов приведены в таблице 4.2.

Функция отклика, характеризующая момент трения зависит от трех факторов:

$$y = f(x_1, x_2, x_3).$$

Наименование факторов представлено в табл. 4.2.

**Разработка комбинированных магнитожидкостных уплотнений  
пожарной техники и исследование их триботехнических характеристик**

*Таблица 4.2. Кодирование и уровни факторов*

наименование фактора и единицы измерения	Код фактора	Интервал варьи- рования	Уровень факторов		
			нижний -	основной 0	верхний +
Магнитная индукция, Тл	X1	0.63	0.001	0.316	0.631
Контактное усилие, Н/см	X2	1.461	1.469	2.199	2.93
Скорость скольжения, м/с	X3	3.4	0.34	2.04	3.74

Кодированное значение факторов  $X_i$  определяется по выражению

$$X_i = (X_i - X_{i0}) / \Delta X_i,$$

где  $X_i$ -кодированное значение  $i$  го фактора;  $X_i$ -натуральное значение  $i$  го фактора;  $X_{i0}$ -натуральное значение основного уровня  $i$  фактора;  $\Delta X_i$ -интервал варьирования  $i$  го фактора.

Матрица планирования эксперимента представлена в табл. 4.3. При исследовании смазочных свойств традиционных смазок так же применялась методика планирования экспериментов. Однако, из матрицы планирования была исключена магнитная индукция. Эксперимент проводился с учетом двух факторов – скорости скольжения и контактно усилия. Основной уровень и интервалы варьирования приведены в табл. 4.4. Матрица планирования приведена в табл. 4.5.

*Таблица 4.3. Матрица планирования*

№	X1	X2	X3	X1	X2	X3
				Тл	Н/см	м/с
1	-	-	-	0.001	1.469	0.34
2	-	-	+	0.001	1.469	3.74
3	-	+	-	0.001	2.93	0.34
4	-	+	+	0.001	2.93	3.74
5	+	-	-	0.631	1.469	0.34
6	+	-	+	0.631	1.469	3.74
7	+	+	-	0.631	2.93	0.34
8	+	+	+	0.631	2.93	3.74

Каждый опыт повторялся пятикратно. Порядок проведения опытов принимался из таблицы случайных чисел.

Для получения уравнения регрессии адекватно описывающего исследуемый процесс, осуществлялась статистическая обработка результатов планирования эксперимента [123].

В соответствии с вышеизложенным методом планирования, эксперименты проводились для каждой шероховатости поверхности твердого тела трения с использованием в качестве смазки каждого из вышеуказанных смазочных материалов.

Таблица 4.4. Кодирование и уровни факторов

Наименование фактора и единицы измерения	Код фактора	Интервал варьирования	Уровень факторов		
			нижний -	основной 0	верхний +
Контактное усилие, Н/см	X2	1.461	1.469	2.199	2.93
Скорость скольжения, м/с	X3	3.4	0.34	2.04	3.74

Эксперименты проводились по следующей методике. Перед проведением эксперимента приборы, предназначенные для измерения момента трения были протарированы при помощи набора грузов массой 225 г. каждый, по схеме, представленной на рис. 4.4. Набор грузов создает постоянный крутящий момент, который регистрируется при помощи милливольтметра. Крутящий момент равен

$$M = PD/2,$$

где P – масса грузов, D – диаметр корпуса.

Чтобы обеспечить постоянную температуру в области трения в течение 10 мин. через рубашку охлаждения пропускается вода заданной температуры. Затем устанавливается необходимая величина магнитной индукции в области трения. Производится это следующим образом. В проточку корпуса помещается резиновое кольцо с прямоугольным вырезом, достаточным для помещения в него щупа тесламетра. По своим размерам и свойствам кольцо соответствует эластомерному элементу, применяемому при исследовании процесса трения. На вал станда устанавливается диск, выполняющий функцию твердого тела трения, пружина и гайка (рис. 4.5).

Изменяя при помощи гайки величину сжатия пружины устанавливается ее необходимое усилие, соответствующее определенному контактному усилию в области трения. Усилие пружины контролируется при помощи динамометра, присоединенного к твердому телу трения. Затем в вырез резинового кольца помещается щуп тесламетра и путем изменения тока в электромагнитной катушке устанавливается необходимое значение магнитной индукции. Величина тока, соответствующая определенному значению индукции в области трения определяется при помощи амперметра. При увеличении усилия пружины происходит деформация резинового кольца, а значит и уменьшение магнитного зазора между твердым телом трения и корпусом. Уменьшение зазора приводит к из-

Таблица 4.5. Матрица планирования

№	X1	X2	X1	X2
			Н/см	м/с
1	-	-	1.469	0.34
2	-	+	1.469	3.74
3	+	-	2.93	0.34
4	+	+	2.93	3.74

менению его магнитной проницаемости. Поэтому, измерение индукции в области трения производится при таком усилии пружины, которое устанавливается при исследовании процесса трения.

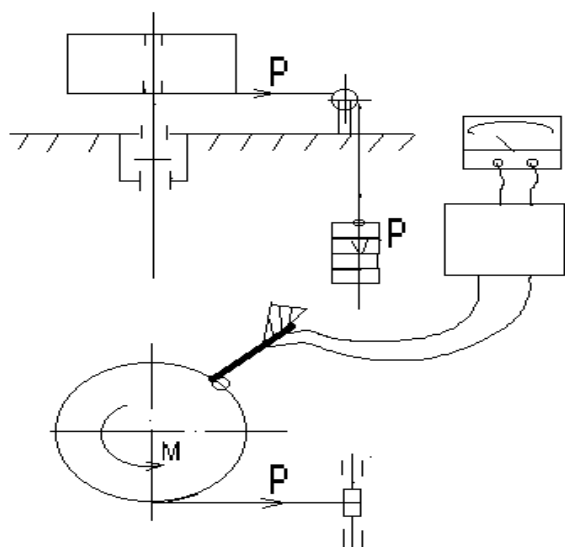


Рис. 4.4. Схема тарирования тензобалки

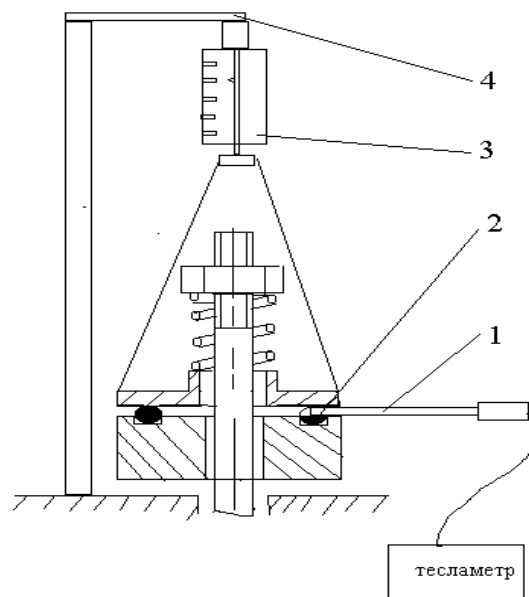
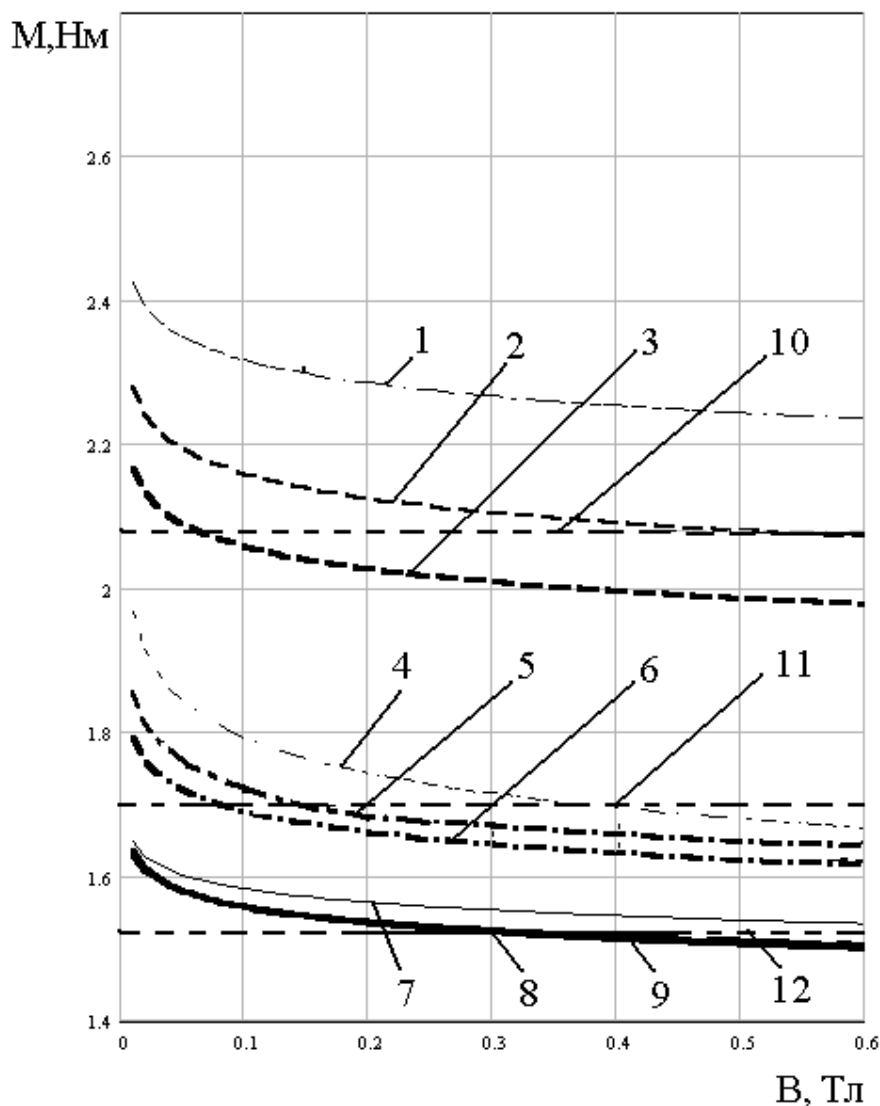


Рис. 4.5. Схема измерения магнитной индукции в области трения:  
1 – щуп тесламетра, 2 – резиновое кольцо с прорезью, 3 – динамометр, 4 – штатив

После определения тока в электромагнитной катушке, гайка, пружина, твердый элемент трения удаляются с вала установки, а кольцо с прорезью извлекается из проточки корпуса. На его место помещается эластомерный элемент трения, предварительно промытый в спирте в течение 10 с и просушенный. Далее, на вал помещается твердый элемент трения, пружина и гайка. Подается ток в электромагнитную катушку величина которого соответствует ранее определенной. Производится установка необходимого усилия пружины. Затем в область трения при помощи шприца помещается магнитная жидкость, количество которой определяется визуально. Включается приводной электродвигатель и устанавливается необходимая частота вращения вала. Производится измерение момента. Опыты повторяются для каждой частоты вращения вала, усилия пружины, магнитной индукции в соответствии с планом исследований.

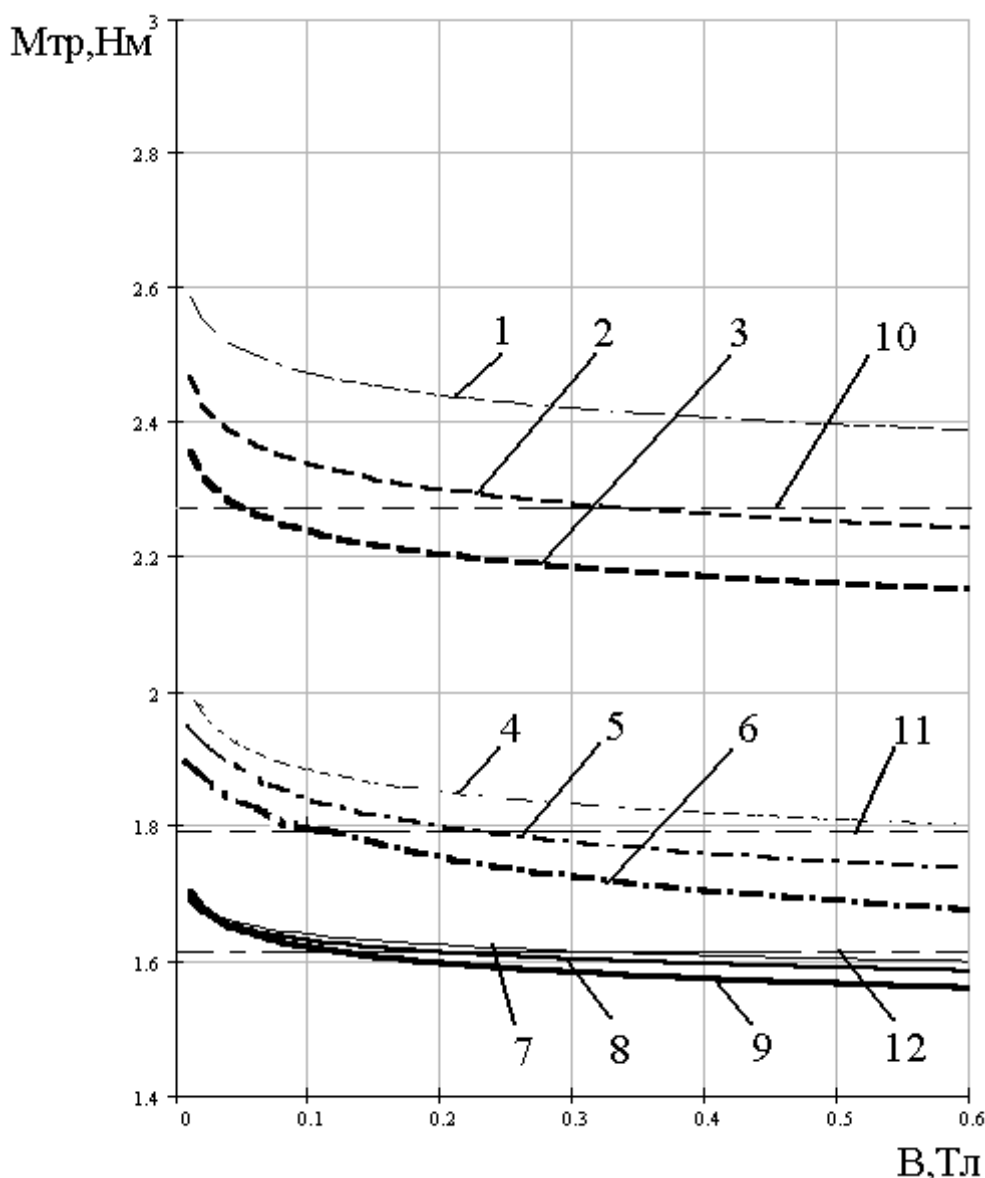
### 4.1.2. Анализ результатов исследования момента трения

На рис. 4.6, 4.7, 4.8 представлены зависимости момента трения от величины магнитной индукции для различных МЖ при различной чистоте обработки твердой поверхности трения.



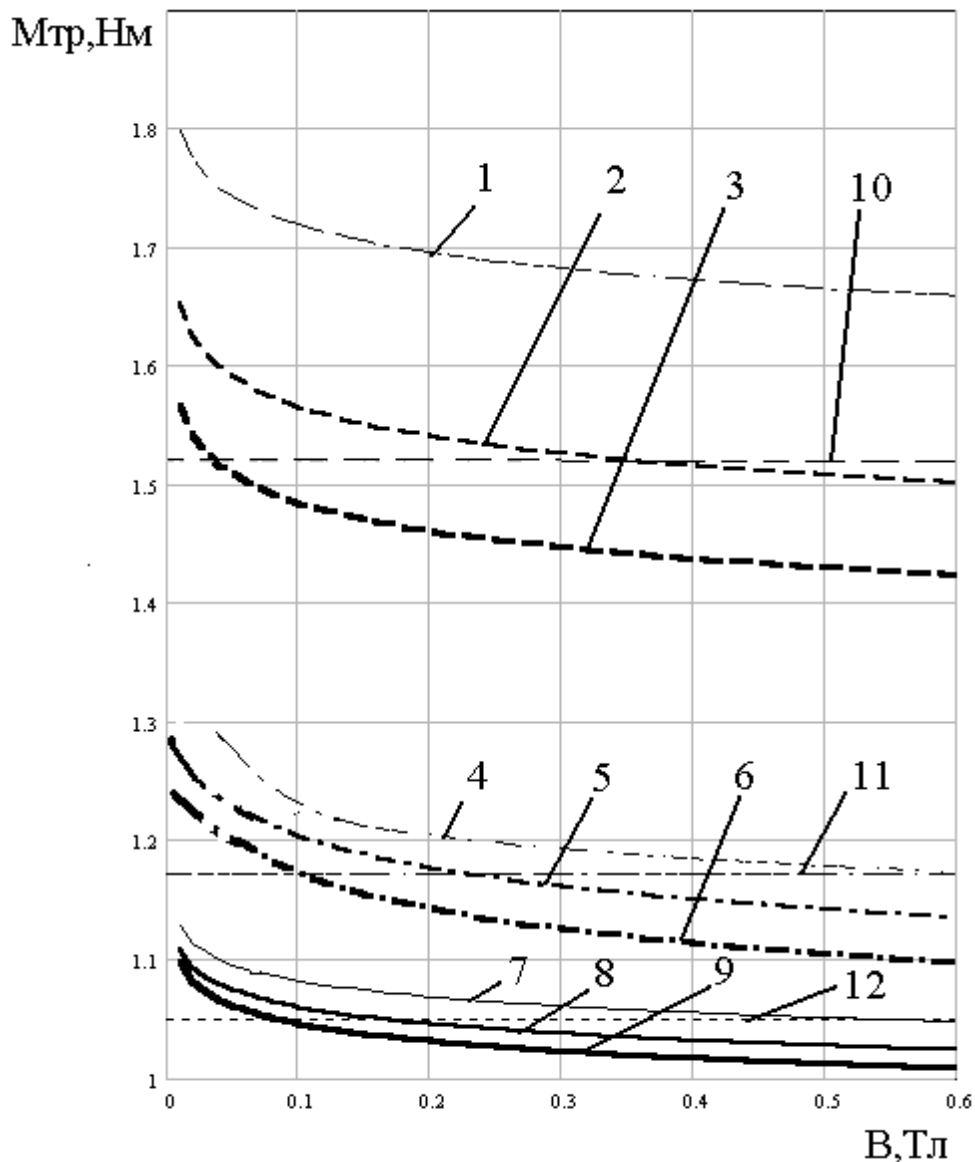
**Рис. 4.6.** Зависимость момента трения от величины магнитной индукции при  $V=2.04$  м/с,  $R_k=2.203$  Н/см для жидкостей на ПЭС-5:

- 1 – МЖ на магнетите (МЖ-1),  $R_z=8.5$ ; 2 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-2),  $R_z=8.5$ ;
- 3 – МЖ на железе (МЖ-3),  $R_z=8.5$ ; 4 – МЖ на магнетите (МЖ-1),  $R_z=2.5$ ;
- 5 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-2),  $R_z=2.5$ ; 6 – МЖ на железе (МЖ-3),  $R_z=2.5$ ;
- 7 – МЖ на железе (МЖ-1),  $R_z=0.6$ ; 8 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-2),  $R_z=0.6$ ;
- 9 – МЖ на железе (МЖ-3),  $R_z=0.6$ ; 10 – ПЭС-5 без магнитного наполнителя,  $R_z=8.5$ ;
- 11 – ПЭС-5 без магнитного наполнителя,  $R_z=2.6$ ;
- 12 – ПЭС-5 без магнитного наполнителя,  $R_z=0.6$



**Рис. 4.7.** Зависимость момента трения от величины магнитной индукции при  $V=2.04$  м/с,  $R_k=2.203$  Н/см для жидкостей на масле  $M6_310Г_2К$ :  
 1 – МЖ на магнетите (МЖ-4),  $R_z=8.5$ ; 2 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-5),  $R_z=8.5$ ;  
 3 – МЖ на железе (МЖ-6),  $R_z=8.5$ ; 4 – МЖ на магнетите (МЖ-4),  $R_z=2.5$ ;  
 5 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-5),  $R_z=2.5$ ; 6 – МЖ на железе (МЖ-6),  $R_z=2.5$ ;  
 7 – МЖ на железе (МЖ-4),  $R_z=0.6$ ; 8 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-5),  $R_z=0.6$ ;  
 9 – МЖ на железе (МЖ-6),  $R_z=0.6$ ;  
 10 –  $M6_310Г_2К$  без магнитного наполнителя,  $R_z=8.5$   
 11 –  $M6_310Г_2К$  без магнитного наполнителя,  $R_z=2.6$   
 12 –  $M6_310Г_2К$  без магнитного наполнителя,  $R_z=0.6$





**Рис. 4.8.** Зависимость момента трения от величины магнитной индукции при  $V=2.04$  м/с,  $R_k=2.203$ Н/см для жидкостей на масле И-Л-А-32:  
 1 – МЖ на магнетите (МЖ-7),  $R_z=8.5$ ; 2 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-8),  $R_z=8.5$ ;  
 3 – МЖ на железе (МЖ-9),  $R_z=8.5$ ; 4 – МЖ на магнетите (МЖ-7),  $R_z=2.5$ ;  
 5 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-8),  $R_z=2.5$ ; 6 – МЖ на железе (МЖ-9),  $R_z=2.5$ ;  
 7 – МЖ на железе (МЖ-7),  $R_z=0.6$ ; 8 – МЖ на магнетите и железе(МЖ-8),  $R_z=0.6$ ;  
 9 – МЖ на железе (МЖ-9),  $R_z=0.6$ ;  
 10 – И-Л-А-32 без магнитного наполнителя,  $R_z=8.5$   
 11– И-Л-А-32 без магнитного наполнителя,  $R_z=2.6$   
 12– И-Л-А-32 без магнитного наполнителя,  $R_z=0.6$

Для всех случаев трения характерно незначительное уменьшение момента трения при увеличении магнитной индукции от 0 до 0.6 Тл. Для всех испытываемых магнитных жидкостей уменьшение момента при  $B=0.6$  Тл не превышает 10% от величины момента при  $B=0$  Тл, причем наиболее заметное уменьшение момента трения происходит при возрастании индукции от 0 до 0.2–0.25 Тл. При дальнейшем увеличении индукции, до величины 0.6 Тл, уменьшение момента трения крайне мало.

Во всех случаях момент трения для жидкостей на карбонильном железе меньше чем для жидкостей на магнетите. Характеристики жидкостей на смеси магнетита и карбонильного железа занимают промежуточное положение. При шероховатости поверхности  $Rz=8.5$  мкм. для МЖ на ПЭС с карбонильным железом при  $B=0.2$  Тл момент трения на 9 % ниже по сравнению с МЖ на магнетите.

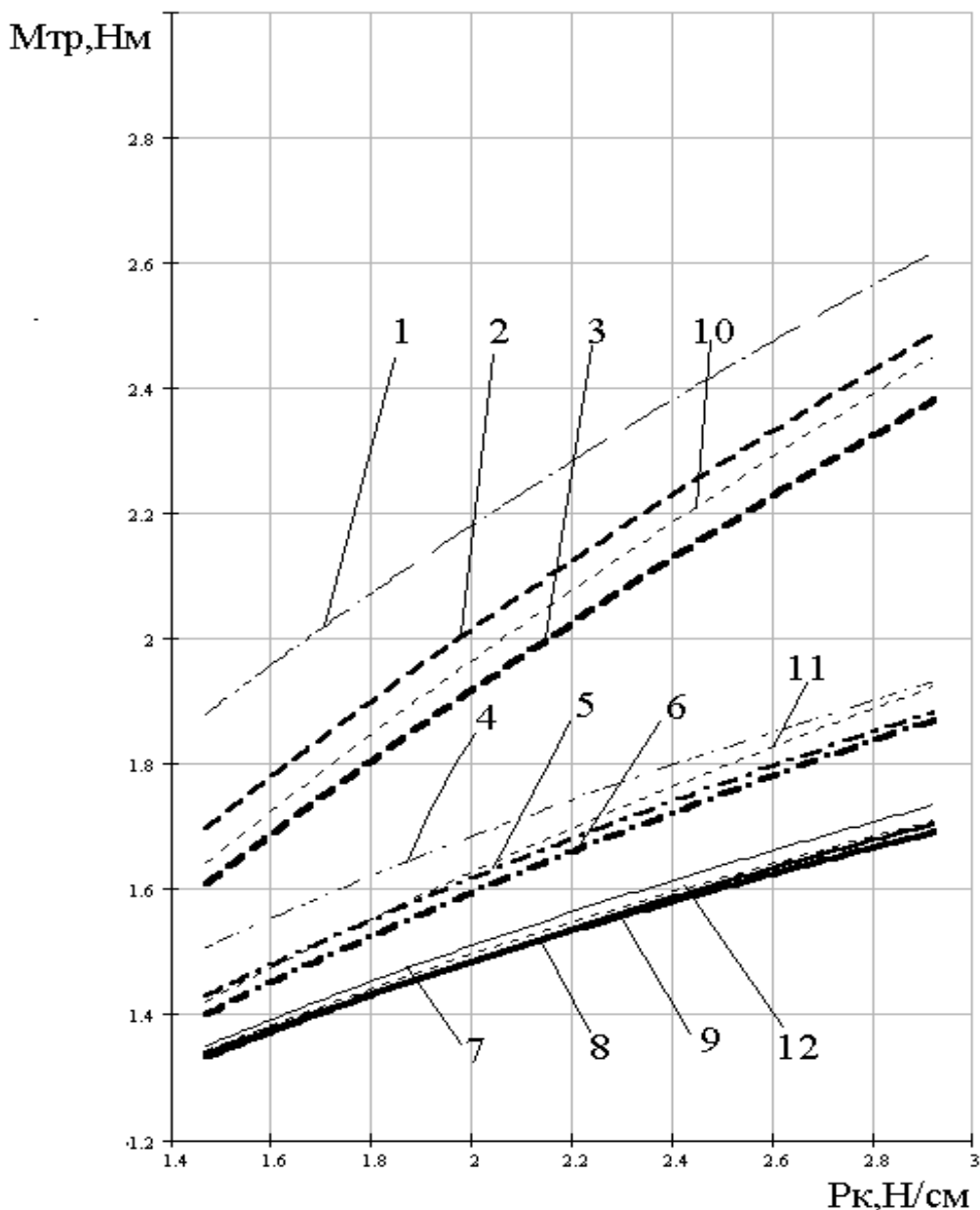
С повышением чистоты обработки происходит уменьшение различий момента трения для МЖ на магнетите и карбонильном железе. Так, для  $Rz=2.6$  мкм при  $B=0.2$  Тл момент трения уменьшается на 12%, а при  $Rz=0.6$  мкм снижение момента трения составляет 7%. Для МЖ на моторном масле и веретенном масле уменьшение момента трения в процентном соотношении приближается к величинам приведенным для жидкостей на ПЭС.

Зависимости момента трения от величины магнитной индукции можно представить в относительных единицах, приводя значения моментов к величине  $M_{тр}$  для жидкостей на магнетите при  $Rz=8.5$  мкм. Различие  $M_{тр}$  в относительных единицах для МЖ на ПЭС, моторном масле и веретенном масле не превышает 7%. Такое незначительное отличие приведенных значений момента трения показывает, что для МЖ  $M_{тр}$  значительно изменяется под влиянием магнитной индукции, шероховатости поверхности, типа магнитного наполнителя и практически не зависит от свойств жидкости носителя.

На рис. 4.9, 4.10, 4.11 представлены зависимости момента трения от контактного усилия для различных магнитных жидкостей при магнитной индукции  $B=0.2$  Тл, и смазочных масел, на основе которых были приготовлены магнитные жидкости.

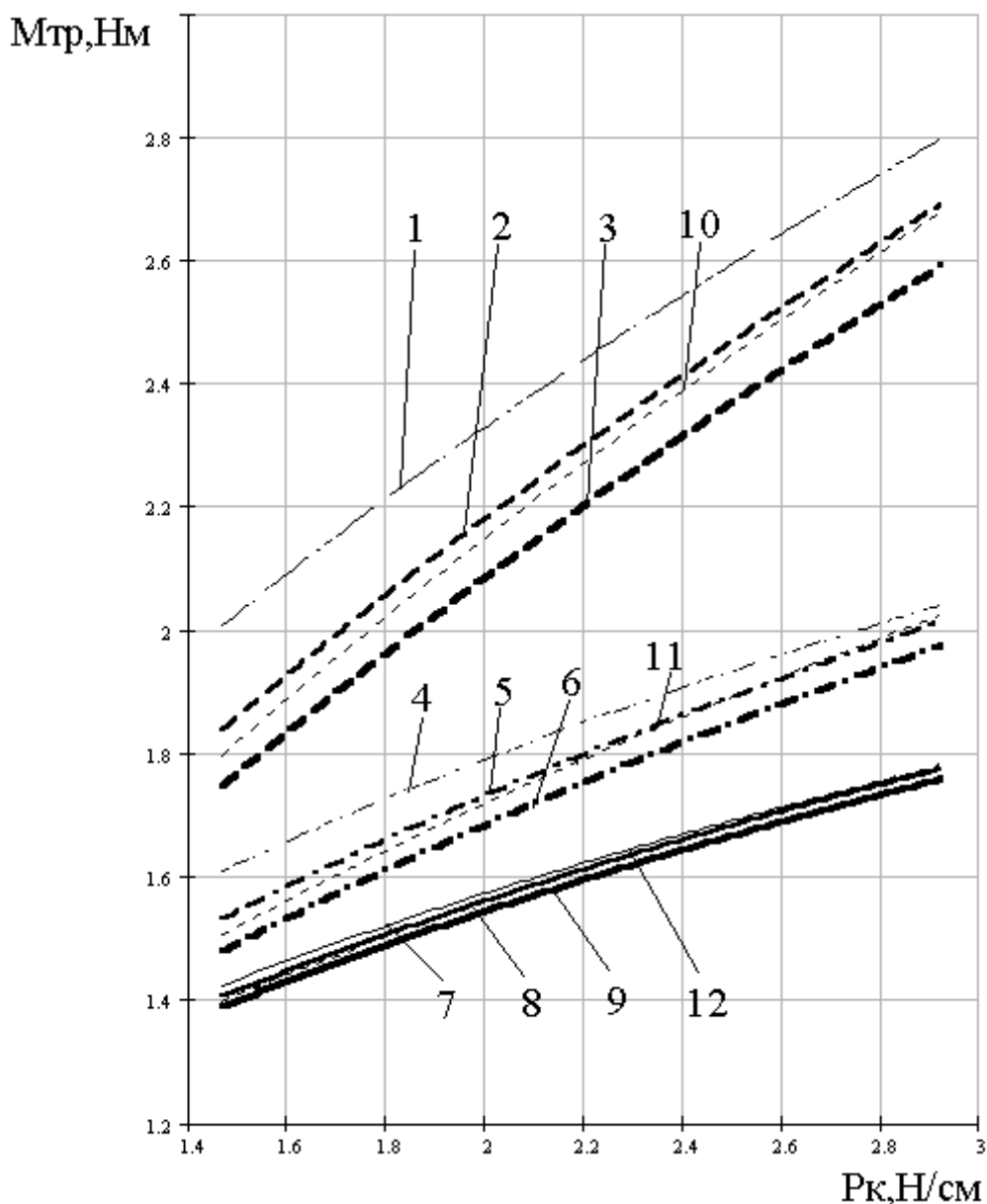
Для всех смазок с увеличением  $R_k$  момент трения возрастает.

При шероховатости твердого контртела  $Rz=8.5$  мкм кривые  $M_{тр}$  для МЖ на магнетите, МЖ на карбонильном железе и МЖ на магнетите и карбонильном железе имеют сходный характер возрастания. Независимо от величины контактного усилия различие величин  $M_{тр}$  для МЖ на магнетите и МЖ на карбонильном железе составляет 0.2–0.3 Нм. Характеристики  $M_{тр}$  для чистых жидкостей – носителей располагаются в интервале, образованном характеристиками для МЖ на магнетите и МЖ на карбонильном железе с магнетитом и имеют сходный с ними характер возрастания. При этом характеристики практически параллельны.



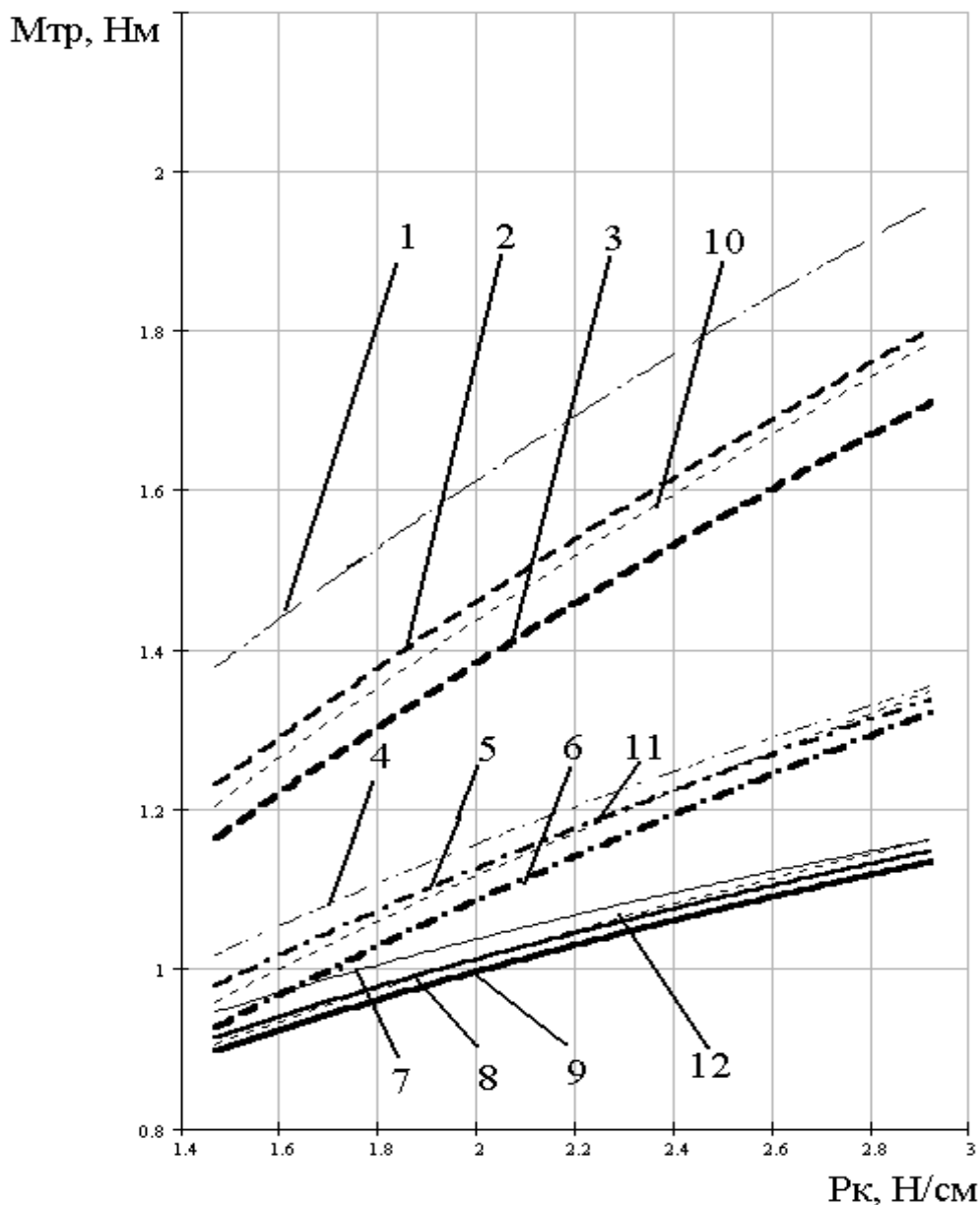
**Рис. 4.9.** Зависимость момента трения от величины контактного усилия при  $V=2.04$  м/с,  $B=0.2$  Тл для жидкостей на ПЭС-5:

- 1 – МЖ на магнетите (МЖ-1),  $Rz=8.5$ ; 2 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-2),  $Rz=8.5$ ;
- 3 – МЖ на железе (МЖ-3),  $Rz=8.5$ ; 4 – МЖ на магнетите (МЖ-1),  $Rz=2.5$ ;
- 5 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-2),  $Rz=2.5$ ; 6 – МЖ на железе (МЖ-3),  $Rz=2.5$ ;
- 7 – МЖ на железе (МЖ-1),  $Rz=0.6$ ; 8 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-2),  $Rz=0.6$ ;
- 9 – МЖ на железе (МЖ-3),  $Rz=0.6$ ; 10 – ПЭС-5 без магнитного наполнителя,  $Rz=8.5$ ;
- 11 – ПЭС-5 без магнитного наполнителя,  $Rz=2.6$ ;
- 12 – ПЭС-5 без магнитного наполнителя,  $Rz=0.6$



**Рис. 4.10.** Зависимость момента трения от величины контактного усилия при  $V=2.04$  м/с,  $B=0.2$  Тл для жидкостей на масле  $M6_3, 10\Gamma_2K$ :

- 1 – МЖ на магнетите (МЖ-4),  $Rz=8.5$ ; 2 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-5),  $Rz=8.5$ ;
- 3 – МЖ на железе (МЖ-6),  $Rz=8.5$ ; 4 – МЖ на магнетите (МЖ-4),  $Rz=2.5$ ;
- 5 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-5),  $Rz=2.5$ ; 6 – МЖ на железе (МЖ-6),  $Rz=2.5$ ;
- 7 – МЖ на железе (МЖ-4),  $Rz=0.6$ ; 8 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-5),  $Rz=0.6$ ;
- 9 – МЖ на железе (МЖ-6),  $Rz=0.6$ ;
- 10 –  $M6_3, 10\Gamma_2K$  без магнитного наполнителя,  $Rz=8.5$
- 11 –  $M6_3, 10\Gamma_2K$  без магнитного наполнителя,  $Rz=2.6$
- 12 –  $M6_3, 10\Gamma_2K$  без магнитного наполнителя,  $Rz=0.6$



**Рис. 4.11.** Зависимость момента трения от величины контактного усилия при  $V=2.04$  м/с,  $B=0.2$  Тл для жидкостей на масле И-Л-А-32:  
 1 – МЖ на магнетите (МЖ-7),  $Rz=8.5$ ; 2 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-8),  $Rz=8.5$ ;  
 3 – МЖ на железе (МЖ-9),  $Rz=8.5$ ; 4 – МЖ на магнетите (МЖ-7),  $Rz=2.5$ ;  
 5 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-8),  $Rz=2.5$ ; 6 – МЖ на железе (МЖ-9),  $Rz=2.5$ ;  
 7 – МЖ на железе (МЖ-7),  $Rz=0.6$ ; 8 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-8),  $Rz=0.6$ ;  
 9 – МЖ на железе (МЖ-9),  $Rz=0.6$ ;  
 10 – И-Л-А-32 без магнитного наполнителя,  $Rz=8.5$   
 11 – И-Л-А-32 без магнитного наполнителя,  $Rz=2.6$   
 12 – И-Л-А-32 без магнитного наполнителя,  $Rz=0.6$

При уменьшении шероховатости твердого контртела до  $Rz=2.6$  мкм характер кривых  $M_{тр}$  изменяется. С увеличением контактного усилия зависимости  $M_{тр}$  для МЖ на магнетите, МЖ на карбонильном железе и МЖ на магнетите и карбонильном железе сближаются. Сближение характеристик свидетельствует об уменьшении влияния на  $M_{тр}$  магнитной фазы.

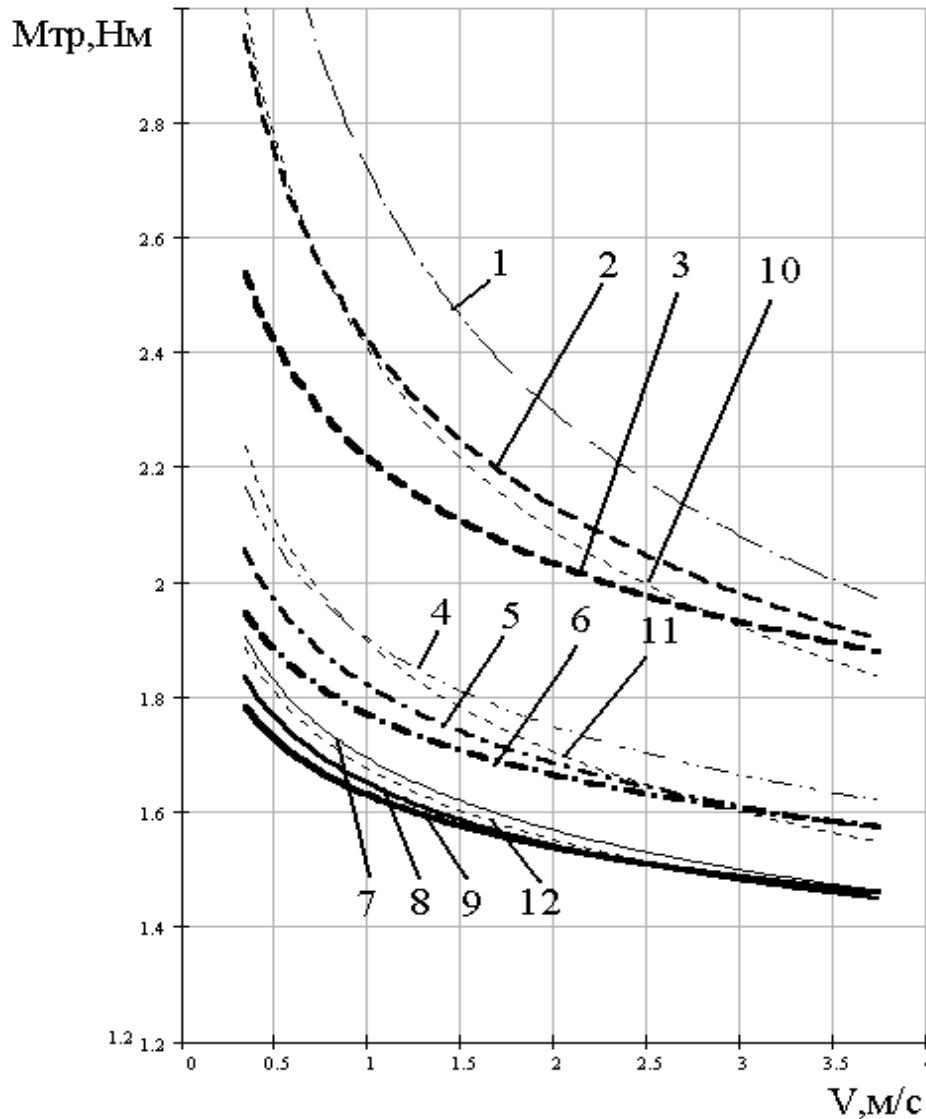
Здесь может иметь место следующий механизм трения. При малых контактных усилиях магнитные частицы преимущественно располагаются на вершинах микронеровностей – в области с наибольшей напряженностью магнитного поля. В этом случае различие  $M_{тр}$  для МЖ на магнетите и МЖ на карбонильном железе обуславливается перекатыванием шарообразных частиц карбонильного железа. С увеличением  $R_k$  под его действием магнитные частицы с вершин микронеровностей перемещаются во впадины между ними, что приводит к выравниванию поверхности твердого тела, и как следствие, к уменьшению момента трения.

В этом случае форма частиц магнитного наполнителя имеет меньшее значение. Снижение момента трения вследствие перемещения магнитных частиц во впадины между микронеровностями может быть подтверждено сравнительным увеличением  $M_{тр}$  для чистых жидкостей – носителей с ростом контактного усилия. Об этом так же свидетельствует меньший, по сравнению с  $Rz=8.5$  мкм, угол наклона кривых к оси  $R_k$ .

Описанный выше механизм незначительно проявляется при  $Rz=8.5$  мкм вследствие большей высоты выступов. Наиболее вероятно, что в этом случае между выступами микронеровностей возникает лишь увеличение концентрации магнитных частиц, а предельной упаковки частиц, при которой проявляется эффект сглаживания поверхности не возникает.

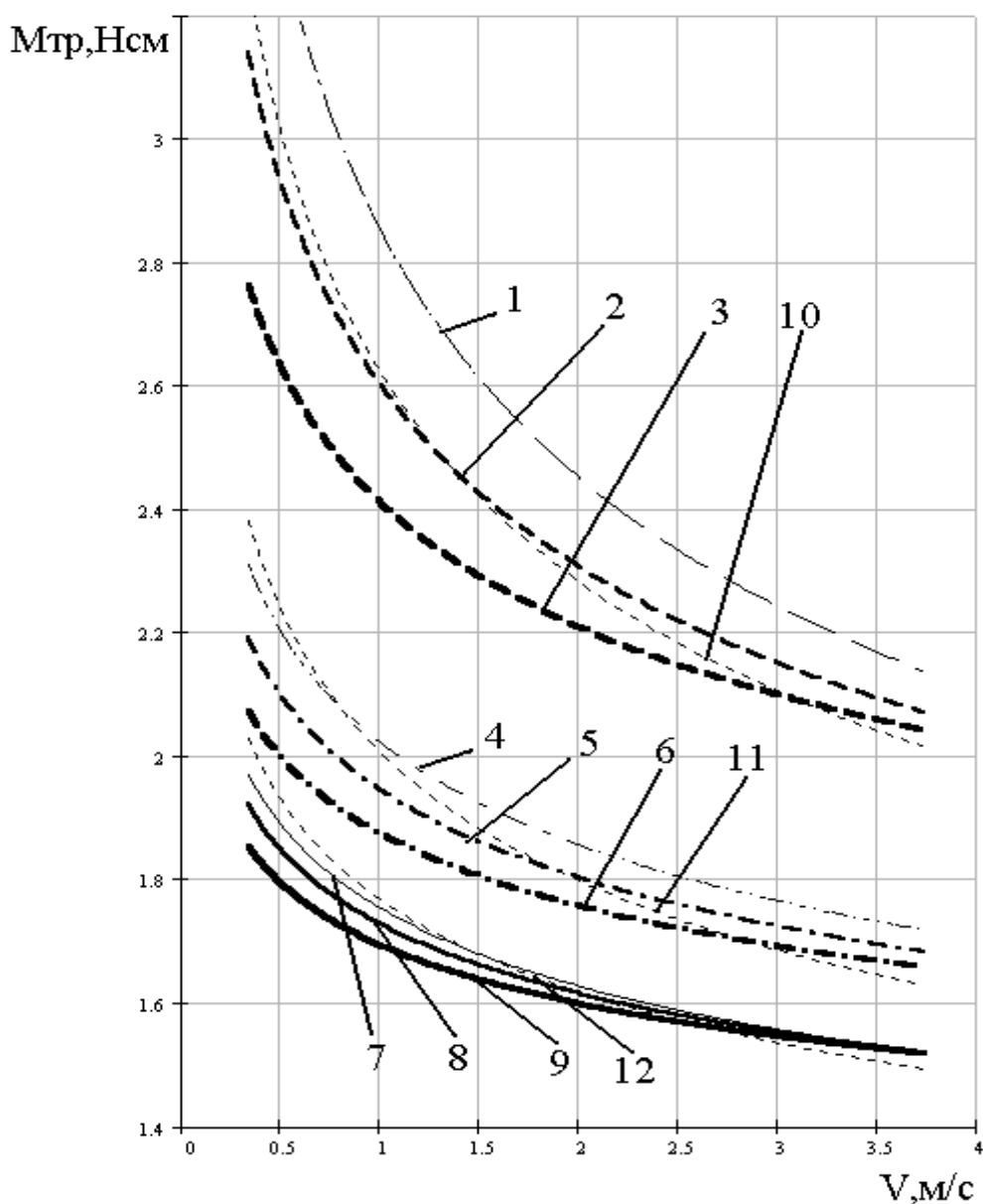
При дальнейшем уменьшении шероховатости поверхности до  $Rz=0.6$  мкм влияние конфигурации частиц магнитного наполнителя на момент трения становится крайне малым. Наименьшее значение  $M_{тр}$  соответствует МЖ на карбонильном железе, наибольшее – МЖ на магнетите. Характеристики  $M_{тр}$  для МЖ на карбонильном железе с магнетитом и чистых жидкостей – носителей занимают промежуточное положение между ними. Незначительное влияние формы магнитного наполнителя на  $M_{тр}$  может объясняться крайне малой высотой выступов на поверхности твердого тела и отсутствием ярко выраженных областей концентрации магнитных частиц. В этом случае с увеличением контактного усилия не происходит перераспределения частиц.

На рис. 4.12, 4.13, 4.14 представлены зависимости момента трения от скорости скольжения при  $R_k=2.203$  Н/см. Для всех жидкостей с увеличением скорости скольжения момент трения уменьшается. Снижение  $M_{тр}$  выражено наиболее значительно при трении по наиболее грубо обработанной поверхности.



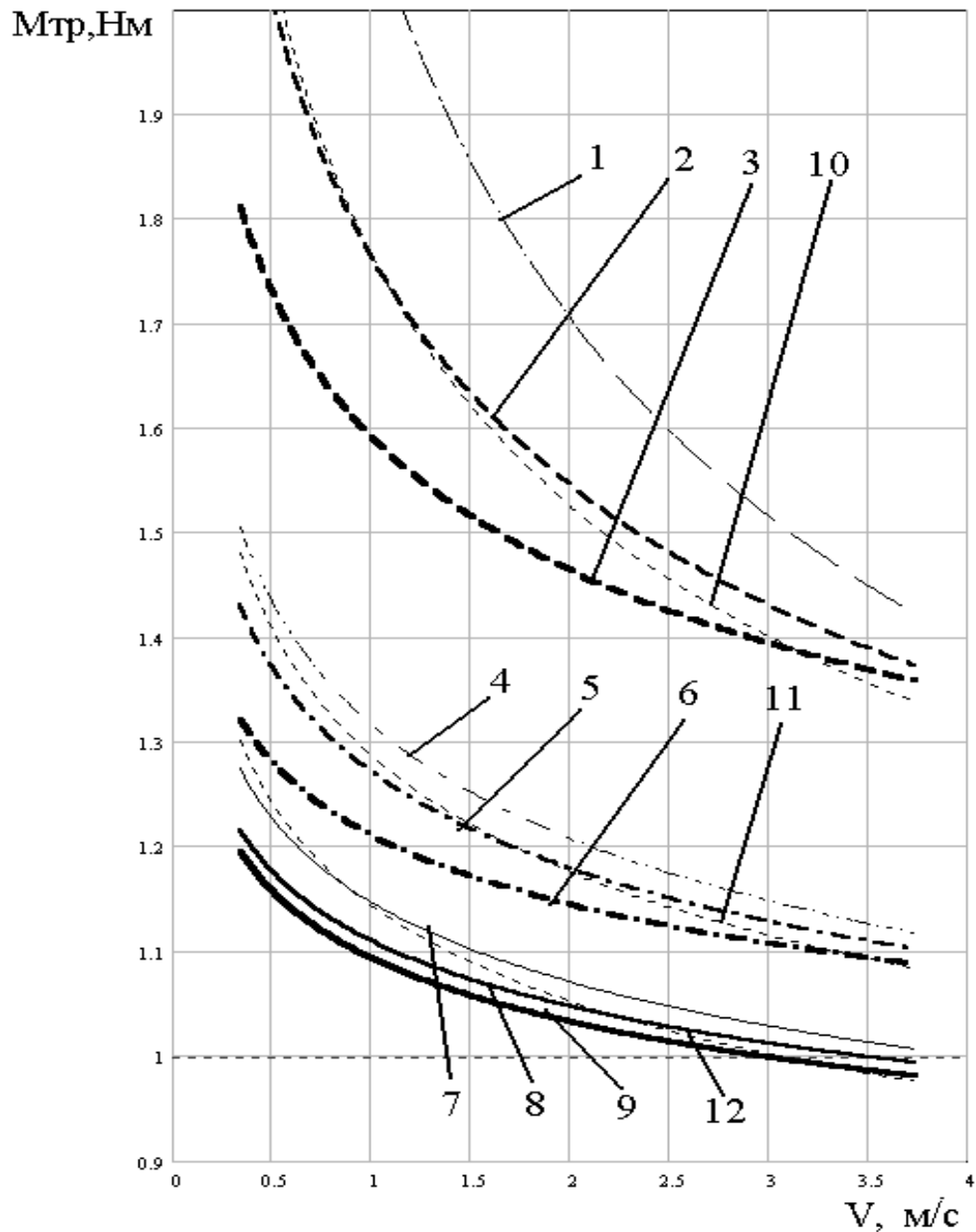
**Рис. 4.12.** Зависимость момента трения от величины скорости скольжения при  $B=0.2$  Тл,  $P_k=2.203$  Н/см для жидкостей на ПЭС-5:

- 1 – МЖ на магнетите (МЖ-1),  $R_z=8.5$ ; 2 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-2),  $R_z=8.5$ ;
- 3 – МЖ на железе (МЖ-3),  $R_z=8.5$ ; 4 – МЖ на магнетите (МЖ-1),  $R_z=2.5$ ;
- 5 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-2),  $R_z=2.5$ ; 6 – МЖ на железе (МЖ-3),  $R_z=2.5$ ;
- 7 – МЖ на железе (МЖ-1),  $R_z=0.6$ ; 8 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-2),  $R_z=0.6$ ;
- 9 – МЖ на железе (МЖ-3),  $R_z=0.6$ ; 10 – ПЭС-5 без магнитного наполнителя,  $R_z=8.5$ ;
- 11 – ПЭС-5 без магнитного наполнителя,  $R_z=2.6$
- 12 – ПЭС-5 без магнитного наполнителя,  $R_z=0.6$



**Рис. 4.13.** Зависимость момента трения от величины скорости скольжения при  $B=02$  Тл,  $P_k=2.203$  Н/см для жидкостей на масле  $M_6, 10\Gamma_2K$ :  
 1 – МЖ на магнетите (МЖ-4),  $Rz=8.5$ ; 2 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-5),  $Rz=8.5$ ;  
 3 – МЖ на железе (МЖ-6),  $Rz=8.5$ ; 4 – МЖ на магнетите (МЖ-4),  $Rz=2.5$ ;  
 5 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-5),  $Rz=2.5$ ; 6 – МЖ на железе (МЖ-6),  $Rz=2.5$ ;  
 7 – МЖ на железе (МЖ-4),  $Rz=0.6$ ; 8 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-5),  $Rz=0.6$ ;  
 9 – МЖ на железе (МЖ-6),  $Rz=0.6$ ;  
 10 –  $M_6, 10\Gamma_2K$  без магнитного наполнителя,  $Rz=8.5$   
 11 –  $M_6, 10\Gamma_2K$  без магнитного наполнителя,  $Rz=2.6$   
 12 –  $M_6, 10\Gamma_2K$  без магнитного наполнителя,  $Rz=0.6$





**Рис. 4.14.** Зависимость момента трения от величины скорости скольжения при  $V=0.2$  Тл,  $P_k=2.203$  Н/см для жидкостей на масле И-Л-А-32:  
 1 – МЖ на магнетите (МЖ-7),  $R_z=8.5$ ; 2 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-8),  $R_z=8.5$ ;  
 3 – МЖ на железе (МЖ-9),  $R_z=8.5$ ; 4 – МЖ на магнетите (МЖ-7),  $R_z=2.5$ ;  
 5 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-8),  $R_z=2.5$ ; 6 – МЖ на железе (МЖ-9),  $R_z=2.5$ ;  
 7 – МЖ на железе (МЖ-7),  $R_z=0.6$ ; 8 – МЖ на магнетите и железе (МЖ-8),  $R_z=0.6$ ;  
 9 – МЖ на железе (МЖ-9),  $R_z=0.6$ ;  
 10 – И-Л-А-32 без магнитного наполнителя,  $R_z=8.5$   
 11– И-Л-А-32 без магнитного наполнителя,  $R_z=2.6$   
 12– И-Л-А-32 без магнитного наполнителя,  $R_z=0.6$

С увеличением чистоты обработки поверхности твердого контртела уменьшение  $M_{тр}$  проявляется в меньшей степени. При малых скоростях скольжения, порядка 1–1.5 м/с, существует значительное различие моментов трения для МЖ на магнетите и МЖ на карбонильном железе, уменьшающееся по мере увеличения чистоты обработки поверхности. С ростом скорости скольжения кривые для МЖ с различными магнитными наполнителями сближаются. При малых скоростях скольжения характеристики  $M_{тр}$  для чистых жидкостей – носителей практически совпадают с характеристиками для МЖ на карбонильном железе с магнетитом. С ростом скорости скольжения происходит уменьшение момента трения для чистых смазок. При скорости скольжения порядка 3–3.5 м/с момент трения для чистых смазок становится меньше  $M_{тр}$  для МЖ на карбонильном железе.

Такой характер кривых может быть объяснен следующим образом. При малых скоростях скольжения смазочный материал находится преимущественно в области впадин микронеровностей. При этом трение преимущественно происходит по вершинам выступов, на которых магнитными силами удерживаются частицы магнитного наполнителя.

Здесь значительное влияние на величину  $M_{тр}$  может оказывать механизм перекачивания частиц. С ростом скорости скольжения под действием гидродинамических процессов в области трения образуются зоны раскрытия стыка и проникновение смазочного материала в зону контакта. Теперь некоторые выступы микронеровностей оказываются в слое смазочного материала. Дальнейшее возрастание скорости скольжения приводит к увеличению площади областей жидкостного контакта. При увеличении скорости скольжения в сужающейся части пленки смазки (зона входа) будет создаваться гидродинамический клин.

Переход к жидкостному режиму трения, имеющий место при скольжении эластомера по твердой поверхности в присутствии смазки проявляется на каждом выступе микронеровности происходит в следствии эффектов макроэластогидродинамики [127]. В отсутствии относительного перемещения, либо при низких скоростях скольжения тел трения под действием контактного усилия происходит выдавливание смазки на вершинах выступов микронеровностей. В теории макроэластогидродинамики рассматривается слой смазки на вершинах микронеровностей. Именно изменение толщины пленки на вершинах выступов в следствии гидродинамических эффектов является важнейшим условием уменьшения момента трения. Для грубо обработанных поверхностей прирост положительного давления на передних склонах выступов и снижение давления на задних склонах выступов будет влиять на процесс скольжения по ним эластичного тела. Влияние прироста положительного давления намного превосходит влияние отрицательного давления, поэтому результирующая сила реакции будет стремиться разделить элементы трения

В слое жидкости конфигурация частиц теряет свое значение. Основное влияние на  $M_{тр}$  начинает оказывать вязкость смазочной среды. Именно снижением вязкости может быть обусловлено уменьшение  $M_{тр}$  для чистых смазок при росте скорости скольжения.

## 4.2. Исследование износа элементов трения в присутствии магнитной жидкости

Эксперименты по определению износа эластомерного элемента трения проводились на экспериментальной установке, описанной в п. 1.

В качестве эластомерного элемента трения применялось резиновое кольцо. Твердый элемент трения имел шероховатость поверхности  $Rz=8.5$  мкм,  $Rz=0.6$  мкм. В качестве смазочного материала применялись МЖ на ПЭС с карбонильным железом и МЖ на ПЭС с магнетитом, а так же чистый ПЭС. Испытания проводились в течение 60 минут. Величина магнитной индукции составляла 0.2 Тл. Частота вращения твердого тела трения – 600 об/мин (скорость относительного скольжения образцов – 1.7 м/с).

Эксперименты проводились по следующей методике. Эластомерный элемент трения в течение 10 с промывался в спирте и взвешивался на аналитических весах. С твердого элемента трения при помощи технической салфетки, смоченной в спирте удалялись продукты износа и остатки смазки. Аналогично п. 1 устанавливалась необходимая величина магнитной индукции и контактного давления. В область трения помещался смазочный материал. Приводной электродвигатель включался в сеть, и при помощи комплектного привода б (рис. 4.1) устанавливалась скорость вращения подвижного элемента трения. По истечении времени эластомерный элемент трения промывался в спирте, просушивалось до полного испарения спирта и повторно взвешивался.

Результаты экспериментов приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6. Определение износа эластомерного материала

№	Тип смазки	Магнитная индукция, Тл	Шероховатость поверхности твердого тела трения $Rz$ , мкм	Контактное давление, Н/см	Масса элемента до испытаний, г	Масса элемента после испытаний, г	Износ элемента (по отношению к массе кольца до испытаний), %
1	ПЭС	-	8.5	2.5	5.33	5.28	0.938
2	ПЭС с	0	8.5	2.5	5.16	5.11	0.968

## Разработка комбинированных магнитожидкостных уплотнений пожарной техники и исследование их триботехнических характеристик

№	Тип смазки	Магнитная индукция, Тл	Шероховатость поверхности твердого тела трения Rz, мкм	Контактное давление, Н/см	Масса элемента до испытаний, г	Масса элемента после испытаний, г	Износ элемента (по отношению к массе кольца до испытаний), %
	карбонильным железом	0.2	8.5	2.5	5.03	4.98	0.994
3	ПЭС с магнетитом	0	8.5	2.5	5.23	5.18	0.956
		0.2	8.5	2.5	5.45	5.39	1.11
4	Без смазки	-	8.5	2.5	5.26	4.8	8.752
5	Без смазки	-	8.5	1	5.09	4.79	5.768
6	Без смазки	-	0.6	2.5	5.13	5.07	1.169

При шероховатости поверхности  $Rz=0.6$  мкм и контактном давлении 2.5 Н/см, а также при шероховатости поверхности  $Rz=8.5$  мкм и контактном давлении 1 Н/см в присутствии смазочного материала (ПЭС, магнитные жидкости) износ эластомерного элемента трения определить не удалось.

При  $Rz=8.5$  мкм и контактном давлении 2.5 Н/см в присутствии смазочного материала происходит значительное уменьшение износа эластомерного элемента трения. Величина износа практически не зависит от смазочного материала.

### 4.3. Выводы к главе 4

1. В присутствии магнитной жидкости при наложении магнитного поля момент трения в паре резина – металл уменьшается на 3–10 % по сравнению с чистой жидкостью-носителем.

2. При увеличении величины магнитной индукции от 0 до 0.2–0.25 Тл для всех исследованных МЖ момент трения уменьшается на 6–8 %. При дальнейшем увеличении индукции уменьшение момента трения крайне незначительно.

3. С уменьшением шероховатости поверхности твердого тела снижается интенсивность уменьшения момента трения (при прочих равных условиях  $M_{тр}$  уменьшается на меньшую величину)

4. Для магнитных жидкостей с магнитным наполнителем, имеющим шарообразную конфигурацию частиц (железо) момент трения меньше на 1–5 % по сравнению с МЖ на магнитном наполнителе, имеющем игольчатую конфигурацию (магнетит).

5. Влияние конфигурации частиц магнитного наполнителя на  $M_{тр}$  уменьшается с уменьшением шероховатости поверхности твердого тела.

6. При увеличении контактного усилия для шероховатости поверхности твердого тела  $Rz=2.6$  мкм влияние на  $M_{тр}$  конфигурации частиц магнитного наполнителя уменьшается.

7. С увеличением скорости скольжения влияние на момент трения конфигурации частиц магнитного наполнителя уменьшается.

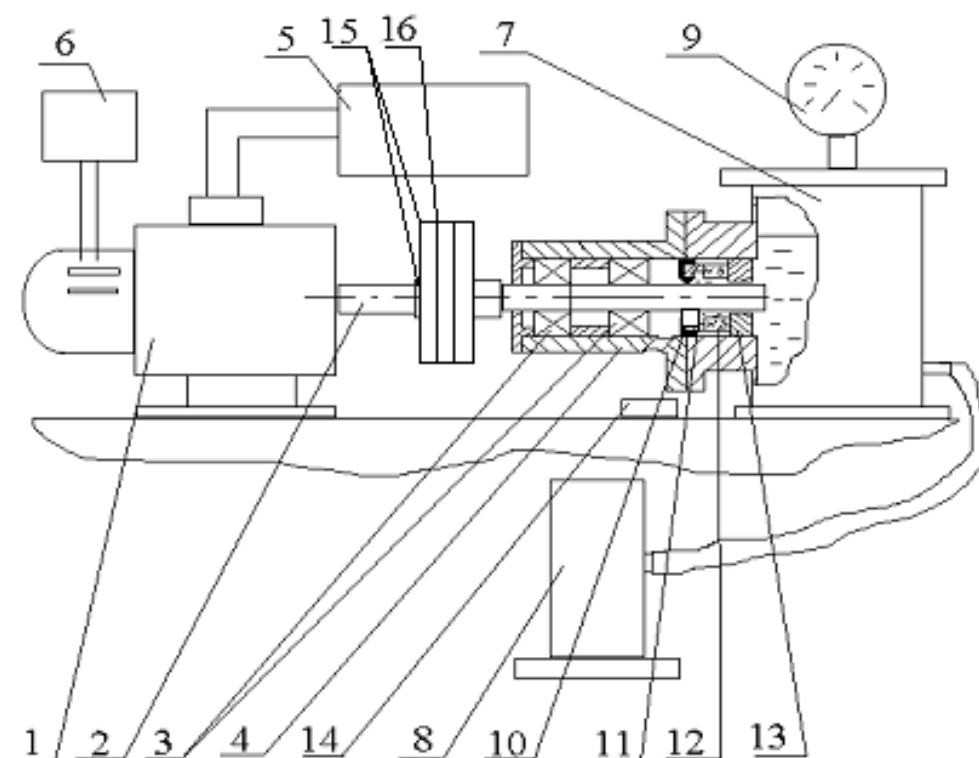
8. При увеличении скорости скольжения выше 3–3.5 м/с момент трения в присутствии магнитной жидкости возрастает по сравнению с чистой жидкостью-носителем.

## ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ И РАЗРАБОТКА КМЖУ

### 5.1. Исследование герметичности КМЖУ

Основными параметрами, определяющими рабочие качества уплотнения являются удерживаемый перепад давлений и отсутствие утечек. Именно эти параметры определялись в ходе эксперимента.

Исследования герметичности комбинированного уплотнения проводились на специальной экспериментальной установке (рис. 5.1, 5.3 а).



**Рис. 5.1.** Установка для исследования герметичности уплотнений

Установка работает следующим образом. Вращение от приводного электродвигателя 1 передается на вал 2 посредством муфты. Вал 2 установлен в подшипниках качения 3, закрепленных в корпусе установки 4, выполненного из немагнитного материала. Регулирование скорости вращения приводного электродвигателя 1 осуществляется при помощи комплектного электропривода 5 типа БУ3509-322У4. Измерение скорости вращения осуществляется вольтметром 7, подключенным к тахогенератору, установленному в корпусе приводного

электродвигателя 1. Корпус установки 4 прикреплен к баку 8, внутри которого помещается герметизируемая среда. Крышка бака а так же его соединение с корпусом установки уплотнены при помощи прокладок. К баку с помощью шланга присоединен насос 9, служащий для создания избыточного давления внутри бака. На крышке бака установлен манометр 9, по показаниям которого определяется давление уплотняемой среда. Уплотнительное устройство устанавливаемое в корпусе 4 включает в себя манжетное уплотнение 10 без пыльника по ГОСТ 8752-79, с диаметром рабочей кромки  $\Phi$  20мм, соответствующем диаметру вала 2 установки. В пространстве между наружной кромкой манжеты и пружиной помещается магнитопроводящий элемент 11, к которому примыкает постоянный магнит 12. Полюсная приставка 13, примыкающая к постоянному магниту с противоположной манжете стороны обеспечивает замыкание магнитного потока через вал установки. Магнитная жидкость помещается в область рабочей кромки уплотнения и удерживается там магнитными силами. Под полюсной приставкой 12 МЖ отсутствует. Проникающий через герметизатор уплотняемый материал через отверстие в корпусе установки 4 отводится в емкость 14. Фотография установки представлена на рис. 5.2 а.

Эксперименты по определению удерживаемого уплотнением перепада давлений проводились по следующей методике:

1. Уплотнительное устройство заправляется магнитной жидкостью.
2. Включается питание приводной электродвигателя и при помощи привода устанавливается необходимая скорость вращения.
3. Давление в баке повышается до тех пор, пока не произойдет пробой уплотнения, фиксируемый визуально по утечке уплотняемой среды.

Эксцентриситет вала составлял 0.12 мм.

Испытания повторяются троекратно для каждой скорости вращения.

Эксперименты проводились как для комбинированного уплотнения в присутствии МЖ (рис. 5.2 г), так и для манжетного уплотнения, смазывание рабочей кромки которого осуществлялось уплотняемой средой. Величина магнитной индукции в рабочей области манжетного уплотнения составляла 0.22 Тл.

Исследовались так же традиционное магнитожидкостное уплотнение, имеющее одну рабочую полюсную приставку рис. 5.2 б, е и магнитожидкостное уплотнение, защищенное манжетой рис. 5.2 в, д.

В ходе эксперимента в качестве уплотняемой среды использовалось моторное масло М6<sub>3</sub>10<sub>2</sub>К.

На рис. 5.3 представлены полученные в ходе экспериментов зависимости удерживаемого перепада давлений от скорости вращения вала для традиционного и комбинированного манжетного уплотнения.

При частоте вращения не превышающей 600 об/мин перепад давлений, удерживаемый как традиционным, так и комбинированным уплотнением находится в пределах 0.07–0.04 Мпа, что соответствует значениям, рекомендованным для применения стандартных манжет. С увеличением частоты вращения

## Разработка комбинированных магнитожидкостных уплотнений пожарной техники и исследование их триботехнических характеристик

происходит уменьшение удерживаемого перепада давлений. При этом различие величин удерживаемого перепада давлений для традиционной манжеты и КМЖУ очень незначительны.



**Рис. 5.2.** Установка для определения герметичности КМЖУ:  
а – установка для исследования герметичности уплотнительных устройств,  
б, в – магнитожидкостное уплотнение,  
г – комбинированное манжетное – магнитожидкостное уплотнение,  
в, д – МЖУ, защищенное манжетой

Снижение удерживаемого перепада давлений может быть обусловлено возникновением между кромкой манжеты и валом микрощелей. Для данного диаметра вала и эксцентриситета микрощели, размер которых может значительно влиять на герметичность уплотнения возникают при частоте вращения порядка 600 об/мин.



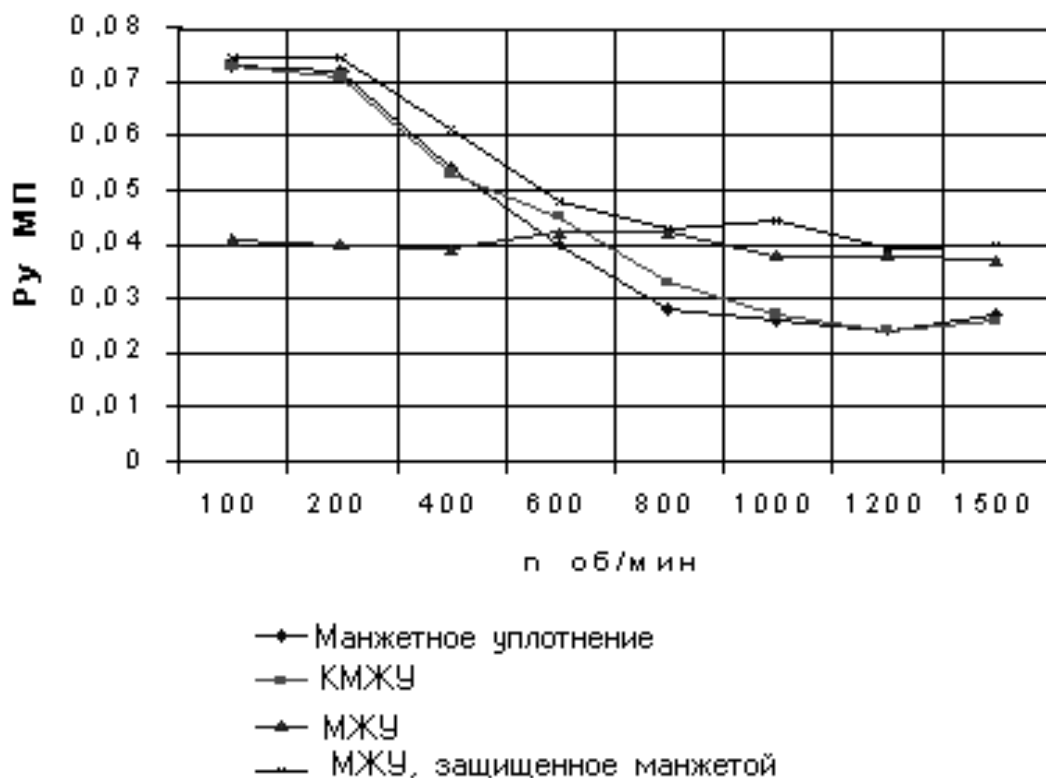


Рис. 5.3. Зависимость критического перепада давлений от скорости вращения вала

Наличие магнитной жидкости под рабочей кромкой практически не оказывает влияния на величину удерживаемого перепада давлений.

Перепад давлений, удерживаемый традиционным магнитожидкостным уплотнением составил порядка 0,05 МПа и практически не изменялся с ростом частоты вращения вала (рис. 5.3). Для защищенного манжетой магнитожидкостного уплотнения в интервале частоты вращения вала 100–400 об/мин удерживаемый перепад давлений составил 0,068–0,07 МПа, что соответствует  $\Delta P$  манжетного уплотнения. С увеличением частоты вращения удерживаемый перепад давлений снижался до величины 0,05 МПа и оставался практически постоянным. Величина удерживаемого перепада давлений при частоте вращения вала превышающей 600 об/мин равна величине  $\Delta P$ , удерживаемого магнитожидкостным уплотнением. Поэтому, можно утверждать, что при низких частотах вращения перепад давлений удерживается манжетным уплотнением, а при нарушении его герметичности в работу включается магнитожидкостное уплотнение.

Эксперименты, направленные на определение герметичности уплотнений проводились на этой же экспериментальной установке. Критерии ценки герметичности различны. Применяют следующие оценки герметичности: качественную («герметично», «негерметично»), количественную (определение величины

утечки уплотняемой среды) и оценку интенсивности утечки уплотняемой среды при помощи специальных приборов - течеискателей.

В ходе проведенных испытаний определялась величина утечки уплотняемой среды при различных частотах вращения и перепаде давлений в течение 120 мин. работы.

Величина утечки оценивалась путем подсчета количества капель уплотняемой среды, проникшей через уплотнение и взвешиванием емкости 9. Взвешивание производилось на весах типа NAGEMA OWALABOR 34003.

КМЖУ полностью сохраняло герметичность при частоте вращения 200 об/мин и перепаде давлений 0.06 МПа. Утечка через традиционное уплотнение составила 46 мг (2 капли).

При частоте вращения 600 об/мин и перепаде давлений 0.04 МПа через традиционное уплотнение произошла утечка уплотняемой среды, равная 162 мг (7 капель), что удовлетворяет классу негерметичности 2–2. Такая утечка характерна для 90 % выпускаемых промышленностью манжетных уплотнений [1]. При этих условиях утечки через уплотнение с магнитной жидкостью полностью отсутствовали.

При частоте вращения 1200 об/мин и перепаде давлений 0.015 МПа утечки через КМЖУ отсутствовали. При этих же условиях через традиционное уплотнение проникло 255 мг (11 капель) уплотняемой среды.

С увеличением перепада давлений до 0.03 МПа при той же частоте вращения утечки через КМЖУ составили порядка 186 мг (8 капель). Через традиционное уплотнение проникло 487 мг (21 капля) уплотняемой среды.

В статическом режиме при отсутствии перепада давлений (давление создается лишь массой уплотняемой среды) утечка через манжетное уплотнение в течение 30 дней составила 37.8 г. В течение такого же периода времени утечка через КМЖУ полностью отсутствовала.

Как в манжетном, так и в комбинированном уплотнениях утечка уплотняемой среды происходила равномерно в течение всего времени испытаний.

При перепаде давлений 0.04 МПа и частоте вращения вала 1200 об/мин традиционное магнитожидкостное уплотнение полностью сохраняло свою герметичность.

С увеличением перепада давлений до 0.056 МПа происходил скачкообразный пробой уплотнения независимо от частоты вращения вала. При этом наблюдалась утечка уплотняемой среды через уплотнение. Утечка прекращалась при перепаде давлений 0.049 МПа. При повторном увеличении давления выше критической величины пробой повторялся. Величина утечки в этом опыте не измерялась.

В магнитожидкостном уплотнении, защищенном манжетой утечка уплотняемой среды полностью отсутствовала при перепаде давлений 0.06 МПа и частоте вращения 200 об/мин. Герметичность уплотнения так же сохранялась при  $\Delta P=0.04$  МПа и частоте вращения 1200 об/мин.

При перепаде давлений 0.06 МПа и частоте вращения 1200 об/мин через уплотнение появлялась утечка уплотняемой среды, составляющая 371 мг (16 капель). Утечки среды возникали скачкообразно, порциями по 3–5 капель. В ходе испытаний отмечалось 4 утечки.

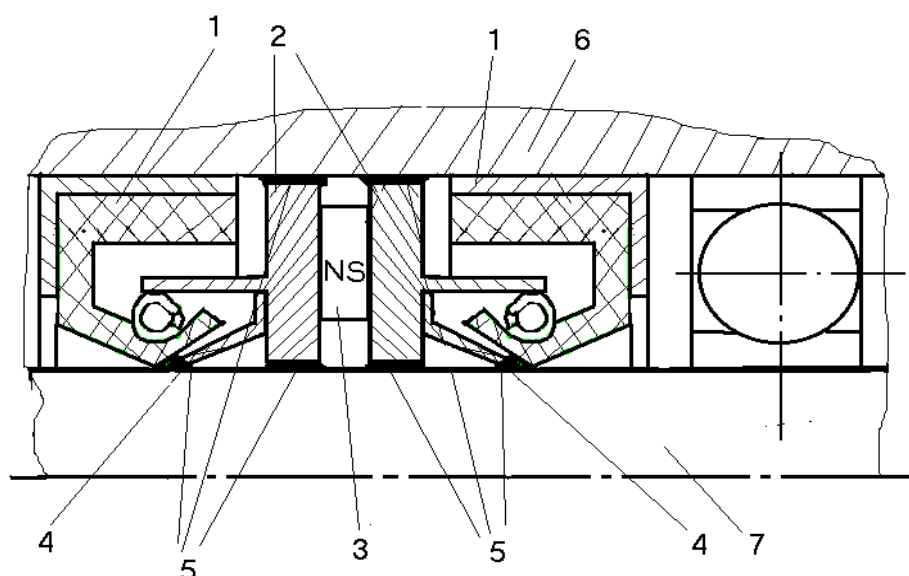
Анализируя результаты эксперимента, можно представить механизм работы такого уплотнения. При перепаде давлений, превышающем критический перепад давлений, удерживаемый магнитожидкостным уплотнением благодаря микрощелям под кромкой манжеты, происходит постепенное увеличение давления в пространстве между уплотнениями. При превышении давления между уплотнениями над критическим значением  $\Delta P$  магнитожидкостного уплотнения происходит его пробой, некоторая утечка уплотняемой среды, и восстановление герметичности. Далее происходит новый цикл увеличения давления и пробоя уплотнения. Непрерывной утечки, как в традиционном магнитожидкостном уплотнении, в этом случае не возникает.

### 5.2. Разработка конструкций КМЖУ

На основании проведенных исследований можно провести модернизацию конструкции уплотнения представленного на рис. 1.9. Расчет магнитной системы этого уплотнения (рис. 3.10) показал, что величина индукции в рабочем зазоре имеет приемлемое значение, порядка 0.3 Тл.

Как отмечалось в главе 3.2, в таком уплотнении величина магнитной индукции под рабочей кромкой манжеты составляет порядка 0.01 Тл. Магнитной силы, обусловленной таким значением индукции недостаточно для удержания МЖ в области трения, поэтому МЖ не оказывает смазочного действия. Однако, проведенные исследования (глава 4) показывают целесообразность применения МЖ для смазки трущихся частей уплотнения.

Чтобы обеспечить концентрацию МЖ в области трения необходимо внести некоторые изменения в конструкцию магнитной системы. К магнитной системе уплотнения, состоящей из постоянного магнита 3 и двух основных полюсных приставок 2 необходимо добавить дополнительные полюсные приставки 4 (рис. 5.4). Дополнительные полюсные приставки 4 устанавливаются таким образом, чтобы обеспечить замыкание части магнитного потока в непосредственной близости от трущихся рабочих кромок манжет 1. В этом случае можно ожидать, что магнитная жидкость будет концентрироваться как в рабочих зазорах между основными полюсными приставками, корпусом и валом, так и в области трения манжет и вала.



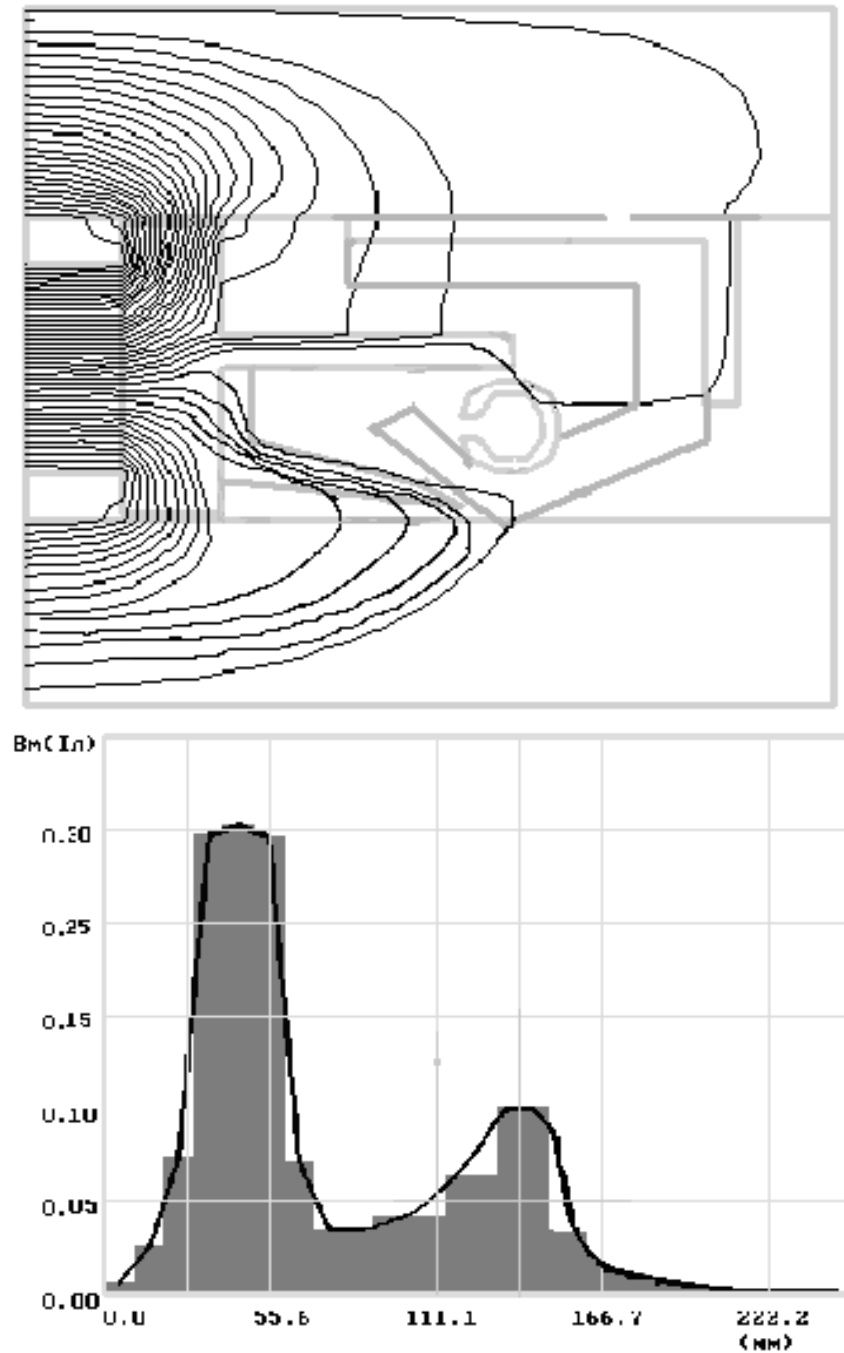
**Рис. 5.4.** Комбинированное магнитожидкостное уплотнение:  
1 – манжеты, 2 – основные полюсные приставки, 3 – постоянный магнит,  
4 – дополнительные полюсные приставки, 5 – магнитная жидкость,  
6 – корпус, 7 – вал

В результате проведенного при помощи метода конечных элементов магнитного расчета данной конструкции была получена картина магнитного поля и кривая распределения магнитной индукции по поверхности вала (рис. 5.5).

Как видно из рис. 5.5 при данной конфигурации магнитной системы под рабочей кромкой манжетного уплотнения создается область концентрации магнитных силовых линий. Величина индукции в этой области составляет порядка 0.1 Тл, что достаточно для удержания МЖ.

Для герметизации объемов с низким и средним давлением предложена новая конструкция комбинированного торцового магнитожидкостного уплотнения, представленная на рис. 5.6 а.

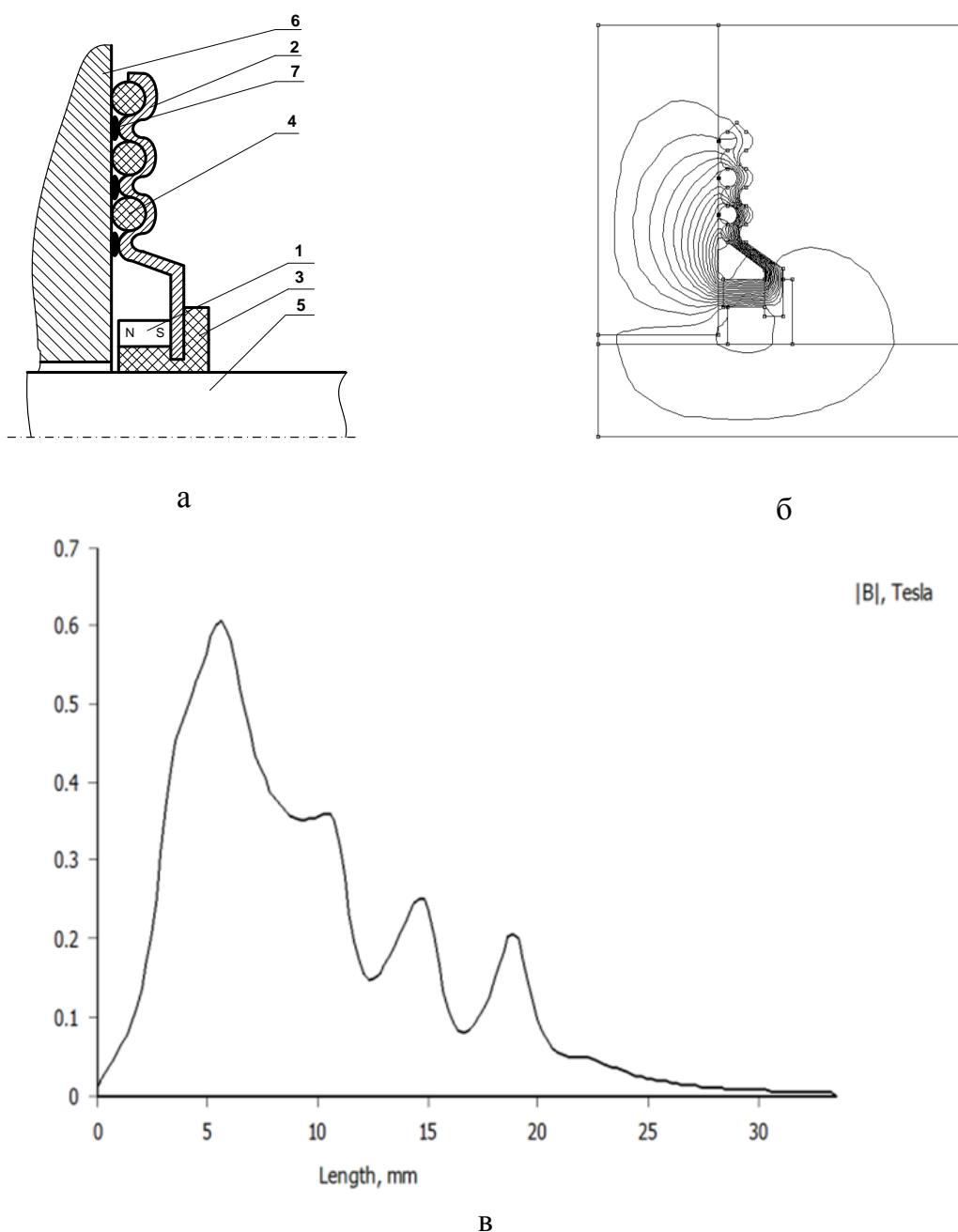
Уплотнение состоит из кольцевого постоянного магнита 1, подвижного магнитопровода волнообразной формы 2, примыкающего к постоянному магниту 1. Кольцевой постоянный магнит 1 и подвижный магнитопровод волнообразной формы 2 закрепляются на втулке из эластомерного материала 3. Во впадины подвижного магнитопровода волнообразной формы 2 устанавливаются кольца из немагнитного материала с низким коэффициентом трения 4. Втулка из эластомерного материала 3 устанавливается на валу уплотняемого устройства 5. В качестве неподвижного магнитопровода 6 используется деталь корпуса уплотняемого устройства. Магнитная жидкость 7 помещается в зазор между выступами подвижного магнитопровода волновой формы 2 и неподвижным магнитопроводом 6.



**Рис. 5.5.** Картина магнитного поля и кривая распределения магнитной индукции по поверхности вала

В представленном уплотнении кольца из немагнитного материала с низким коэффициентом трения препятствуют изменению зазора между корпусом уплотняемого устройства и выступами подвижного магнитопровода под действием магнитных сил, чем обеспечивается необходимая величина рабочего зазора уплотнения. В тоже время возникающие магнитные силы препятствуют перемещению подвижного магнитопровода в направлении корпуса.

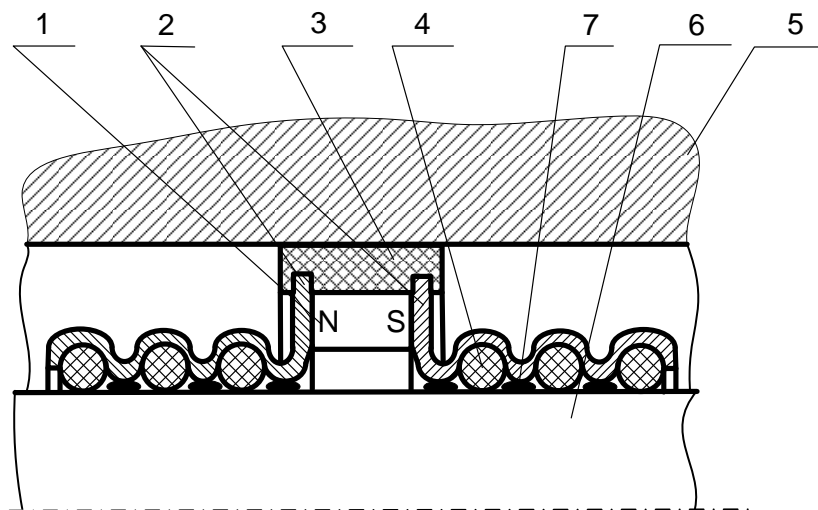
Результаты магнитного расчета уплотнения представлены на рис. 5.6 б, в. Магнитный расчет производился с использованием программного комплекса, реализующего метод конечных элементов для расчета магнитных задач. Как видим из рис. 1 б линии магнитного потока концентрируются в рабочей области уплотнения. Максимальная величина магнитной индукции достигает 0.2 Тл, что достаточно для удержания магнитной жидкости в рабочей зоне уплотнения.



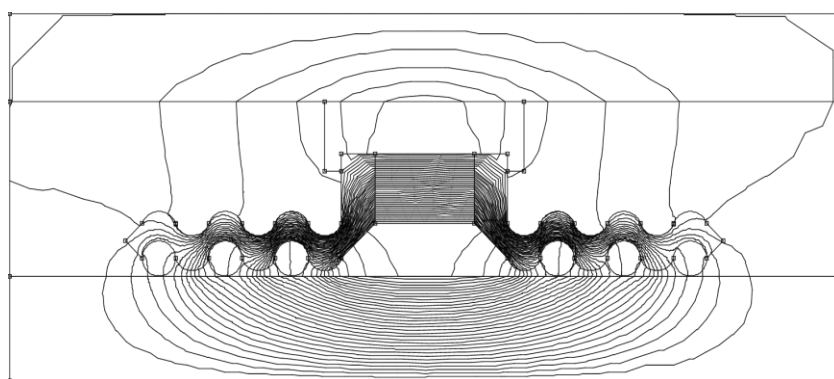
**Рис. 5.6.** Комбинированное торцовомагнитожидкостное уплотнение:  
а – схема уплотнения; б – картина магнитного поля; в – график  
распределения магнитной индукции в рабочей области уплотнения

Несмотря на решение проблемы удержания магнитной жидкости в зоне трения и обеспечение постоянства рабочего зазора такое уплотнение не может применяться для герметизации радиальных зазоров.

На рис. 5.7 а представлена схема радиального комбинированного магнито-жидкостного уплотнения вала.



а



б

**Рис. 5.7.** Радиальное комбинированное магнито-жидкостное уплотнение вала:  
а – схема уплотнения; б – картина магнитного поля

Уплотнение состоит из кольцевого постоянного магнита 1, магнитопроводов волнообразной формы 2, примыкающих к постоянному магниту 1. Кольцевой постоянный магнит 1 и магнитопроводы волнообразной формы 2 закрепляются во втулке из эластомерного материала 3. Во впадины магнитопроводов волнообразной формы 2 устанавливаются кольца из немагнитного материала с низким коэффициентом трения 4. Втулка из эластомерного материала 3 устанавливается в корпус уплотняемого устройства 5. В качестве подвижного маг-

нитопровода 6 используется вал уплотняемого устройства. Магнитная жидкость 7 помещается в зазор между выступами магнитопроводов волновой формы 2 и валом 6.

Аналогично предыдущей конструкции, кольца из немагнитного материала с низким коэффициентом трения препятствуют изменению зазора между валом и выступами магнитопроводов возникающим в результате несоосности вала, вибраций и по другим причинам. При этом перемещения магнитопроводов компенсируются за счет упругих свойств втулки из эластомерного материала.

Результаты магнитного расчета уплотнения представлены на рис. 5.7 б. Как видно из картины магнитного поля линии магнитного потока в рабочем зазоре концентрируются на волнообразных выступах магнитопроводов волнообразной формы, обращенных к валу. Величина магнитной индукции в рабочем зазоре составляет 0.25 Тл. На основании приведенных данных можно утверждать, что уплотнение будет обеспечивать удержание определенного перепада давлений, зависящего от количества волнообразных выступов и параметров магнитной системы. Удерживаемая в рабочей области уплотнения магнитная жидкость так же будет выступать в качестве смазки колец из немагнитного материала.

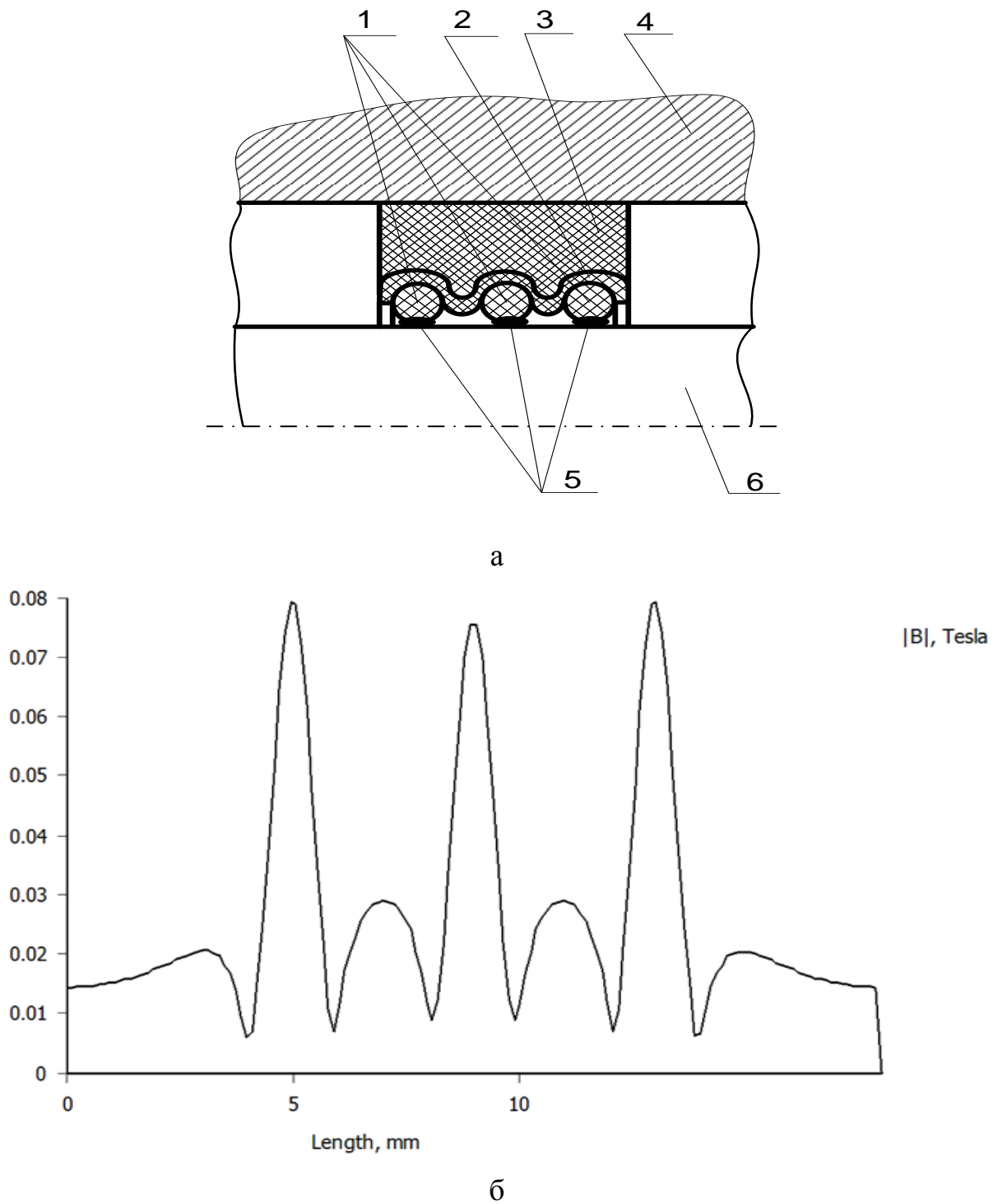
Особенностью предложенных конструкций комбинированных магнитожидкостных уплотнений является необходимость использования постоянного магнита в качестве источника магнитного поля и магнитопроводов для создания магнитного поля в рабочей области уплотнения.

Исключение постоянного магнита и магнитопроводов из конструкции уплотнения позволит значительно уменьшить его габариты при сохранении основных рабочих характеристик.

На рис. 5.8 а представлена конструкция комбинированного магнитожидкостного уплотнения в сборе. Уплотнение содержит кольца из магнитоэластомерного материала 1, сепаратор 2, изготовленный из пластмассы и имеющий кольцевые волнообразные изгибы круглого профиля, установлен во втулку 3, изготовленную из эластомерного материала, помещенной в корпус 4 уплотняемого устройства. Магнитная жидкость 5 помещается между валом 6 и кольцами из магнитоэластомерного материала 1 и удерживается там магнитными силами.

Возникающие перемещения сепаратора как и в предыдущем случае компенсируются за счет упругих свойств эластомерного материала втулки. Магнитная жидкость концентрируется в зоне контакта колец из магнитоэластомерного материала с валом, где величина магнитной индукции составляет 0.08 Тл, образуя герметичные кольцевые пробки. Перепад давлений, удерживаемый уплотнением, определяется суммой перепадов всех магнитожидкостных пробок. Так же магнитная жидкость выступает в качестве смазки при трении между кольцами из магнитоэластомерного материала и валом.





**Рис. 5.8.** Комбинированное магнитожидкостное уплотнение:  
а – схема уплотнения; б – кривая распределения магнитной индукции  
в рабочей области

Такое комбинированное магнитожидкостное уплотнение будет иметь меньшие габаритные размеры, по сравнению с представленными выше конструкциями.

### **5.3. Выводы к главе 5**

1. Перепад давлений, удерживаемые КМЖУ, отличается от  $\Delta P$  манжетного уплотнения не более чем на 1–3 %.

2. Комбинированное манжетное-магнитожидкостное уплотнение имеет лучшую герметичность, по сравнению с манжетой. При частоте вращения менее 600 об/мин и перепаде давлений 0.04 МПа КМЖУ полностью сохраняло герметичность, а при увеличении этих параметров утечки не превышали требования стандартов.

3. Для МЖУ, защищенного манжетой при превышении перепада давлений над критическим, отсутствует его полная разгерметизация.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аналитический обзор конструкций уплотнений показал, что наиболее перспективными являются комбинированные магнитожидкостные уплотнения.

В комбинированных манжетных-магнитожидкостных уплотнениях МЖ может выполнять функции уплотняющей среды и смазки рабочей кромки манжеты.

Получена формула по расчету скорости проникновения МЖ в микрощель, возникающую между кромкой манжеты и валом при работе уплотнения. Установлено, что при высоте микрощели 0.1 мм, основное влияние на скорость проникновения жидкости оказывает ее поверхностное натяжение. Для такой величины микрощели скорость проникновения МЖ на ПЭС-5 с магнетитом и карбонильным железом на 10 % по сравнению с чистой жидкостью - носителем.

На основании проведенных численных исследований КМЖУ выбрано комбинированное магнитожидкостное уплотнение, имеющее наиболее рациональную конструкцию магнитной системы. Таким уплотнением является манжета, с помещенным между кромкой и пыльником постоянным магнитом, намагниченным в радиальном направлении.

На основании проведенных расчетов исследовано влияние материалов постоянных магнитов и вала на параметры рабочего зазора КМЖУ. Показано, что при замене феррит - бариевого магнита на самарий - кобальтовый величина индукции в рабочей области возрастает в 3–3.3 раза. Установлено что для валов, изготовленных из конструкционных сталей 20, 40, 30ХГСХА величина индукции в рабочем зазоре практически не изменяется. Для конструкции с немагнитным валом индукция уменьшается в 2.6–2.8 раза.

На основании магнитных расчетов установлено, что нецелесообразно использовать подшипники качения в качестве элемента магнитной цепи КМЖУ.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что в присутствии магнитной жидкости при наложении магнитного поля момент трения в паре резина–металл уменьшается на 3–10 % по сравнению с чистой жидкостью-носителем.

Установлено, что для магнитных жидкостей с магнитным наполнителем, имеющим шарообразную конфигурацию частиц момент трения меньше на 1–5 % по сравнению с МЖ на магнитном наполнителе, имеющем произвольную конфигурацию.

Установлено, что перепад давлений, удерживаемые КМЖУ отличается от  $\Delta P$  манжетного уплотнения не более чем на 1 – 3%, однако КМЖУ обладает по сравнению с манжетой лучшей герметичностью, при перепаде давлений до 0.04 МПа и частоте вращения до 600 об/мин.

Для МЖУ, защищенного манжетой при превышении перепада давлений над критическим отсутствует его полная разгерметизация.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уплотнения и уплотнительная техника : Справочник / А.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.Б. Овандер и др.; Под общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. - М.: Машиностроение, 1986.- 464 с., ил.
2. Голубев А.И., Кукин Г.М., Лазарев Г.Е., Чичинадзе А.В. Контактные уплотнения вращающихся валов. - М.: Машиностроение, 1976.- 264 с.
3. Комиссар А.Г. Уплотнительные устройства опор качения.- М.: Машиностроение, 1980. - 200 с.
4. Neale M.J. Tribology handbook. Butterwarths, - 1973.
5. Гафт Я.З., Аношко В.А. Сальниковые уплотнения динамических насосов. Обзорная информация. Насосостроение. Сер. ХМ - 4. - М.: ЦИНТИ химнефтемаш, 1980. - 50 с.
6. Голубев А.И. Современные уплотнения вращающихся валов.- М.: Машгиз. 1963. - 215 с.
7. Аврущенко Б.Х. Резиновые уплотнители . - Л.: Химия, 1973. - 136 с.
8. Нарышкин В.Н., Коросташевский Р.В. Подшипники качения. - М.: Машиностроение, 1984. - 280 с.
9. Явленский К.Н. Приборные шариковые подшипники. - М.: Машиностроение, 1981. - 351 с.
10. Ануриев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: ВЗ - ХТ. Т.3. - М.: Машиностроение, 1992. - 720 с., ил.
11. Краев М.В., Овсяников В.В., Шапиро А.С. Гидродинамические радиальные уплотнения высокооборотных валов. - М.: Машиностроение, 1976. - 104 с.
12. Щац Я.Ю. Уплотнения подшипниковых узлов. - М. - Киев; Машгиз, 1963, - 144 с.
13. Васильцов Э.А. Бесконтактные уплотнения. - Л.: Машиностроение, 1974. - 160 с.
14. Сеницын В.В. Подбор и применение пластических смазок. - М.: Химия, 1974. - 415 с.
15. Фукс И.Г. Пластические смазки. - М.: Химия, 1972. - 158 с.
16. Икрамов У. Механизм и природа абразивного изнашивания. - Ташкент: "Фант", 1979. - 78 с.
17. Буренин В.В., Дронов А.П. Конструкция бесконтактных уплотнений вращающихся валов. - М.: ЦИНТИ химнефтемаш, 1982. - 37 с.
18. Лынный Н.В. Техника герметизации. - М., 1978. - 63 с.
19. Косенко Ю.А. Конструкции торцовых уплотнений. - М., 1976. - 41 с.
20. Фертман В.Е. Магнитные жидкости: Справ. Пособие. - Мн: Высш.шк., 1988. - 184 с., ил.
21. Магнитные жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалёв, Н.К. Мышкин и др.: Под общ. Ред. Д.В. Орлова, В.В. Подгоркова. - М.: Машиностроение, 1993. - 272 с.
22. Аврамчук и др. Герметичный ввод вращательного движения с магнитожидкостным уплотнением. ПТЭ, № 3, 1975 - 117 с.
23. Вонсовский С.В. Магнетизм. - М.: Наука, 1971 - 1032 с.

24. Шлиомис М.И. Магнитные жидкости. Успехи физических наук. 1974. - № 112. Вып. 3. - с. 427 - 457
25. Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости. - М.: Химия, 1989. - 240 с.
26. Майоров М.М., Блум Э.Я. Эффекты вращения коллоидных частиц в магнитных жидкостях // Материалы 8 Международной конференции по МГД - преобразование энергии. - М., 1983. - с. 145 - 148.
27. Диканский Ю.И. Магнитная гидродинамика. - М., 1984. - с. 123 - 124.
28. Шведков В.Я., Ровинский Д.Я., Зазуля В.Д., Браун Э.Д. Словарь-справочник по трению, износу и смазке машин. Киев.: Наукова думка, 1979. - 188 с.
29. Братухин А.Г., Казанов В.А. Отчёт конструирования и эксплуатации электронно-лучевых сварочных установок с локальными камерами с уплотнениями на основе ферромагнитной жидкости: Оборудование // Сварочное производство. - 1996. - № 5 - с. 25 - 27.
30. А.С. 870815 СССР, МКИ<sup>3</sup> F 16 Г 15 / 40. Высокоскоростное МЖУ с вращающейся наружной поверхностью зазора.
31. U.S. Patent 4, 435, 026 Veeshaped magnetic / centrifugal seal and method of operation.
32. U.S. Patent 4, 527, 802 Integral magnetic fluid centrifugal high speed gas seal and method.
33. Краков В.С., Рахуба В.К., Самойлов В.Б. О предельных возможностях традиционного магнитожидкостного уплотнения // Магнитная гидродинамика, 1981. №1. - с. 140 - 142.
34. Бибик Е.Е. Взаимодействие частиц в феррожидкостях // Физические свойства и гидродинамика дисперсных ферромагнетиков. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1977. - с. 3 - 19.
35. Frictionless Shaft Seal Excludes Dirt and Moisture. - Mach. Des., 1979, 51 № 20 - P 107.
36. Сборник научных трудов ИСХИ: Вопросы применения ферромагнитных жидкостей в сельскохозяйственной технике. - Ленинград. 1986. - 79 с.
37. Климов К.И. Антифрикционные пластичные смазки. - М.: Химия, 1983. - 158 с.
38. Ищук Ю.Л., Чередниченко Г.И. Пластичные смазки // Материалы II Всесоюзной научно-технической конференции, г. Бердянск. - Киев, 1975. - с. 3 - 6.
39. Вавилов В.В., Вайнштон В.В., Гуреев А.А. Автомобильные пластичные смазки. - М.: Транспорт, 1986. - 142 с.
40. Голубев А.И. Торцовые уплотнения вращающихся валов. - М.: Машиностроение, 1974. - 214 с.
41. Елизаров П.С., Деркач Н.Б., Крутик Э.К., Никомаров С.С., Лунёв А.В. Магнитное уплотнение вращающегося вала. Авторское свидетельство № 368434 - открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, 1973, № 9, - с. 127.
42. Кудряков Б.А., Кузина Н.А. и др. Тракторы и сельскохозяйственные машины. - М.: Машиностроение, 1988. - с. 48 - 51.
43. Хрусталёв А.А., Булкин В.А., Дулатов Ю.А. Уплотнения вращающихся валов. - Казань, 1978. - 39 с.

## Разработка комбинированных магнитожидкостных уплотнений пожарной техники и исследование их триботехнических характеристик

---

44. Дунаев П.Ф., Лёликов О.П. Конструирование узлов и деталей машин. - М.: Высш. шк., 1985 - 416 с., ил.
45. Макаров Г.В. Уплотнительные устройства. - Л.: Машиностроение, 1973. - 288 с.
46. Бартенев Г.И., Лаврентьев В.В. О коэффициенте трения резины. // Каучук и резина. - М., 1969. - с. 20 - 23.
47. Кононенко А.П., Голубев Ю.Н. Уплотнительные устройства машин и машиностроительного оборудования. - М.: Машиностроение, 1984. - 103 с.
48. Коморницкий-Кузнецов В.К. Исследование фрикционных характеристик уплотнений вращающихся валов. - Автореферат. - М., 1973. - 19 с.
49. Манжеты резиновые армированные для валов конструкция и исполнение. Каркасы для манжет резиновых армированных. Проекты отраслевых стандартов. - М., 1971. - 71 с.
50. Повышение качества герметизирующих соединений: Тез. докл. Всесоюзной конференции. - Пенза: ПДНТП, 1989. - 81 с.
51. Клетеник Г.С., Ратнер С.Б., Раков Г.М. Об износе резины со смазкой. - М., 1967. - № 10. - с. 32 - 35.
52. Ратнер С.Б. Трение резины: труды Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах. - М.: изд. АН СССР, 1960. - 163 с.
53. Резниковский М.М., Бродский Г.И. Особенности механизма истирания высокоэластичных материалов // Фрикционный износ резины: сб. - М. - Л.: Химия, 1964. - 133 с.
54. Огородникова Г.Ф., Сеницын В.В. О механизмах набухания резины в масле и смазках. - Химия и технология топлив и масел. - 1982. - № 6. - с. 28 - 29.
55. U.S. Patent 4, 171, 818 Dynamic lip seal using ferrofluids as sealant / Lubricant.
56. А.С. 1642160 СССР, МКИ F 16 J 15 / 40.
57. Гольдаде В.А., Неверов А.С., Пинчук Л.С. Магнитоуправляемые материалы для подвижных уплотнений. Трение и износ. - М., 1981. - 712 с.
58. Орлов А.П., Фертман В.Е. Магнитожидкостные уплотнения вращающихся валов. - Преприм. № 8. - Минск, 1979. - 29 с.
59. Баштовой В.Г., Берковский Б.М. Термомеханика ферромагнитных жидкостей. - Магнитная гидродинамика, 1973, № 3 - с. 3 - 14.
60. Бибик Е.Е. Эффекты взаимодействия частиц в дисперсных ферромагнетиках. - Автореферат Л.: 1971. - 25 с.
61. Максимов В.А., Галимзянов И.З., Хадиев М.В. Магнитожидкостные уплотнения вращающихся валов компрессорных машин. Компрессорное машиностроение. Сер ХМ. - 5, М.: ЦИНТИ Химнефтемаш, 1979. - 17 с.
62. Медведев В.Ф., Краков М.С., Васлович А.Н. и др. Отчёт о НИР. Разработка и испытание магнитожидкостных смазывающе-уплотняющих узлов. № 01850012049 Инв. № 0287007136. Ин-т БТИ. - Минск.: 1986. - 76 с.
63. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. - М.: Наука, 1980. - 435 с.
64. Neuringer J.L., Rosensweig R.E. The Ferrohydrodynamics. - Phys. Fluids., 1964, 7, № 12. - P. 1921 - 1931.

65. Смолин В.И. Применение магнитожидкостного уплотнения в нижнем приводе мешалки ферментёра // Материалы II Всесоюзной школы - семинара по магнитным жидкостям. - М.: МГУ, 1981. - с. 133 - 134.
66. Глинка Н.Л. Общая химия. - Л.: Химия, 1988 - 702 с.
67. Исследование возможности создания магнитожидкостных уплотнений для гидрокамер: Отчёт о НИР (заключение) АН БССР. Ин-т ТМО: № ГР 77066579; инв. № 5713094. - Минск, 1982. - 183 с.
68. Ребиндер П.А., Таубман А.Б. Замечания к вопросу об агрегативной устойчивости дисперсных систем. Кол. журн., т. 23, 1961. - с. 359.
69. Ребиндер П.А., Фуке Г.И. Проблемы современной коллоидной химии. - М.: Наука, 1973. - с. 5.
70. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. - М.: Химия, 1982. - 40 с.
71. Авторское свидетельство 1020674 СССР, МКИ 16 15/40.
72. Одзаки К. Магнитожидкостные уплотнения. Пер. с японского. М.: (ВУП), 1991. - с. 2 - 12.
73. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика: Пер. с англ. - М.: Мир, 1989. - 356 с.
74. Кондаков Л.А. Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем. - М.: Машиностроение, 1982. - 216 с.
75. Проблемы современной уплотнительной техники: Пер. с англ. / Под ред. В.Н. Прокофьева, Л.А. Кондакова. М.: Мир, 1967. 482 с.
76. Марцинковский В.А. Гидродинамика и прочность центробежных насосов. М.: Машиностроение, 1970. 272 с.
77. Никитин Г.А. Щелевые и лабиринтные уплотнения гидроагрегатов. М.: Машиностроение, 1982. 135 с.
78. Васильцов Э.А. Бесконтактные уплотнения. Л.: Машиностроение, 1974. 160 с.
79. Марцинковский В.А. Бесконтактные уплотнения роторных машин. М.: Машиностроение, 1980. 200 с.
80. Макаров Г.В. Уплотнительные устройства. 2-е изд. перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1980, 232 с.
81. Поверхностно-активные вещества и дисперсные системы // Методические указания к выполнению лабораторного практикума по курсу "Физика поверхности". Иваново, 1985. - 28 с.
82. Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. - М.: Мир, 1986. - 229 с.
83. Михлин С.Г. Численная реализация вариационных методов. М.: Наука, 1966. - 432 с. Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике. М.: Наука, 1970. - 512 с.
84. Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике. М.: Наука, 1970. - 512 с.
85. Цыбенко А.С., Ващенко Н.Г., Кращук Н.Г., Лавендел Ю.О. Автоматизированная система обслуживания конечно-элементных расчётов. - Киев.: Вища школа, 1986. - 252 с.
86. Тихонов А.И., Казаков Ю.Б., Мостейкис В.С. Интегрированная система генерации двумерной конечно-элементной модели двигателей серии 4П // Современное состояние проблемы и перспективы энергетики и технологии в энергостроении

## Разработка комбинированных магнитожидкостных уплотнений пожарной техники и исследование их триботехнических характеристик

---

( IV Бернардосовские чтения ): Тез.докл. Всесоюзн. научно-техн. конферен. - Иваново.- 1989. - С. 70.

87. Тихонов А.И. Разработка и исследование конструкции неявнополюсных двигателей постоянного тока; Автореф. диссерт. на соиск. уч. ст. канд.техн.наук. - Москва, 1992 - 18 с.

88. Казаков Ю.Б., Михалёв Ю.О., Сайкин М.С. Применение метода конечных элементов для расчёта МЖУ // XII Рижское совещание по магнитной гидродинамике: Тез.докл.- Саласпилс, 1987.-Т.4.- С. 11 - 14.

89. Казаков Ю.Б., Михалёв Ю.О., Сайкин М.С.. Исследование защитных МЖУ методом конечных элементов // Состояние и перспективы развития электротехнологии ( III Бернардосовские чтения ): Тез.докл. Всесоюзн. науч.-техн. конф.- Иваново, 1987.-С.107.

90. Постоянные магниты. Справочник. / Под ред. д.т.н. проф. Пятина Ю.М. - М.: Энергия, 1980. - 488 с.

91. Пятин Ю.М. Проектирование элементов измерительных приборов. - М.: Высшая школа, 1977. - 304 с.

92. Пономарёва О.И. Температурные коэффициенты индукции сплавов кобальта с самарием с тяжёлыми РЗМ // Физика металлов и металловедение.- т.51.- вып.6.- Наука, 1981.- С. 1324 - 1326.

93. Шур.Я.С., Ширяева О.И., Майков В.Г. О температурной стабильности магнитных свойств постоянных магнитов из сплавов редкоземельных элементов с кобальтом // Физика металлов и металловедение.- т.39.- вып.5.- Наука, 1975, С.1118 - 1120.

94. Булыгина Т.И., Бевюрко И.А., Сергеев В.В. Исследование температурной стабильности постоянных магнитов в интервале  $60 \text{ }^{\circ}\text{C} < t < + 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  // Электротехника. -1968.- N 3.- С.43 -51.

95. Martis R. Permanent magnetic materials with low reversible temperature coefficient // IEEE Trans on mag.-1979.- t 15.- N 2.- h 948 - 950.

96. Исследование температурной стабильности высококоэрцитивных постоянных магнитов из сплавов на основе РЗМ // Отчёт о НИР КБ ПМ г. Владимир 1984 - 1985 г. НИР ГО 1840011 - ЗГ76, УДК 621.318.2: 669.85/86: 621.318.8 N гос.регистрации 01.84.0064501, Владимир, 1985.

97. Миткевич А.В. Стабильность постоянных магнитов. - Л.: Энергия, 1971. - 270 с.

98. Рабкин Л.И., Соскин С.А., Эпштейн Б.Ш. Технология ферритов М. –Л Госэнергоиздат, 1962г 360 с.

99. Магниты на основе сплава самарий - кобальт. Технические условия. ТУ 48-0531-329-85. Введ.01.01.86.-Пышменский опытный завод " Гиредмет".

100. Магниты. На основе сплава неодим - железо - бор марки ЧЗ6Р. Технические условия. ТУ 48-0531-384-88. Введ.01.10.88.- Пышменский опытный завод " Гиредмет".

101. Магниты. Неодим - диспрозий - бор + тербий. Технические условия. ТУ 16.586.250 - 86. НПО " Магнетон ", г. Владимир.

102.4 Всесоюзная конференция по постоянным магнитам: Тез.докл. Суздаль, 20 - 23 сентября 1988 г. - М.: Информэлектро, 1988. - 184 с.



- 103.Стрнат К.Дж. Обзор и анализ промышленных магнитов из редко земельных металлов с кобальтом // В кн. Магниты из сплавов редкоземельных металлов с кобальтом. - М.: Металлургия, 1978.- С. 11 - 13.
- 104.Стома С.А., Ремизов В.Е. Использование высокоэнергетических постоянных магнитов в электромеханике // Тр. ВНИИЭМ.-1987.- т. 85.
- 105.Рабинович Ю.М., Сергеев В.В., Потапова Л.В. и др. Эксплуатационные характеристики магнитов из сплавов типа РЗМ-Fe-B // Электротехника.- 1989.- N 11.- 7 0С.21 - 26
- 106.Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. - Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1985.- 302с.
- 107.Корицкий Ю.В., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Справочник по электротехническим материалам. - Л.: Энергия, 1976.- т.3
- 108.Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали.- М.: - Л.: Госэнергоиздатом, 1962.- 360 с.
- 109.Ганзбург Л.Б., Федотов А.И. Проектирование электромагнитных и магнитных механизмов. Справочник. - Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1983. - 364 с.
- 110.Приданцев М.В., Давыдова А.Н., Тамарина И.А. Конструкционные стали. Справочник. - М.: Металлургия, 1980. - 288 с.
- 111.Анурьев В.И. Справочник конструктора - машиностроителя: в 3- х томах, т.3. - М.: Машиностроение, 1982. - 576 с.
- 112.Константинов О.Я. Магнитная технологическая оснастка. - Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1974. - 383 с.
- 113..Барон Ю.М. Магнитно - абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. - Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1986. – 176 с.
114. Разработка и исследование электромеханических магнитожидкостных герметизаторов специального технологического оборудования. Автореферат диссертации на соискания ученой степени кандидата технических наук Сайкин..М.С. М.: Типография МЭИ, 1998
- 115.Патент США 3939081. Смазка, несущая нагрузку.
- 116.Адлер Ю.П., Марков Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1976. - 279 с.
- 117.Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. - М.: Машиностроение, 1981. - 184 с.
- 118.Крассовский С.В., Филаретов Г.Ф. Планирование экспериментов. - Мн.: БГУ, 1982. - 302 с.
- 119.Мельников С.В. и др. Планирование экспериментов в условиях сельскохозяйственных процессов. - Л.: Колос, 1980. - 127 с.
- 120.Феденко Л.Г., Коженцев В.В. Математическая обработка и оформление результатов эксперимента. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977. - 122 с.
- 121.Моделирование и планирование экспериментов: Методическое руководство по проведению экспериментальных исследований при выполнении НИРС. - Красноярск: КПИ, 1981. - 57 с., ил.
- 122.Вознесенский В.А. Статистические методы планирования экспериментов в технико-экономических исследованиях. - М.: Статистика, 1974. - 192 с.

## **Разработка комбинированных магнитожидкостных уплотнений пожарной техники и исследование их триботехнических характеристик**

---

123. Спиридонов А.А., Васильев Н.Г. Планирование эксперимента при исследовании и оптимизации технологических процессов. Учебное пособие. Свердловск, изд. УПИ им. С.М. Кирова, 1975, 140 с.

124. Бартенев Г.М., Лаврентьев В.В. Трение и износ полимеров. М.: Химия, 1972. 240 с.

125. Машиностроительный гидропривод / Л.А. Кондаков, Г.А. Никитин, В.Я. Скрицкий и др.; Под редакцией В.Н. Прокофьева. М.: Машиностроение, 1978. 495 с.

126. Польцер Г., Майсснер Ф. Основы трения и изнашивания. Пер. с нем. О.Н. Озёрского, В.Н. Пальянова. Под ред. М.Н. Добычина. - М.: Машиностроение, 1984. - 263 с.

127. Мур Д. Трение и смазка эластомеров. США, 1972. Пер. с англ. к.т.н. Г.И. Бродского. М.: Химия, 1977. - 262 с.

128. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка Пер. С англ. Ю.Н. Восторопятава. Под ред. И.В. Крагельского. - М.: Машиностроение, 1960. - 151 с.

129. Резиновые уплотнения вращающихся валов: Каталог – справочник/В.С.Юровский, Г.А.Захарьев и др. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1978. 184с.

*Научное издание*

**ТОПОРОВ Алексей Валериевич  
ПУЧКОВ Павел Владимирович  
КИСЕЛЕВ Вячеслав Валериевич**

**РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫХ  
МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ УПЛОТНЕНИЙ  
ПОЖАРНОЙ ТЕХНИКИ И ИССЛЕДОВАНИЕ  
ИХ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

*В авторской редакции*

Подписано в печать 13.08.2020 г.  
Формат 60 × 84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 7,3. Уч.-изд. л. 6,8. Тираж 300 экз. Заказ № 102.

ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России  
153040, г. Иваново, пр. Строителей, 33

Отпечатано в АО «Информатика»  
153032, г. Иваново, ул. Ташкентская, 90

ISBN 978-5-6042853-9-8



9 785604 285398