1576485

На правах рукописи
УДК 621.86.07: 539.62

ИВАНОВ Сергей Дмитриевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА ИЗМЕНЕНИЯ СИЛЫ ТРЕНИЯ ПОКОЯ В ЭЛЕМЕНТАХ ГЛУБОКОВОДНЫХ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

05.05.04 – Строительные, дорожные и подъемно-транспортные машины
05.02.04 – Трение и износ в машинах

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2002

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Кандидат технических наук, доцент
Ромашко А.М.

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
Густов Ю.И.
Кандидат технических наук
Потапов В.А.

Ведущая организация: ГУП ЦНИИ "Гидроприбор", г. Санкт-Петербург

1576485
Иванов С.Д.
Разработка метода ра
счета изменения силы
2002 — — 0.00

я 15 апр. 2002 года в 14[30] часов
тационного Совета Д 212.141.07
Технического Университета им. Н.Э. Баумана
Москва, 2-ая Бауманская, 5.

ится в библиотеке университета.

11 марта 2002 года.

1576485

Котиев Г.О.

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1576485
Иванов С.Д. Разработка мет

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Переход от решения чисто научных задач к выполнению практических, в том числе коммерческих, работ определяет бурные темпы развития подводной техники. При этом наибольшее развитие находят так называемые рабочие необитаемые подводные аппараты, представляющие собой многофункциональные подъемно-транспортные робототехнические комплексы, оснащенные манипуляционным и технологическим оборудованием, и способные выполнять работы на предельных глубинах до 6000 метров. Создание и применение такой техники фактически стало новым, развивающимся, сектором реальной экономики в промышленно развитых странах всего мира.

Эта область техники является относительно новой, и многие проблемы, возникающие при ее создании, еще не имеют законченных решений. В частности, не решены проблемы оценки работоспособности на больших глубинах элементов конструкций, заимствованных из других областей техники.

1574 9485

В настоящее время представляется целесообразным проведение исследований, направленных на получение закономерностей, являющихся общими для целого ряда применяемых в подводной технике устройств. При таком подходе конструкция практически любого узла может быть проанализирована как совокупность составляющих его элементов, особенности работы которых в подводных условиях уже исследованы. Выполнение таких исследований сможет предоставить необходимые знания как для применения уже существующих конструкций, так и для создания в будущем собственной элементной базы для подводной техники.

Настоящая работа посвящена особенностям статического контакта плоских металлических поверхностей в условиях погружной системы.

Цель работы – исследовать явление изменения силы трения покоя плоских металлических поверхностей, находящихся в жидкой смазке, при изменении давления среды и разработать метод расчета для учета этого явления на стадии проектирования подводных подъемно-транспортных машин.

Основные задачи исследования. Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решаются следующие задачи:

- выделить специфические факторы, влияющие на работоспособность элементов конструкций подводной техники;

- рассмотреть исследуемое явление с точки зрения современных представлений науки;

- сформулировать гипотезу, объясняющую возникновение исследуемого явления;

- на основании предложенной гипотезы получить математические зависимости для его описания;

- оценить влияние основных факторов путем математического моделирования;

- физически промоделировать исследуемое явление для подтверждения предложенной гипотезы и оценки адекватности полученных моделей;

- уточнить математическую модель с точки зрения применимости для расчетов реальных технических узлов;

- сформулировать результаты для возможности учета исследуемого явления на стадии проектирования подводной техники.

Объектом исследования в работе явился контакт плоских металлических поверхностей, находящихся в среде жидкой смазки, который, в частности, реализуется в торцовых распределителях и плоских золотниках элементов гидроприводов подводных робототехнических комплексов.

Предметом исследования явилось явление изменения силы трения покоя плоских металлических поверхностей, находящихся в жидкой смазке, при изменении давления среды.

Научная новизна работы состоит в следующих достигнутых результатах:

- исследовано явление, мало описанное в литературе;

- сформулирована и подтверждена экспериментально оригинальная гипотеза, объясняющая сущность этого явления;

- разработан метод расчета изменения силы трения покоя плоских металлических поверхностей, находящихся в жидкой смазке, при изменении давления среды.

Практическая ценность работы заключается в полученной возможности учета указанного эффекта на стадии проектирования подводной техники, а именно, разработанный метод позволяет:

- рассчитывать изменение момента сил трения покоя в торцевых распределителях гидронасосов и гидромоторов;

- рассчитывать изменение силы трения покоя в узлах плоских золотников гидравлических клапанов и распределителей;

- использовать полученные в ходе эксперимента данные для расчета характеристик контакта пар трения сталь – оловянная бронза в среде гидравлического масла;

- использовать выработанную методику для исследования характеристик контакта других типов сопряжений.

Апробация и реализация результатов исследования. Основные положения работы докладывались и получили положительную оценку на заседаниях кафедры "Подъемно-транспортные машины" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Результаты работы были опубликованы в материалах научно-технической конференции "Подъемно-транспортные машины - на рубеже веков". Результаты работы использовались в учебном процессе на кафедре РК-4. Разработанный метод расчета внедрен в НИИ Специального Машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, ФГУП ОКБ океанологической техники РАН и ФГУП "СПМБМ "Малахит" при разработке и создании погружных систем глубоководных робототехнических комплексов, о чем имеются соответствующие акты о внедрении.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав основной части, заключения, библиографического списка, включающего 73 наименования отечественной и зарубежной литературы и двух приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается выбор темы диссертации, ее актуальность, связь с практическими задачами создания подводной техники; формулируются цель, задачи, основные научные положения, защищаемые диссертантом.

Первая глава посвящена сбору и обобщению имеющихся в литературе научных знаний, на которых базируется исследование.

Рассматривая описанные в литературе принципы построения погружных систем, в качестве основного фактора, отличающего условия эксплуатации систем и узлов подводной техники, выделено воздействие на элементы конструкции внешнего гидростатического давления, передаваемого через рабочую жидкость, которая одновременно является окружающей средой для

всех элементов погружной системы. Абсолютная величина давления рабочей жидкости в пассивной части погружной системы может достигать 60 МПа, а в активной части – 80 МПА.

Контакт плоских поверхностей высокой чистоты обработки в среде жидкой смазки имеет место в конструкции торцевых распределителей и плоских золотников, входящих в состав гидронасосов, гидромоторов и различных распределителей в гидроприводах робототехнических комплексов. Для обеспечения герметичности скользящей пары рабочие поверхности выполняют по 8–12-му классу шероховатости. Систему взаимодействующих у поверхности контакта элементов создают два металла – высоко легированная сталь и оловянная бронза, а также рабочая жидкость – минеральное масло.

Контакт металлических деталей рассматривается с позиций современного состояния теории контактирования шероховатых поверхностей. Важнейшей характеристикой микрогеометрии является кривая опорной поверхности, характеризующая распределение материала в шероховатом слое. Выражение ее начальной части в координатах относительная площадь сечения материала η_s – относительное сближение ε следующее: $\eta_s = b\,\varepsilon^{\nu}$, при $0 < \eta_s < 0{,}5$, где b и ν - коэффициенты кривой опорной поверхности. Для стационарного профиля выполняется зависимость: $\eta_s = \Sigma\Delta l_i / l$, где l_i – длина сечения i-го выступа на некотором уровне; l – длина трассы профилограммы. Таким образом, опорная кривая является характеристикой микротопографии шероховатой поверхности.

Кривая опорной поверхности, построенная в относительных координатах, позволяет рассматривать различные поверхности, объединяя их по методу технологической обработки. Появляется возможность использования данных ранее выполненных исследований, для поверхностей, полученных аналогичными технологическими методами.

Наличие отклонений профилей контактирующих поверхностей от правильной геометрической формы приводит к дискретности их контакта. При этом выделяют номинальную A_a, контурную A_c и фактическую A_r площади контакта. Реальная картина контакта носит сложный, случайный характер, отвечающий взаимному расположению микронеровностей под действием некоторой нагрузки в данный момент времени. Для получения расчетных зависимостей целесообразно пользоваться моделями, заменяя реальные микроне-

ровности геометрически правильными поверхностями. Хорошо изученной и разработанной в литературе является сферическая модель с расчетным радиусом $r = \sqrt{r_{пр}\, r_{поп}}$, где $r_{пр}$ и $r_{поп}$ – радиусы закругления вершин микровыступов в направлении вдоль и поперек следов обработки. В литературе приведены зависимости для расчета величин A_r и A_c, сближения поверхностей за счет деформации микровыступов **a** и за счет деформации волн $\mathbf{a_в}$. В случае упругого контакта двух шероховатых и волнистых поверхностей:

$$A_r=[2{,}35A_c^{1/2\nu}b^{1/2\nu}IJ^{1/2}N/(2^{1/2\nu}K_3H_{max}^{1/2})]^{2\nu/(2\nu+1)};$$

$$a=[1{,}5\pi IJ^{1/2}q_cH_{max}^{\nu}/(K_3b)]^{2/(2\nu+1)};$$

$$A_c=(2{,}94\, I\, J_в^{1/2}A_a^{1/4}N/H_в^{1/2})^{4/5};$$

$$a_в=1{,}54\, H_в^{4/5}I^{2/5}J_в^{1/5}q_a^{2/5},$$

где N – нагрузка на контакте; I- характеристика механических свойств контактирующих поверхностей; J – приведенный радиус скругления вершин микровыступов; $J_в$ – приведенный радиус скругления вершин волн; ν и b – коэффициенты опорной кривой эквивалентной поверхности; $q_c= N/A_c$; $q_a= N/A_a$; K_3 – коэффициент; H_{max}- суммарная высота микровыступов; $H_в$ - суммарная высота волн.

Взаимодействие поверхностных слоев твердых тел, находящихся в среде жидкой смазки, рассматривается с точки зрения молекулярной физики граничного трения.

При избытке потенциальной энергии на поверхности образуется сложная система поверхностных слоев. Существенное влияние на ее строение и свойства оказывают природа металла, его механическая обработка и процессы трения, окружающая среда. Поэтому сравнение и использование данных возможно только внутри отдельных групп, обеспечивающих подобие подготовки и условий взаимодействия контактирующих поверхностей.

Под действием силового поля, вблизи поверхности металла, граничные слои жидкой смазки приобретают упругость формы, переходя в иное агрегатное состояние, что вызывает существенное отличие физических свойств этих слоев от свойств жидкости в основном объеме. Критическая толщина граничного слоя, при которой он еще сохраняет особые физические свойства, зависит от свободной энергии твердой поверхности и экранирующих поверхност-

ных слоев. Приводимые в литературе данные оценивают критическую толщину граничного слоя в предельном случае величиной $\delta < 0{,}1$ мкм.

При рассмотрении системы металл – жидкая смазка – металл, в литературе указывается на возможность существования "краевого эффекта". Он заключается в том, что особые свойства жидкости сохраняются в тонком зазоре, ограниченном твердыми поверхностями. При контактировании твердых поверхностей, толщина полимолекулярного слоя жидкости на их поверхностях уменьшается с ростом контактного давления. Граничный слой жидкости может быть разрушен, приводя к непосредственному взаимодействию твердых поверхностей. При этом, на свойства граничного слоя влияет поверхностная энергия обеих контактирующих поверхностей.

Исследуемое явление изменения силы трения покоя плоских металлических поверхностей в среде жидкой смазки следует рассматривать как результат взаимодействия комплекса факторов, обусловленных особенностями конструкции и эксплуатации элементов погружных систем, контактирования сопряженных поверхностей и их взаимодействия с окружающей средой.

Вторая глава посвящена изложению гипотезы, объясняющей сущность явления изменения силы трения покоя сопряженных поверхностей, находящихся в жидкой смазке, при изменении давления среды. Здесь проведено математическое моделирование этого явления для случаев контакта стальных поверхностей различной чистоты обработки.

При статическом контакте твердых поверхностей в среде жидкой смазки, на номинальной поверхности контакта выделены три зоны (рис.1). В пределах зоны **а** (зона относительно большого зазора между поверхностями) жидкая смазка имеет свойства основного объема и передает давление **p** без изменения во всех направлениях. В пределах зоны **б**, соответствующей площади A_r, происходит непосредственный контакт твердых поверхностей. Жидкая смазка выдавлена из этой зоны усилием предварительного поджатия N_1. В относительно малых зазорах (зона **в**) металлические поверхности образуют общий граничный слой жидкости. В силу своих особых физических свойств, этот слой может не передавать, либо передавать не полностью, давление основного объема на твердые поверхности.

В работе введено понятие площади непосредственного взаимодействия твердых поверхностей, находящихся в среде жидкой смазки - A_s. Это пло-

щадь контакта, в пределах которой давление жидкой среды не передается на твердые поверхности.

Уравнение равновесия детали 1 в направлении нормали к плоскости контакта будет:

$N_1+pA_a = N+p(A_a-A_s)$; или $N = N_1+pA_s$,

где N – нагрузка на контакте. Введя обозначение $S = A_s/A_r$, и используя выражение для A_r, получено:

$$N = N_1+p\,S\,[2{,}35\,A_c^{1/2\nu}\,b^{1/2\nu}\,I\,J^{0,5}\,N/(\,2^{1/2\nu}\,K_3\,H_{max}^{0,5})]^{2\nu/(2\nu+1)}$$

Таким образом, при статическом контакте твердых поверхностей в среде жидкой смазки, предварительное усилие их поджатия инициирует возникновение зон A_s, в которых жидкость не способна передавать давление основного объема на твердые поверхности. Появление таких зон ведет к возрастанию нормального усилия, что, в свою очередь, приводит к увеличению зон A_s. В результате система приходит в равновесие при новом значении нормального усилия, соответствующего данному значению давления окружающей среды и характерного для данной системы взаимодействующих элементов. Изменение нормального усилия на контакте сопряженных поверхностей ведет к изменению значения силы трения покоя при приложении к поверхностям тангенциальной нагрузки.

Далее рассматривается сферическая модель контакта отдельной пары микровыступов с учетом находящихся на их поверхности граничных слоев жидкости (рис.2).

Площадь As определяется как площадь сечения сферы радиуса J_δ плоскостью, проходящей на расстоянии $a+2\delta$ от ее поверхности. Из геометрических соотношений, после преобразований получено:

$A_s = \pi\,(a + 2\delta)\,(2\,J_\delta - a - 2\delta)$; $S = (a+2\delta)\,(2J_\delta-a-2\delta)\,/\,[a\,(2J - a)]$ и

$N' = N_1' + p\,\pi\,(a + 2\delta)\,(2\,J_\delta - a - 2\delta)$,

где a- сближение поверхностей; 2δ- критическая толщина общего граничного слоя; $J_\delta = (r_1+\delta)\,(r_2+\delta)\,/\,(r_1+r_2+2\delta)$; N_1'- усилие предварительного поджима, приходящееся на одну пару микровыступов, участвующих в контакте.

Отбрасывая малые величины, ввиду приближенного характера расчетов, для контакта поверхностей 7-го и выше классов шероховатости, полученные выражения можно упростить. $J_\delta \approx J$, тогда:

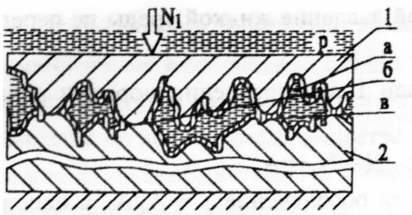


Рис.1

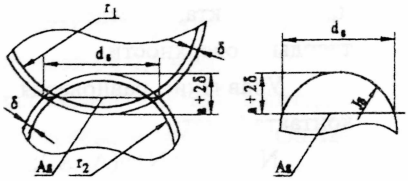
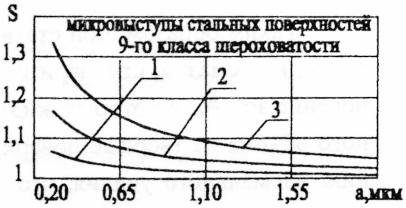
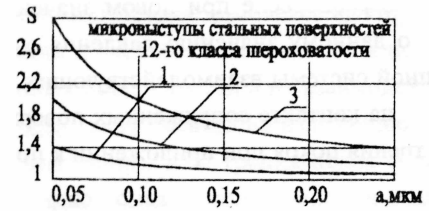


Рис.2







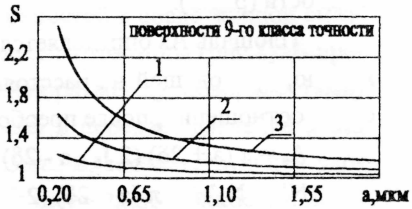
1- δ = 0,01 мкм

2- δ = 0,025 мкм

3- δ = 0,05 мкм

Рис.3





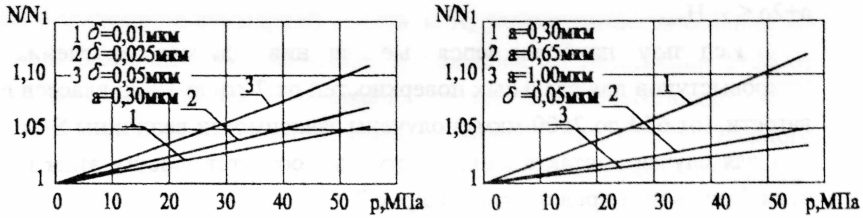


1- δ = 0,01 мкм

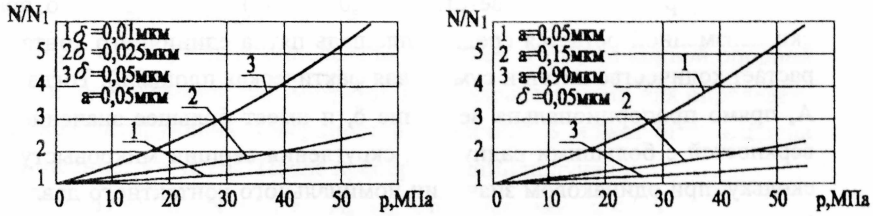
2- δ = 0,025 мкм

3- δ = 0,05 мкм

Рис.4



поверхности 9-го класса шероховатости



поверхности 12-го класса шероховатости

Рис. 5

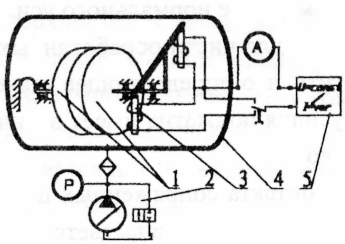


Рис. 6

1 - экспериментальные образцы

2 - насосная станция

3 - электропривод

4 - камера высокого давления

5 - источник электропитания

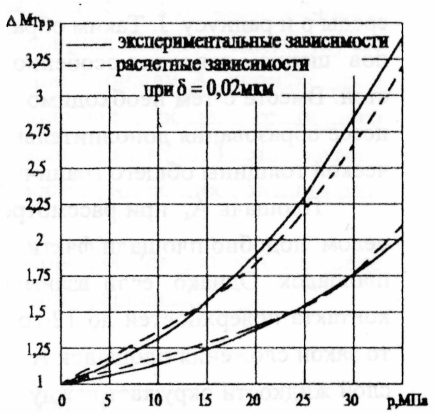


Рис. 7

$A_s = A_r + 4\,\pi\,\delta\,J$; $S = 1 + 2\,\delta / a$; $N' = N_1' + 2\,\pi\,p\,J\,(a + \delta)$.

Условием применимости описанных выше выражений будет являться:

$a+2\delta \le \frac{1}{2} H_{max}$.

Используя наиболее вероятные значения радиусов скругления вершин микровыступов для стальных поверхностей от 7-го до 12-го классов шероховатости, (от 650 до 2500 мкм) получены зависимости величины S от сближения для случая контакта микровыступов, соответствующих этим поверхностям. Результаты представлены на рис.3.

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы. Изменение сближения пропорционально изменению нагрузки в степени 2/(10ν+5) (при ν=3…6 соответственно 0,05…0,03). Соответственно, практически неизменной остается средняя площадь пятна единичного контакта (возрастает количество пятен и суммарная фактическая площадь). Тогда площадь A_s прямо пропорциональна величине δ, и имеет большее значение для поверхностей с большими радиусами скругления вершин микровыступов. Поскольку, при одинаковом значении номинального контактного давления, для более гладких поверхностей характерны меньшие значения сближения, величина S возрастает с увеличением чистоты обработки. Из постоянства A_r следует постоянство усилия N_1', передаваемого единичной площадкой контакта. Для более гладких поверхностей число пятен контакта больше, следовательно, величина N_1' – меньше. Значение N пропорционально давлению внешней среды p и радиусу J. Таким образом, изменение нормального усилия N'/ N_1' с повышением давления особенно заметно для чисто обработанных поверхностей. Вместе с тем необходимо отметить, что определяющее значение в процессе образования дополнительного усилия поджатия имеет величина критической толщины общего граничного слоя.

Площадь A_s, при рассмотрении контакта сопряженных поверхностей в целом, подобно площади фактического контакта, складывается из единичных площадок. Однако, если взаимовлияние площадок A_{ri} в условиях упругого контакта поверхностей до 12-го класса шероховатости, пренебрежимо мало, то закон сложения площадок A_{si} более сложен. Во-первых, общий граничный слой жидкости окружает каждую элементарную площадку фактического контакта. Во-вторых, некоторые зоны могут перекрываться, образуя единую площадку общего граничного слоя. В-третьих, возможно возникновение

площадок общего граничного слоя жидкости у вершин близко расположенных микровыступов, еще не вступивших в контакт.

Для определения суммарной величины A_s рассматривается сечение эквивалентной поверхности плоскостью, проходящей на расстоянии $a+2\delta$ от вершины. Поскольку "эффект сглаживания" не проявляется для поверхностей грубее 14-го класса шероховатости, кривые опорных поверхностей твердого тела и граничного слоя жидкости на его поверхности можно считать одинаковыми.

Если относительному сближению ε_r соответствует доля материала в сечении η_r, то относительному сближению ε_s соответствует η_s.

$$\varepsilon_r = a / H_{max} ; \quad \varepsilon_s = (a + 2\delta) / H_{max}$$

Величины η_r и η_s могут быть определены по одной и той же кривой опорной поверхности, описываемой параметрами b и ν, характерными для определенной пары контактирующих поверхностей. Величина S может быть найдена как их отношение: $S = \eta_s / \eta_r$. После преобразований получено:

$S = (1 + 2\delta / a)^{\nu}$ и $N = N_1 + p\, A_c\, b\, \varepsilon_s^{\nu}$, при условии $\varepsilon_s < 0{,}5$.

Используя приводимые в литературе наиболее вероятные значения параметров шероховатости и коэффициентов кривой опорной поверхности, получены зависимости величины S от сближения поверхностей. Результаты расчета представлены на рис.4.

При сравнении зависимостей для случая контакта отдельных микровыступов и поверхностей в целом видно, что величина S в последнем случае существенно больше. Следовательно, увеличение площади A_s происходит в основном из-за возникновения элементарных площадок общего граничного слоя у вершин микровыступов, еще не вступивших в контакт. И этот эффект сильнее проявляется для более грубых поверхностей, имеющих больший разброс высот микровыступов.

Параметры контакта двух твердых шероховатых поверхностей в среде жидкой смазки описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} N = N_1 + p(1+2\delta/a)^{\nu} A_r, \\ a = [1{,}5\, \pi\, I\, J^{1/2}\, N\, H_{max}^{\nu} / (A_c\, K_3\, b)]^{2/(2\nu+1)} \\ A_r = [2{,}35\, A_c^{1/2\nu}\, b^{1/2\nu}\, I\, J^{1/2}\, N / (2^{1/2\nu}\, K_3\, H_{max}^{1/2})]^{2\nu/(2\nu+1)} \end{cases}$$

С ее помощью проанализировано влияние основных факторов: чистоты обработки поверхностей, давления среды, критической толщины граничного слоя и сближения на изменение нормальной нагрузки на контакте. Результаты расчетов для случая контакта стальных поверхностей представлены на рис.5.

Эффект увеличения нормального усилия на контакте поверхностей при повышенном давлении окружающей среды определяется, в первую очередь, параметрами микрогеометрии. Практическое значение он может иметь для поверхностей 9-го и выше классов шероховатости. Рассматриваемый эффект наиболее ярко проявляется при малых значениях сближения.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию данного явления с целью подтверждения адекватности расчетной модели и ее уточнения.

Рассмотрение описанных в литературе методов экспериментальных исследований, позволяет сделать вывод о том, что определение величин, характеризующих картину контакта целесообразно проводить по косвенным показателям. В качестве такого показателя выбран момент силы трения покоя на контакте исследуемых поверхностей. Для исключения влияния факторов, связанных с конструкцией реальных узлов, эксперимент проводится на специально изготовленных образцах. Для мультипликации эффекта образцы имеют достижимо более высокую чистоту обработки, и эксперимент проводится при максимально возможных значениях давления рабочей жидкости. Соответствие эксперимента реальным условиям обеспечивается применением соответствующих материалов образцов и рабочей жидкости.

Первый этап эксперимента – получение профилограмм рабочих поверхностей образцов. В работе предложена компьютерная технология их обработки. Результаты приведены в таблице.

Образец	№1	№2	№3	№4
Материал	Бронза БрОСН 10-2-3		Сталь Х12Ф1-Ш	
H_{max}, мкм	0,16	0,18	0,25	0,24
h, мкм	0,06	0,06	0,16	0,13
t_m	0,50	0,56	0,51	0,48
Ra, мкм	0,022	0,020	0,033	0,030
ν	1,73	2,36	3,94	3,30
b	2,73	7,48	2,96	3,63
r, мкм	148	245	35	40

Несмотря на схожесть параметров микрогеометрии образцов составляющих разные пары, параметры модели контакта этих пар имеют отличия характеристик распределения материала в шероховатом слое. Вследствие этого, для различных пар, следует ожидать достаточно большого отличия результатов эксперимента в камере высокого давления. Таким образом, может быть подтверждена адекватность предложенной модели.

Второй этап – проведение эксперимента в камере высокого давления. В ходе этого этапа получены зависимости изменения момента силы трения покоя сопряженных поверхностей от избыточного давления рабочей жидкости и установлено влияние времени экспозиции образцов при повышенном давлении.

Схема экспериментальной установки показана на рис.6, а полученные после обработки эксперимента данные – на рис.7.

Полученные экспериментальные кривые хорошо соответствуют расчетным. Наилучшее совпадение достигается при значении δ=0,02 мкм. Причем, это значение является общим для двух пар образцов. Расхождение расчетных и экспериментальных значений не превышает 20% при избыточном давлении жидкости до 20МПа, и 12% - при 20-35 МПа. На основе этого можно сделать вывод о применимости полученной выше расчетной модели, а значение δ=0,02 мкм – следует считать характерным для пары высоколегированная сталь Х12Ф1-Ш – оловянная бронза БрОСН 10-2-3 в среде минерального масла АМГ-10.

Также исследовалось влияние времени экспозиции образцов при повышенном давлении на рассматриваемый эффект. Хотя количественных оценок в ходе эксперимента получить не удалось, сделан качественный вывод. При времени экспозиции менее 3 минут величина $\Delta M_{тр}$ имеет нестабильные значения. Это может быть связано с периодом формирования общего граничного слоя жидкости на контакте сопряженных поверхностей образцов. При времени экспозиции 5 и 10 минут значения $\Delta M_{тр}$ стабилизируются, и остаются практически неизменными.

Уточненная в ходе эксперимента расчетная модель может быть использована для анализа работоспособности плоских золотников и торцевых распределителей реальных узлов робототехнических комплексов. В работе приведен расчет торцевого распределителя гидронасоса НП-100. Показано, что на предельной глубине погружения, составляющая пускового момента при-

водного электродвигателя, расходуемая на стрягивание распределителя, может увеличиться в 1,9 раза.

В приложениях представлена методика обработки профилограмм рабочих поверхностей экспериментальных образцов и деталей торцового распределителя гидронасоса НП-100 с применением компьютерной технологии обработки. Также приведен текст разработанной программы для расчета изменения момента силы трения покоя в узле торцового распределителя гидронасоса НП-100.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Полученные в ходе проведенного исследования результаты позволяют сделать вывод о том, что поставленная цель – исследовать явление изменения силы трения покоя плоских металлических поверхностей, находящихся в жидкой смазке, при изменении давления среды и разработать метод расчета для учета этого явления на стадии проектирования подводных подъемно-транспортных машин – достигнута.

2. В ходе исследования сформулирована гипотеза, предполагающая, что при статическом контакте твердых поверхностей в среде жидкой смазки на поверхности контакта формируются зоны непосредственного взаимодействия твердых поверхностей, включающие в себя зоны фактического контакта и зоны образования общего граничного слоя жидкости. В пределах указанных зон давление основного объема жидкости не передается на поверхности твердых тел. Это приводит к увеличению нормальной нагрузки на контакте и, как следствие, увеличению силы трения покоя контактирующих поверхностей.

3. На основании предложенной гипотезы разработана модель контакта отдельных микровыступов в среде жидкой смазки. Получены зависимости для расчета величины площади непосредственного взаимодействия пары микровыступов в среде жидкой смазки и изменения нормальной нагрузки на их контакте при изменении давления среды. Разработана модель контакта двух шероховатых поверхностей в среде жидкой смазки. Разработанные модели учитывают особенности построения погружных систем глубоководных подъемно-транспортных робототехнических комплексов. Проведено экспериментальное исследование, подтвердившее правомерность предложенной гипотезы и адекватность разработанных моделей.

4. На основе анализа разработанных моделей оценено влияние основных факторов на величину эффекта увеличения нормального усилия на контакте при увеличении давления среды. Определяющее значение имеют чистота обработки контактирующих поверхностей и критическая толщина общего граничного слоя жидкости.

5. Уточненная по результатам эксперимента модель использована для расчета необходимого коэффициента запаса пускового момента, расходуемого на страгивание торцового распределителя гидронасоса НП-100 при его запуске на больших глубинах. Расчетное значение составило $k_p \approx 1{,}9$ при максимальной глубине погружения робототехнического комплекса в 6000 м.

6. При выполнении эксперимента предложена компьютерная технология обработки профилограмм. По результатам обработки экспериментальных данных рассчитана величина критической толщины общего граничного слоя жидкости для пары высоколегированная сталь – оловянная бронза в среде гидравлического масла. Расчетная величина $\delta=0{,}02$ мкм. Экспериментально исследовано влияние времени экспозиции образцов под повышенным давлением на величину эффекта увеличения силы трения покоя. Минимальное время экспозиции, после которого величина исследуемого эффекта имеет установившийся характер, составило 5 минут.

7. Показана необходимость учета явления изменения силы трения покоя твердых поверхностей, находящихся в жидкой смазке, при изменении давления среды для плоских золотников и торцовых распределителей реальных конструкций, применяемых в подводной технике. Разработанный метод расчета позволяет учитывать это явление на стадии проектирования погружных систем глубоководных подъемно-транспортных робототехнических комплексов.

Материалы диссертационной работы использовались и внедрены в организациях:

- НИИ Специального Машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана при создании необитаемого подводного роботизированного комплекса “Аква-ЧС” (комплекс принят в опытную эксплуатацию МЧС России, работа удостоена золотой медали на международной выставке в Женеве) и необитаемого подводного аппарата “Шнек-А” (аппарат находится в стадии достройки);

- ФГУП ОКБ океанологической техники РАН при разработке телефотокомплекса глубоководного аппарата "Консул" и автономных гидроакустических размыкателей "АГАР";
- ФГУП "СПМБМ "Малахит" при создании манипуляционного комплекса обитаемого подводного аппарата "Русь" (комплекс в составе аппарата прошел Государственные испытания и передан заказчику, работа удостоена Второй премии имени МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2001 г.).

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Иванов С.Д. Увеличение сил трения покоя в торцовом распределительном устройстве при повышенном гидростатическом давлении // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. - 1998. – N4. – С. 114 - 116.
2. Иванов С.Д. Контактирование плоских поверхностей в среде жидкости при повышенном давлении среды // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1998. – N7-9. – С. 79 - 86.
3. Иванов С.Д., Ромашко А.М. Эффект увеличения сил трения покоя в гидроприводе погружного робототехнического комплекса // Подъемно-транспортные машины на рубеже веков: Программа и тезисы докладов юбилейной научно-технической конференции с международным участием, - М., 1999. – С. 86.
4. Иванов В.И., Иванов С.Д. Проектирование манипуляционных комплексов подводных аппаратов. // Оборонная техника. - 2001. – N 8-9. – С. 70 - 72.
5. Ефимушкин Р.Н., Иванов С.Д., Ромашко А.М. Моделирование контакта шероховатых поверхностей в среде жидкой смазки // Известия Тульского государственного университета. – 2001. –N3. – С. 129 - 135.

Подписано к печати 21.02.02 г. Зак. 18т объем 1.0 п.л. Тир. 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана