

На правах рукописи

Чашухин Владислав Григорьевич

ДВИЖЕНИЕ МИНИАТЮРНОГО РОБОТА В ОГРАНИЧЕННОМ
ПРОСТРАНСТВЕ

Специальность 01.02.01 – теоретическая механика.

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Москва – 2008 г.

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Градецкий Валерий Георгиевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Зенкевич Станислав Леонидович

кандидат физико-математических наук
Буданов Владимир Михайлович

Ведущая организация: Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова РАН

Защита состоится «27» ноября 2008 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета Д 002.240.01 при Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук по адресу: 119526, г. Москва, проспект Вернадского, 101-1, ИПМех РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук.

Автореферат разослан «24» октября 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д002.240.01 при ИПМех РАН,
кандидат физико-математических наук

Сысоева Е.Я.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в робототехнике наблюдается тенденция к миниатюризации и применению нанотехнологий. Миниатюрные роботы могут проникать в узкие образования (щели, отверстия) и двигаться в них, что позволяет применять их для выполнения различных задач в ограниченных пространствах, например трубах малого диаметра, имеющих размер порядка нескольких миллиметров. Конструкция минироботов зачастую сильно отличается от их макроразмерных аналогов. В качестве маршевых двигателей минироботов обычно используются двигатели, обеспечивающие линейное перемещение без использования трансмиссии, например электромагнитный или пьезоэлектрический. С помощью применения современных нанотехнологий можно улучшить технические характеристики как отдельных узлов миниробота, например устройств сцепления с поверхностью, так и робота в целом.

Миниатюрные роботы для движения в трубах малого диаметра имеют довольно обширную область применения. В основном это техническая диагностика трубопроводов, дефектоскопия внутренних поверхностей труб в авиационной, космической, атомной промышленности и т. д. Кроме того имеется потребность в осуществлении прокладки кабелей в трубах и картографировании трубопроводов.

Несмотря на выполненные ранее исследования, влияние рабочих параметров на функциональные характеристики таких роботов изучено недостаточно, известные методы расчета не обеспечивают достаточно точное соответствие с экспериментом.

Актуальность темы исследования заключается в необходимости выполнения параметрического анализа и нахождения зависимостей между

основными параметрами, в разработке адекватных процессам механики математических моделей и в поиске новых конструктивных решений для создания минироботов с целью выяснения способов улучшения их технических характеристик.

Хотя ранее были созданы некоторые модели миниатюрных роботов, предназначенные для движения по вертикальным поверхностям и в ограниченном пространстве, однако процессы взаимодействия с поверхностью, динамика роботов и соотношения между параметрами были изучены недостаточно. В частности, недостаточно изучено движение роботов с электромагнитными приводными системами.

Цель работы заключается в получении данных о взаимовлиянии параметров динамики роботов, в разработке математической модели движения миниатюрного робота, перемещающегося в ограниченном пространстве и в разработке метода расчета наноструктурированного адгезионного материала для применения в устройствах сцепления с поверхностью, выявлении с помощью этих моделей необходимых параметров для достижения нужных функциональных технических характеристик робота. Для достоверности теоретических выводов выполнены экспериментальные исследования.

Методы исследований. В работе использованы методы теоретической, прикладной механики и численного моделирования.

Научная новизна. Разработана математическая модель динамики миниатюрного внутритрубного робота и устройств сцепления робота с поверхностью, которая, в отличие от ранее известных, учитывает анизотропность по трению. На основе проведенного численного решения уравнений динамики выявлены значения частоты и продолжительности управляющих воздействий, обеспечивающие улучшение динамических характеристик робота. Предложено использование ворсистого

адгезионного материала с анизотропным трением в устройствах сцепления робота с внутренней поверхностью трубы, что приводит к увеличению грузоподъемности робота. Выявлены геометрические параметры структуры ворсистого адгезионного материала, при которых он обладает наибольшей анизотропией по трению. Оценены величины предварительного нагружения такого материала для обеспечения его прикрепления к поверхности и момента, необходимого для отрыва материала от поверхности.

Практическая ценность полученных результатов. На основе полученных результатов произведена модернизация внутритрубного робота для улучшения его динамических характеристик. Создан электромагнитный внутритрубный робот с возможностью реверсивного движения. На основе разработанной математической модели создано программное обеспечение для численного моделирования динамики движения робота, с помощью которого можно определять значения параметров управляющих воздействий, обеспечивающих улучшение динамических характеристик робота. Разработаны технические требования, предъявляемые к адгезионному материалу, предназначенному для устройств сцепления миниробота с поверхностью.

Достоверность полученных результатов вытекает из корректности постановок исследуемых задач, использования известных методов численного моделирования, проведения большого объема экспериментов и сопоставления теоретических результатов с полученными экспериментально.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на российских конференциях:

1. Механика, автоматизация, управление 2006, Санкт-Петербург, 10-12 октября 2006 г.

2. «НАНО-2007», Новосибирск, 13-16 марта 2007 г.

На международных конференциях и симпозиумах:

1. 4-th International Workshop on Computer Science and Information Technologies CSIT – 02, Patras, Greece, September 18-20, 2002.
2. VR – Mech'01, Brussels, Belgium, November 22-24, 2001.
3. IARP Workshop on Adaptive and Intelligent Robots: Present and Future. . Moscow. Russia, November 24-26, 2005.
4. IARP Micro and Nano Robotics, Paris, France, October 23-24, 2006.
5. The international Workshop on Micro- and Nano Production Technologies and Systems, Moscow, Russia, October, 17-18, 2007.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 2 статьи в научных журналах, включенных в перечень научно-технических изданий ВАК России.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Список литературы содержит 64 наименования. Объем диссертации составляет 98 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель работы и поставленные задачи, раскрыты научная новизна и практическая значимость работы.

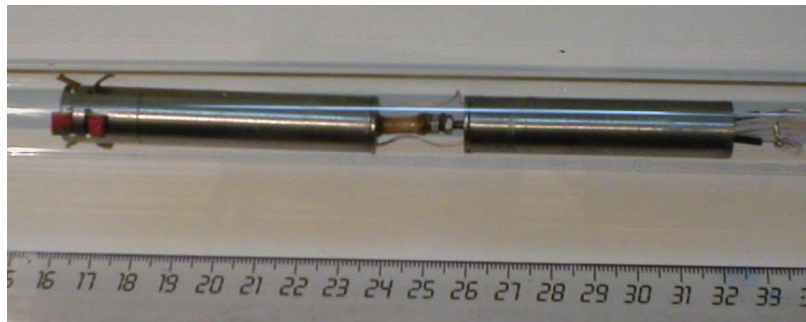
В первой главе представлен обзор основных типов существующих роботов, предназначенных для движения в ограниченном пространстве. Приведен анализ задач динамики миниатюрных роботов с применением методов теоретической механики. Описаны области применения таких роботов.

Во второй главе описаны конструкции миниатюрных внутритрубных роботов с возможностью реверсивного движения (рис. 1б) и без такой возможности (рис. 1а), созданные в Институте проблем механики Российской академии наук. На рис. 1в,г приведены схематические изображения роботов. Основные составляющие конструкции нереверсивного робота – цилиндрический корпус и шток, который совершает периодические движения относительно корпуса. Внутри корпуса расположен соленоид, способный втягивать шток при подаче напряжения на контакты соленоида. На шток надета пружина, которая стремится вытолкнуть его из корпуса, когда снимается напряжение с соленоида. Шток и корпус снабжены упорами, посредством которых робот контактирует с поверхностью трубы. Упоры сконструированы так, что при движении робота вперед (в желаемом направлении) трение о поверхность трубы слабее, чем при движении в обратном направлении. Во время движения на соленоид подается ток в виде прямоугольных импульсов. Движение робота осуществляется

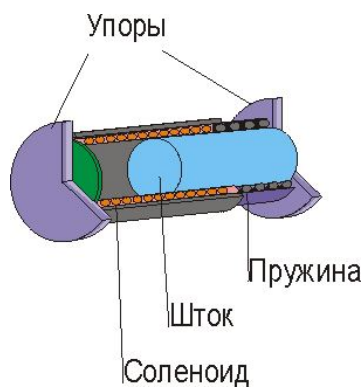
повторением циклов, каждый из которых состоит из двух этапов: втягивание штока и его выталкивание.



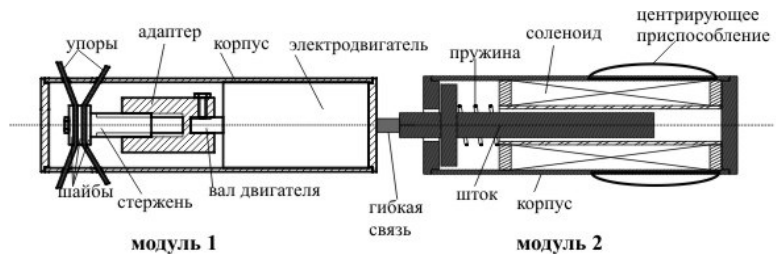
а



б



в



г

Рис. 1. а) Электромагнитный миниатюрный внутритрубный робот способный двигаться только в одном направлении, б) робот, обладающий способностью реверсивного движения, в), г) схематические изображения роботов.

Проведено моделирование динамики внутритрубного робота, снабженного упорами, обладающими анизотропией по трению. Движение робота происходит в прямолинейной трубе, ось которой наклонена к горизонту под углом β . Введем обозначения: x_i ($i = 1, 2$) – координаты штока и корпуса соответственно, отсчитываемые вдоль оси трубы (абсолютные смещения штока и корпуса); m_i ($i = 1, 2$) – массы штока и корпуса соответственно; k – коэффициент жесткости пружины; g –

ускорение силы тяжести. Здесь и далее индекс $i = 1$ соответствует штоку, $i = 2$ – корпусу. Точки отсчета координат x_1 и x_2 выбраны так, что при $x_1 = x_2$ пружина не деформирована, а в начальный момент времени $\dot{x}_i = 0$. Шток втягивается в соленоид под действием электромагнитной силы $-F$. Кроме того, на шток и соленоид действуют силы упругости пружины, равные $k|x_2 - x_1|$ по абсолютной величине и противоположно направленные, сила тяжести $m_i g$ и сила реакции опоры N_i . Кроме того, на шток и корпус действуют силы сухого трения F_{mpi} и силы сопротивления среды $D_i \dot{x}_i$ (D_i - коэффициент сопротивления среды). Уравнения движения внутритрубного робота как двухмассовой системы имеют вид:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = -F + k(x_2 - x_1) - m_1 g \sin \beta - F_{mp1} - D_1 \dot{x}_1, \\ m_2 \ddot{x}_2 = F - k(x_2 - x_1) - m_2 g \sin \beta - F_{mp2} - D_2 \dot{x}_2. \end{cases}$$

$$F_{mpi} = \begin{cases} \mu^+ N_i, (\dot{x}_i > 0 \text{ или } \dot{x}_i = 0 \text{ и } R_i \geq \mu^+ N_i), \\ -\mu^- N_i, (\dot{x}_i < 0 \text{ или } \dot{x}_i = 0 \text{ и } R_i \leq -\mu^- N_i), \\ R_i, (\dot{x}_i = 0 \text{ и } -\mu^- N_i \leq R_i \leq \mu^+ N_i), \end{cases} \quad (i = 1, 2)$$

$$R_i = (-1)^i [F - k(x_2 - x_1)] - m_i g \sin \beta - D_i \dot{x}_i$$

На соленоид подается питание в виде периодически повторяющихся прямоугольных импульсов. Выражение для электромагнитной силы имеет следующий вид: $F = \frac{dW}{dx} = \frac{1}{2} \frac{dL}{dx} i^2$, где W - электромагнитная энергия, L - индуктивность, i - ток в обмотке соленоида. На рис. 2 представлена зависимость скорости робота от частоты и продолжительности прямоугольных электромагнитных импульсов. На рис. 3 показано сравнение теоретической зависимости скорости от периода воздействия электромагнитной силы (сплошная линия) с полученными

экспериментально значениями (точки с указанием погрешности). Функция скорости имеет максимум при определенных значениях частоты и продолжительности импульса. При помощи разработанной модели можно рассчитать максимальную скорость движения робота и соответствующие этому значению величины частоты и продолжительности импульса электромагнитной силы. Моделирование проводилось в среде MATLAB.

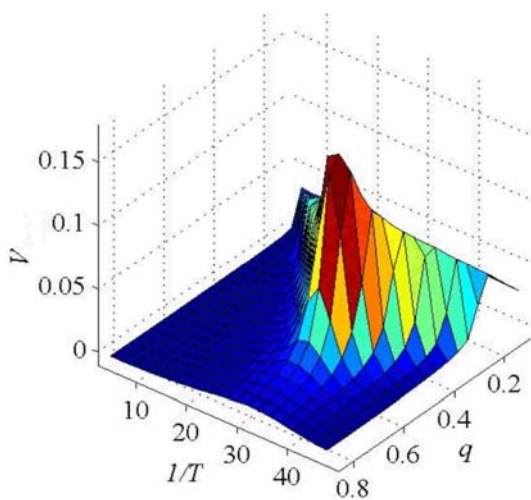


Рис. 2. Зависимость скорости робота от частоты и продолжительности импульса электромагнитной силы.

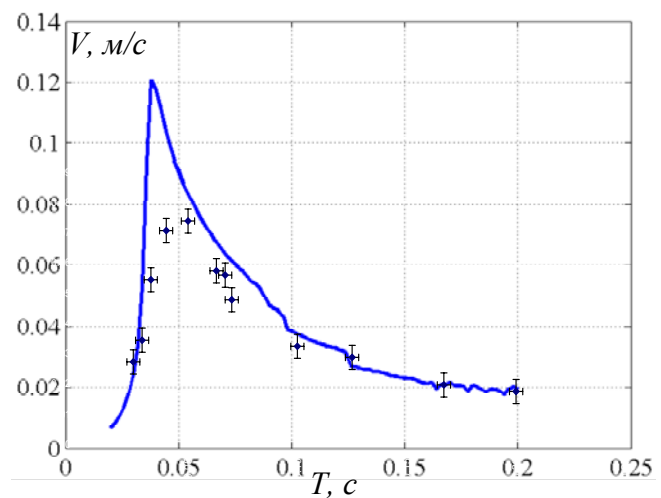


Рис. 3. Зависимость скорости робота от длительности действия электромагнитной силы.

Показано, что для увеличения грузоподъемности робота нужно увеличить анизотропность трения его упоров. Исследована зависимость анизотропности трения от характеристик материала упоров, геометрических характеристик упоров, диаметров трубы и корпуса робота.

Упоры робота моделировались набором ворсинок, основание которых прикреплено к роботу, а свободный конец упирается в стенку трубы (см. рис. 4). Длина ворсинок больше разницы радиусов трубы и корпуса робота. Изначально ворсинки сжаты в направлении, перпендикулярном поверхности трубы, на величину $\Delta = L \sin \theta - H$, где L

- длина ворсинки, H - разность между радиусом трубы и радиусом корпуса робота. Ворсинка представляется упругой балкой, имеющей продольный и поперечный коэффициенты жесткости. Отношение этих коэффициентов s .

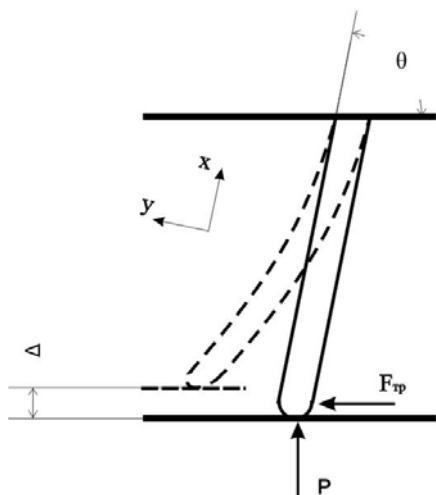


Рис. 4. Изгиб ворсинки упора.

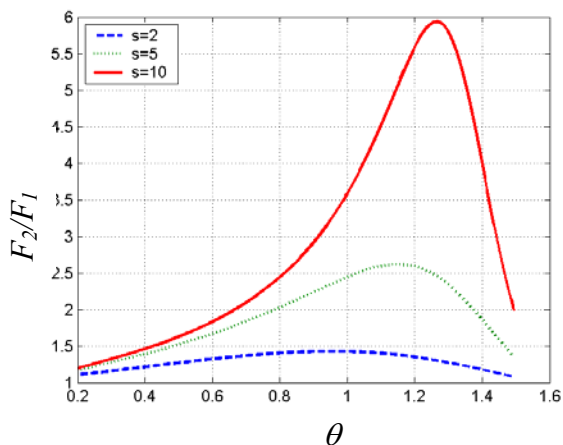


Рис. 5. Зависимость отношения сил трения от геометрических характеристик упора.

На рис. 5 представлена зависимость отношения сил трения при скольжении вдоль наклона ворсинки и против наклона для различных значений s . Рассмотрено условие потери ворсинкой устойчивости. При потере устойчивости резко возрастает прогиб ворсинки, уменьшается сила давления ворсинки на поверхность, а соответственно и сила трения, поэтому сила трения в обратном направлении не может превышать значения, достигаемого на грани потери устойчивости.

В третьей главе рассмотрены основные требования к материалам для покрытия контактных площадок роботов, приведен краткий обзор различных существующих устройств сцепления роботов с поверхностью. Изучен механизм взаимодействия ворсистых адгезионных материалов (длина ворса порядка 10 мкм) с шероховатой поверхностью.

Схематическое изображение структуры такого адгезива показана на рис. 6.

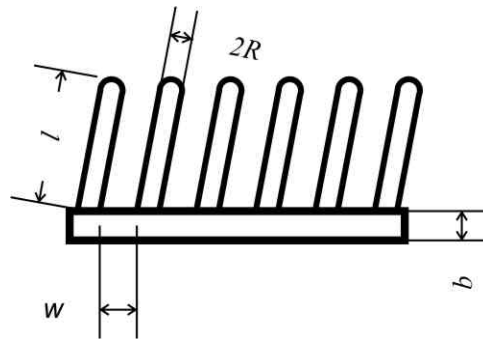


Рис. 6. Структура адгезионного материала

Считалось, что при контактировании с поверхностью одна ворсинка притягивается с силой $2\pi R\sigma_0$, здесь σ_0 - работа адгезии, R - радиус ворсинки. Это выражение соответствует ДМТ модели адгезии (Дерягин, Муллер, Топоров). Ворсинки моделировались как упругие балки, имеющие поперечный и продольный коэффициенты жесткости, равные

$$k_y = \frac{3EI}{l^3}, \quad k_x = \frac{\pi R^2 E}{l},$$

где E - модуль Юнга материала ворсинки, I - момент инерции поперечного сечения ворсинки.

Предполагается, что высоты вершин шероховатостей поверхности распределены по нормальному закону. Сила упругости, возникающая при сжатии ворсинок, отнесенная к произведению количества ворсинок на силу адгезии f_0 для одной ворсинки:

$$f_1 = \frac{F_{\text{упр}}}{nSf_0} = \frac{4E_1}{3\sqrt{3s}\sigma_0(\sin^2 \theta + s \cos^2 \theta)} \left[\frac{M}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{D^2}{2M^2}\right) - \frac{D}{2} \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{D}{\sqrt{2}M}\right)\right) \right]$$

($s = \frac{k_x}{k_y} = \frac{4l^2}{3R^2}$, θ - угол наклона ворсинки к поверхности, n - количество

ворсинок на единицу площади, S - площадь материала), сила адгезионного притяжения материала сложится из сил притяжения контактирующих ворсинок

$$f_2 = \frac{F_{адз}}{nSf_0} = \frac{1}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{D}{\sqrt{2M}} \right) \right).$$

Здесь $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-\xi^2) d\xi$ - функция ошибок. Зависимость

безразмерной разности силы упругого отталкивания и силы адгезии,

$f = \frac{F_{упр} - F_{адз}}{nSf_0}$ от расстояния D и шероховатости d при

$l = 10 \text{ мкм}$, $R = 0.2 \text{ мкм}$, $\theta = 43^\circ$, $\sigma_0 = 0,049 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$, $E_1 = 2 \text{ ГПа}$

представлена на рис. 7.

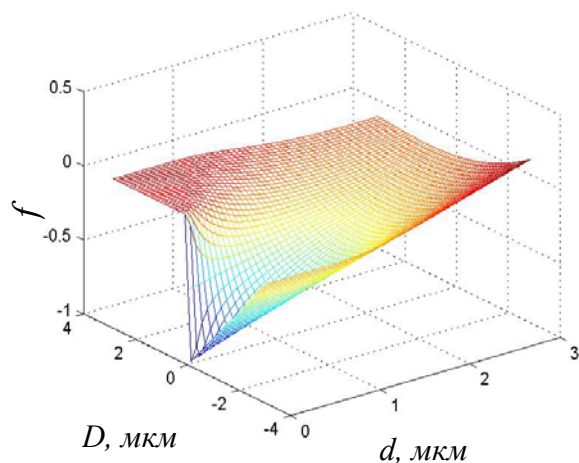


Рис. 7. Зависимость силы взаимодействия адгезионного материала с шероховатой поверхностью.

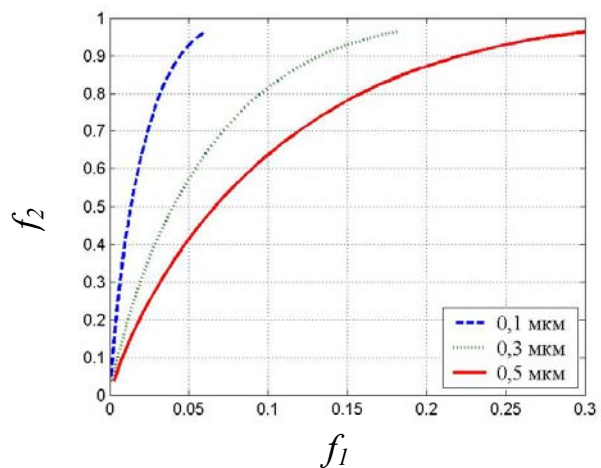


Рис. 8. Зависимость силы адгезии от предварительной нагрузки.

Чтобы увеличить количество непосредственно контактирующих с поверхностью ворсинок и тем самым увеличить силу адгезионного взаимодействия материала с поверхностью, необходимо предварительно прижать материал к поверхности. Зависимость силы адгезии от предварительного нагружения показана на рис. 8.

Оценены геометрические параметры и характеристики материала, из которого изготовлены ворсинки, исключая возможность слипания ворсинок между собой, приведены формулы для расчета параметров, при которых будет происходить самоочищение щетинок.

В четвертой главе рассмотрена возможность применения адгезионного ворсистого материала в качестве покрытия контактных поверхностей мобильных роботов. Рассмотрены существующие роботы, использующие адгезионные материалы.

Устройство сцепления, основанное на механизме адгезионного взаимодействия с поверхностью, должно отвечать следующим требованиям.

- Для прикрепления к поверхности адгезионный материал, находящийся на поверхности контакта, должен быть предварительно прижат к ней.
- Площадь контактной поверхности, должна быть достаточной, для того, чтобы создавать силу адгезионного притяжения, необходимую для удержания робота на поверхности.
- Отрыв адгезионного материала от поверхности должен происходить постепенно, наподобие развития трещины.

Выведено выражение для момента, необходимого при отрыве адгезионного материала от поверхности. Приведены технические требования, предъявляемые к адгезионному ворсистому материалу, обладающему анизотропным трением и предназначенному для

использования на контактных поверхностях внутритрубного электромагнитного робота, рассмотренного в главе 2. Схематическое изображение устройства сцепления с адгезионным материалом показано рис. 9.

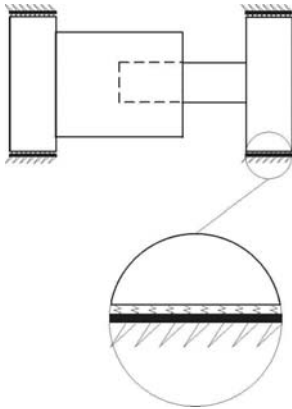


Рис. 9. Схематическое изображение адгезионного устройства сцепления с поверхностью.

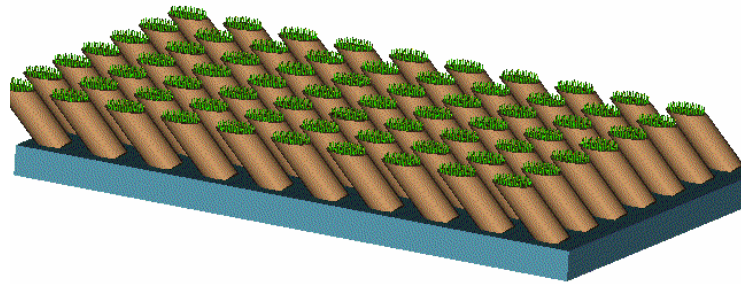


Рис. 10. Структура сухого адгезионного материала с анизотропным трением.

Устройство сцепления представляет собой адгезионный материал, наклеенный на упругую подложку, которая в свою очередь наклеена на контактную площадку робота. На рис. 10 представлена структура сухого адгезионного материала. Он состоит из столбиков, изготовленных из упругого материала, на их торцах, скошенных под определенным углом к центральной линии столбиков, выращены микроворсинки, диаметр которых порядка сотен нанометров.

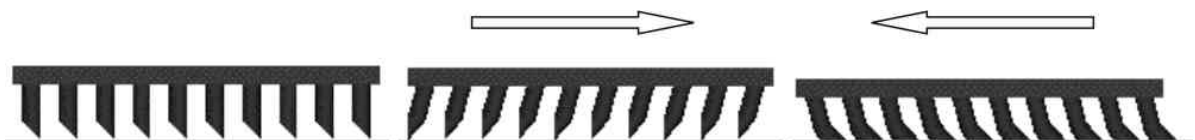


Рис. 11. Деформирование волосков при движении. Ненагруженное состояние (слева), движение вперед (в середине), движение назад (справа).

На рис. 11 показана схема действия такого устройства. Зависимость отношения сил трения, действующих на одну ворсинку, при движении вперед и назад от угла наклона столбиков показана на рис. 12 (сплошной линией показана зависимость отношения при наличии адгезии при скольжении в обратном направлении, пунктирной – при ее отсутствии). Эта зависимость выражается формулой

$$\frac{F_2'}{F_1} = \left(1 + \frac{\Delta_0}{\Delta}\right) \frac{\operatorname{tg}^2 \theta + \mu(s-1)\operatorname{tg} \theta + s}{\operatorname{tg}^2 \theta - \mu(s-1)\operatorname{tg} \theta + s}, \quad \Delta_0 = \mu F_{\text{адз}} \cos \theta \sin \theta \left(\frac{s-1}{s}\right), \quad \Delta = L \sin \theta - H,$$

L – длина столбика, H – разность внутреннего радиуса трубы и радиуса корпуса робота, θ – угол наклона столбиков к образующей трубы.

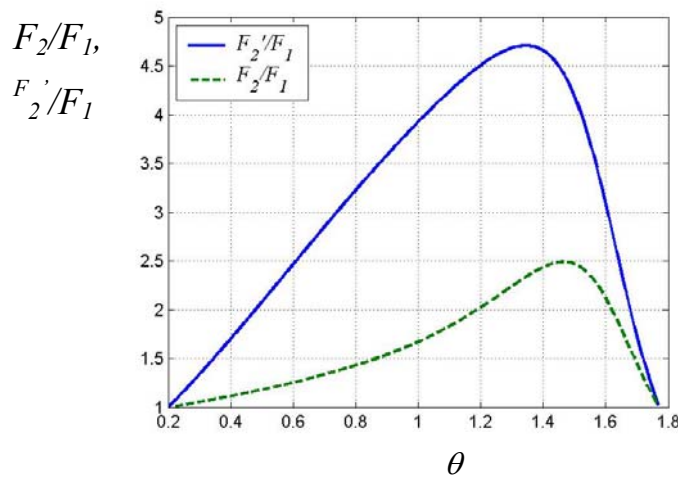


Рис. 12. Отношение сил трения при движении вперед и назад от угла наклона столбиков.

Результаты диссертационной работы и рекомендации по структуре адгезионного материала были переданы генеральному директору концерна «Наноиндустрия».

Основные результаты диссертации.

1. В результате проведенного моделирования динамики внутритрубного робота с электромагнитным приводом показано, что при

неизменной конструкции робота изменением частоты и длительности управляющих воздействий можно увеличить скорость движения робота, обеспечив ему при этом достаточную длину хода штока. Для увеличения грузоподъемности можно применить более совершенные материалы упоров в целях обеспечения максимальной анизотропии по трению.

2. Разработана математическая модель движения электромагнитного робота. В результате проведенного математического моделирования взаимодействия адгезионного ворсистого материала с шероховатой поверхностью, выявлены основные преимущества такого материала для применения в устройствах сцепления роботов с поверхностью.

3. На основе исследования явления анизотропии по трению ворсистого материала получены аналитические выражения для сил трения при скольжении вдоль наклона ворсинок и против него.

4. Создано программное обеспечение, моделирующее динамику движения робота. Проведено сравнение данных, полученных при моделировании, с экспериментальными, при этом погрешность не превышает 6-7 %.

5. На основе данных, полученных при моделировании, осуществлена модернизация внутритрубного миниробота с целью улучшения его динамических характеристик. Создан внутритрубный электромагнитный робот с возможностью реверсивного движения, которое осуществляется за счет изменения угла наклона упоров.

6. Проведены экспериментальные исследования по измерению динамических характеристик робота, обосновывающие достоверность результатов моделирования.

7. На основе проведенных исследований разработаны технические требования к материалу, необходимому для изготовления устройств сцепления с поверхностью.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В
СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Чашухин В.Г. Моделирование динамики и определение управляющих параметров внутритрубного миниробота. // Теория и системы управления, 2008, № 5, с. 142-147.
2. В.Г. Градецкий, В.Г. Чашухин, О. Н. Каменева Анализ параметров движения миниатюрных многозвенных роботов с электромагнитными двигателями // Нано- и микросистемная техника, 2007 №11 с. 58-65.
3. Veshnikov V., Gradetsky V., Chaschuhin V. Simulation of the mobile multilink robot with vision virtual reality system. // Proceedings of the VR – Mech'01, Brussels, Belgium, November 22-24, 2001.
4. Veshnikov V., Gradetsky V., Chaschuhin V. Computer modeling of the crawling robot motion inside a pipeline. // Proceedings of the 4-th International Workshop on Computer Science and Information Technologies CSIT – 02, Patras, Greece, September 18-20, 2002.
5. Chaschuhin V. Mechanics of the adaptive biorheological gripper based on mechanism of adhesion in Gecko. // Proceedings of the IARP Workshop on Adaptive and Intelligent Robots: Present and Future. November 24-26, 2005. Moscow. Russia.
6. Chaschuhin V., Gradetsky V. Analysis of the interaction nanomechanism of the gecko mimicking material with the surface microstructure. // Proceedings of IARP Micro and Nano Robotics, Paris, France, October 23-24, 2006.
7. Gradetsky V., Knyazkov M., Chaschuhin V., Kameneva O. Micro- and nanotechnologies in robotics. // Proceedings of The international Workshop on Micro- and Nano Production Technologies and Systems, Moscow, Russia, October, 17-18, 2007.

8. Чашухин В.Г. Исследование устройств сцепления мобильных роботов с поверхностью, имеющих адгезионные материалы на контактных площадках. // Препринт № 861 ИПМех РАН.
9. Gradetsky V., Knyazkov M., Chaschuhin V. Coupling devices interaction with surfaces in the process of miniature mobile robot's motion. // Proceedings of the ICMEN 2008, Kassandra-Chalkidiki, Greece, October, 1-3, 2008.