

УДК 681.587.7:621.865

РОБОТЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ С КОНТАКТНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ НА ОСНОВЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ: КОНСТРУКЦИИ И ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ КОНТАКТНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ¹

© 2019 г. Н. В. Сырых^{a,*}, В. Г. Чашухин^{b,**}

^aНИУ МГСУ, Москва, Россия

^bИПМех РАН, Москва, Россия

*e-mail: nka.syryh@yandex.ru

**e-mail: ketlk@mail.ru

Поступила в редакцию 21.01.2019 г.

После доработки 19.04.2019 г.

Принята к публикации 20.05.2019 г.

Представлен обзор основных типов роботов вертикального перемещения, использующих в качестве фиксаторов постоянные магниты. Рассмотрены роботы, применяющие различные типы локомоции (шагающие, колесные, гусеничные). Отдельное внимание уделено конструкциям магнитных контактных устройств и принципам управления ими.

DOI: 10.1134/S0002338819050135

Введение. В настоящее время в промышленности существует большое количество работ, выполнение которых опасно или невозможно без участия роботов, например: дефектоскопия стен резервуаров с ядовитым или радиоактивным содержимым, обследование корпусов судов, в том числе ниже ватерлинии, различные операции на большой высоте, очистка фасадов небоскребов. Во многих из этих работ применяются роботы вертикального перемещения, которые используют для фиксации на поверхности различные принципы адгезии (магнитные, вакуумные, электростатические). В данной работе рассмотрены шагающие, гусеничные и колесные роботы, которые перемещаются по ферромагнитной поверхности, используя контактные устройства, основанные на постоянных магнитах. Данный тип контактных устройств позволяет экономить энергию, затрачиваемую на фиксацию робота на поверхности, а также предотвращает отрыв робота от поверхности перемещения в случае отключения питания.

1. Шагающие роботы. Наибольшее распространение получили шагающие роботы с количеством ног от двух до шести. Большее количество ног обычно обеспечивает большую устойчивость и увеличивает грузоподъемность [1], однако повышает сложность управления, увеличивает размеры и массу робота. Преимуществом такого способа локомоции является способность робота преодолевать препятствия поверхности перемещения в автономном режиме, недостатком — большая сложность системы управления, по сравнению с другими типами локомоции. Также к шагающим отнесем и двухплатформенные роботы, передвигающиеся циклично, поочередным перемещением каждой из платформ вдоль траектории движения.

В Институте промышленной автоматизации Высшего совета по научным исследованиям Испании (Instituto de automatica industrial, Madrid, Spain) были разработаны шестиногие роботы REST 1 и REST 2 для перемещения грузов массой до 100 кг по вертикальным и горизонтальным ферромагнитным поверхностям [2]. Робот и конструкция его контактного устройства (фиксатора) показаны на рис. 1. Фиксатор представляет пластину, в которую встроен массив управляемых магнитных устройств и резиновые вставки, служащие для увеличения коэффициента сцепления. Управляемое магнитное устройство состоит из двух магнитов: постоянного магнита и электро-

¹ Исследование выполнено в рамках государственного задания ИПМех РАН (проект АААА-А17-117021310384-9) при поддержке Программы РАН I-29 “Актуальные проблемы робототехнических систем” (проект АААА-А17-117121120036-3).

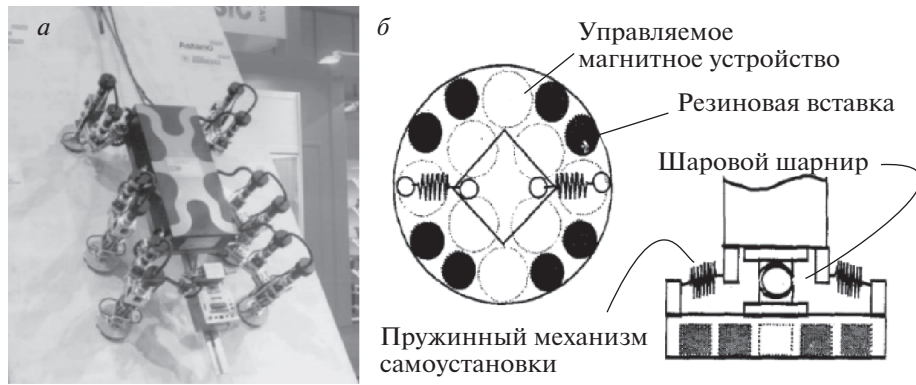


Рис. 1. Робот REST (а), общий вид магнитного фиксатора (б)

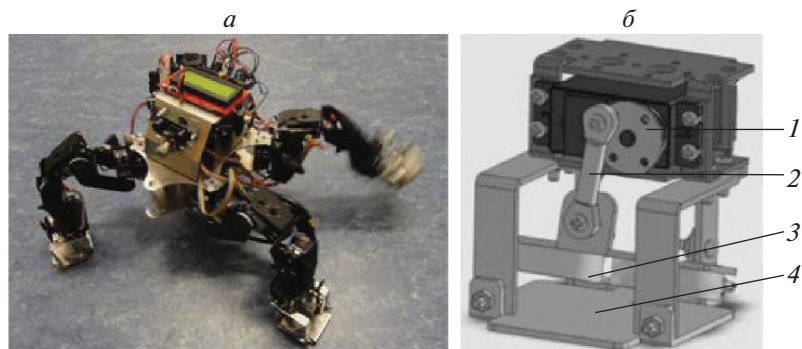


Рис. 2. Робот Winspecbot (а), общий вид магнитного фиксатора (б)

магнита. Во время отрыва ноги от поверхности электромагнит создает поле, противоположное полю постоянного магнита, уменьшая результирующую силу сцепления. Возможно создание магнитного поля, сонаправленного с полем постоянного магнита, что увеличит результирующую силу. Фиксатор крепится к ноге с помощью шарового шарнира и пружинного механизма самоустановки, что позволяет роботу приспосабливаться к неровностям поверхности перемещения и переходить с пола на стену. Каждая нога способна удерживать до 50% от общей массы робота на всех возможных наклонах поверхности.

Робот 4Steel, разработанный командой из Национального института ядерных исследований (National institute of nuclear research, Mexico City, Mexico), Технологического института Толуки (Technological institute of Toluca, Toluca, Mexico) и Технологического института Сан-Хуан-дель-Рио (Technological institute of San Juan del Río, San Juan del Río, Mexico) [3], предназначен для ультразвуковой диагностики крупных газгольдеров. Ноги этого робота имеют простую конструкцию с двумя степенями свободы (шарнир в месте крепления ноги к корпусу и возможность ее телескопирования). Фиксаторы 4Steel основаны на том же принципе, что и фиксаторы REST.

Робот Winspecbot, созданный в Университете прикладных наук Южной Вестфалии (South Westphalia University of Applied Sciences, Soest, Germany) и Университете Евле (University of Gävle, Gävle, Sweden) [4], предназначен для инспекции стальных трубопроводов. Он использует контактные устройства, конструкция которых показана на рис. 2, б, где 1 – серводвигатель, 2 – шатун, 3 – постоянный магнит, 4 – алюминиевая пластина. При шагании робот с помощью сервопривода увеличивает расстояние между магнитом и поверхностью перемещения, тем самым достигается уменьшение удерживающей силы. Пластина 4 при удалении от нее магнита обладает способностью самоочищаться от налипших ферромагнитных частиц, защищая постоянный магнит от загрязнения.

Двуногие роботы представляют многозвенную шарнирно-сочлененную конструкцию, похожую на гусеницу, с контактными устройствами на концах.

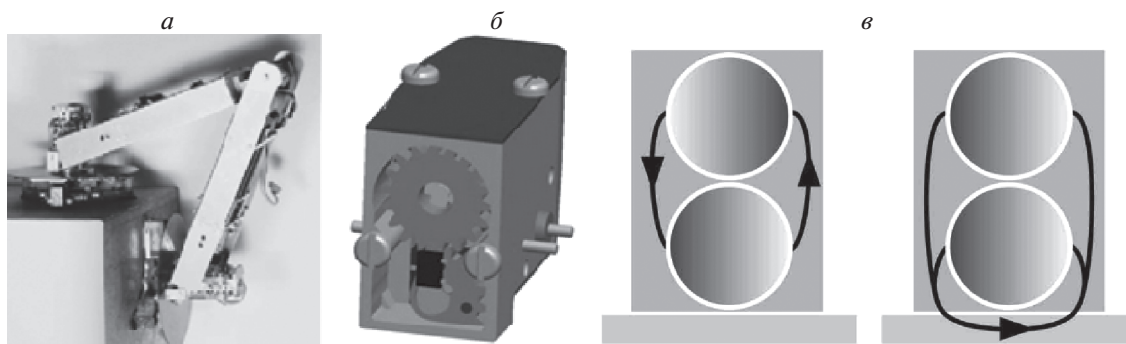


Рис. 3. TREMO (а), общий вид отключаемого магнитного механизма (б), принципиальная схема отключаемого магнитного механизма (в)

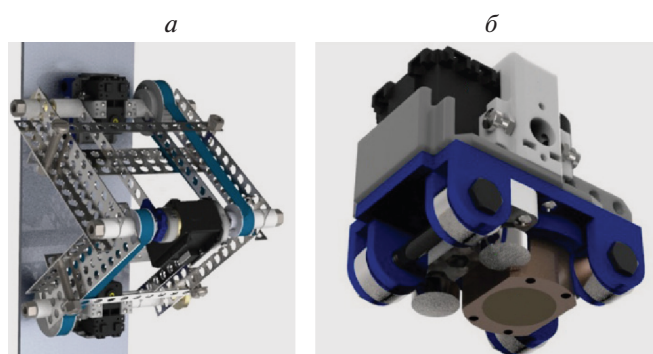


Рис. 4. Общий вид робота (а), конструкция магнитного фиксатора (б)

Робот Tremo, разработанный в Федеральной политехнической школе Лозанны (École polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland) [5], представляет двухзвенный механизм с двумя фиксаторами на концах (рис. 3). Фиксатор данного робота состоит из трех магнитных устройств, внутри которых установлен один неподвижный постоянный магнит (статор) и один подвижный (ротор). Магнит-ротор соединен с электромотором через редуктор и способен поворачиваться на 180° вокруг своей оси (Н-образная компоновка [6]). Принцип действия состоит в перенаправлении линий магнитной индукции в зависимости от взаимного положения магнитов (рис. 3, в, где стрелками показаны линии магнитной индукции).

Робот, созданный в Коимбрском университете (Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal) [7], предназначен для передвижения по ферромагнитным поверхностям (рис. 4). Представляет двухзвенный механизм, на концах которого шарнирно закреплены контактные устройства. Конструкция фиксатора включает сервомотор (а), управляемое магнитное устройство (б), два постоянных магнита (в) и четыре подшипника по краям (г). Последние предназначены для уменьшения потерь на трение, так как робот “перекатывает” ногу при шагании. Принцип работы управляемого магнитного устройства аналогичен TREMO.

Робот, разработанный командой из Технологического университета Сиднея (University of Technology Sydney, Sydney, Australia) и Агентства дорог и морских путей Нового Южного Уэльса (New South Wales Roads & Maritime Services, Australia) [8], показан на рис. 5, представляет собой сочлененный трехзвенный механизм с фиксаторами на концах. Каждый фиксатор состоит из трех управляемых магнитных устройств, закрепленных на общей раме. Магнитным устройством служат установленные на раме приводной электродвигатель с шестерней на валу и зубчатый сектор с постоянным магнитом и датчиком давления для контроля сцепления [9]. Отрыв контактного устройства от поверхности происходит за счет поворота зубчатого сектора.

Робот, созданный в Швейцарской высшей технической школе Цюриха (Eidgenössische technische hochschule Zürich, Zürich, Switzerland) [10], предназначен для неразрушающего контроля котлов угольных электростанций. Он представляет собой сочлененный механизм с двумя маг-

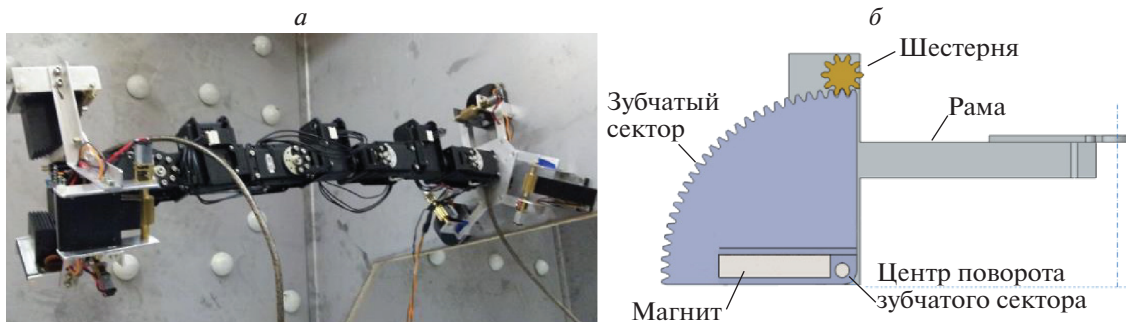


Рис. 5. Общий вид робота (а), схема магнитного фиксатора (б)

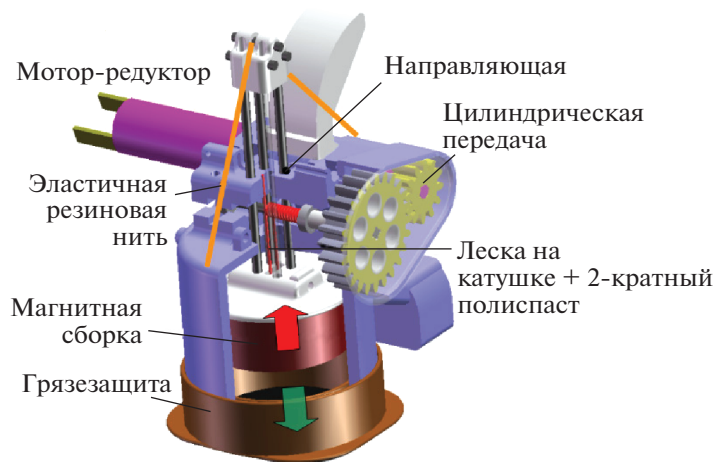


Рис. 6. Конструкция контактного устройства робота

нитными фиксаторами на концах и двумя воздушными винтами, предназначенными для доставки робота к месту начала обследования котла. Конструкция фиксатора приведена на рис. 6. Увеличение (уменьшение) удерживающей силы осуществляется приближением (удалением) постоянного магнита от поверхности перемещения. Удаление магнита от поверхности осуществляется электродвигателем, приближение — упругой резиновой нитью, что уменьшает потребление энергии. Для защиты магнита от ферромагнитных частиц со стенок котла применяется резиновая пленка толщиной 0.5 мм. Это также позволяет контактному устройству самоочищаться.

Двухплатформенные роботы представляют две рамы, которые могут двигаться одна относительно другой. Отсоединяя по очереди фиксаторы каждой из платформ от поверхности и смещая ее, робот совершает движение.

Робот, разработанный командой из Университета Ла-Коруњи (Universidade da Coruña, Coruña, Spain) и IT-Университета Копенгагена (IT University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark), предназначен для пескоструйной обработки корпусов судов и использует пневматические приводы (рис. 7, а) [11]. Он состоит из двух рам, соединенных между собой шарнирами через линейные приводы, что допускает относительные линейные перемещения вдоль двух осей, а также вращение рам относительно друг друга (до 37°). Каждая рама имеет по четыре контактных устройства, шарнирно закрепленных на линейных приводах ног, что позволяет роботу адаптироваться к кривизне корпуса судна без потери удерживающей силы. Фиксаторы состоят из постоянного магнита с катушкой электромагнита внутри. Принцип работы такого управляемого магнитного устройства такой же, как у робота REST.

Робот Sadie [12], сконструированный командой из Городского университета Гонконга (City University of Hong Kong, Hong Kong), Университета Саутгемптона (University of Southampton, Southampton, UK), BNFL Magnox Generation Ltd, Berkeley, UK и PORTECH Ltd, Portsmouth, UK, был разработан для неразрушающего контроля сварных швов каналов ядерного реактора; он со-

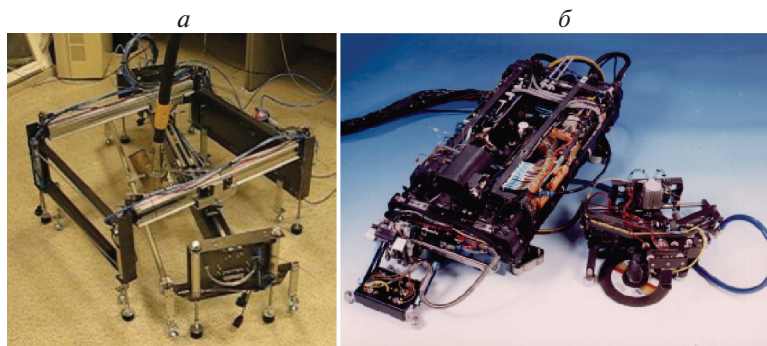


Рис. 7. Двухплатформенные роботы

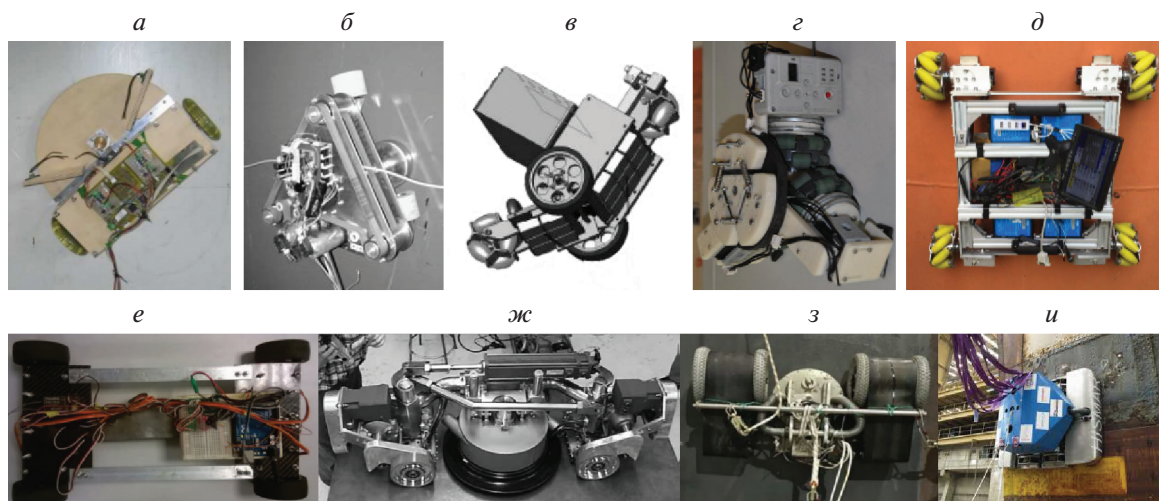


Рис. 8. Роботы с магнитами вне колес

стоит из рамы и челнока, соединенных шарниром (рис. 7, б). Рама представляет две параллельные титановые трубы, соединенные на концах опорами фиксаторов. Челнок передвигается по раме с помощью линейного привода типа винт-гайка. Вращение челнока относительно рамы осуществляется мотором с редуктором, что позволяет роботу изменять направление движения. Для сцепления с поверхностью перемещения используются шесть вакуумных и четыре магнитных контактных устройства. Каждый магнитный фиксатор развивает усилие 800 Н, что позволяет роботу сохранять устойчивость на изгибах трубопровода при движении, а также увеличивает точность выполнения технологических операций.

2. Колесные роботы. Колесные роботы представляют раму, установленную на шасси с различным количеством колес, на которой смонтированы все элементы робота. Их следует разделить на две группы: с магнитами вне колес и с магнитами, встроенными в колеса (существуют конструкции с магнитами на раме и в колесах одновременно, но их значительно меньше). Количество колес менее трех приводит к необходимости дополнительных опор, а более — к возможности вывешивания колес на изгибах поверхности, что может спровоцировать падение робота. В данном типе роботов применяются неуправляемые постоянные магниты.

Роботы с магнитами вне колес представлены на рис. 8.

Робот, описанный в статье [13], создан в Университете Кайзерслаутерна (University of Kaiserslautern, Kaiserslautern, Germany), в учебных целях (рис. 8, а). Он состоит из деревянной рамы с четырьмя постоянными магнитами, двух сервоприводов с приводными колесами и одного вспомогательного колеса.

Робот, созданный в Университете Виго (Universidad de Vigo, Vigo, Spain) [14], предназначен для обследования сварных швов в судостроении (рис. 8, б). Состоит из корпуса (двух треуголь-

ных алюминиевых пластин, соединенных стальными стяжками), на нижней части которого установлены три постоянных магнита, а на верхней — два электромотора. Один мотор отвечает за синхронное вращение, а второй — за синхронный поворот всех трех колес, что позволяет роботу перемещаться в любом направлении, не поворачивая корпус. Момент с моторов передается на колеса через приводные ремни.

Роботы, созданные в Лондонском университете южного берега (London South Bank University, London, UK) [15, 16], предназначены для обследования сварных швов. Робот, описанный в [15] (рис. 8, *в*), состоит из двух шарнирно-сочлененных рам с магнитными сборками на нижней поверхности, двух ведущих колес с дифференциальными сервоприводами, что позволяет ему легко маневрировать, и двух омниколес для поддержания равновесия. Схема с шарнирной рамой обеспечивает возможность перехода между поверхностями перемещения. Робот, описанный в статье [16] (рис. 8, *е*), имеет простую конструкцию: на прямоугольной раме закреплены четыре независимых привода и магнитное контактное устройство. Фиксатор представляет два магнита, которые установлены на чугунной подложке, что позволяет более эффективно направлять магнитные линии.

Робот OmniClimber [17, 18], сконструированный в Коимбрском университете (Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal), предназначен для обследования ферромагнитных поверхностей с различными радиусами кривизны (рис. 8, *з*). Он состоит из трех независимых приводов с омниколесами, установленных на гибкой трехзвенной раме под углом 120° относительно друг друга. Конструкция также включает центральный (самый сильный) магнит, предназначенный для создания необходимой удерживающей силы; три боковых магнита для адаптации гибкой рамы к кривизне поверхности и три кольцевых магнита, установленных на осях колес для увеличения удерживающей силы. Боковые магниты создают прижимающую силу, достаточную для изгибания эластомерного звена рамы, что позволяет колесам всегда находиться в контакте с поверхностью перемещения.

Робот, разработанный в Юго-Восточном университете (Southeast University, Nanjing, P.R. China) [19], предназначен для обследования сварных швов (рис. 8, *д*). Он представляет собой прямоугольную раму, на которой установлены четыре независимых привода с омниколесами, что позволяет роботу легко перемещаться в любом направлении. Данный робот имеет управляемую подвеску колес, которая дает возможность регулировать расстояние между магнитом и поверхностью перемещения, а также изменять угол наклона осей колес для поддержания постоянного пятна контакта с поверхностью.

Робот M2000 [20], разработанный в университете Карнеги–Меллон (Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA), и робот, разработанный в Чжэцзянском университете (Zhejiang University, Hangzhou, P.R. China) [21], предназначены для снятия краски и оксидов с корпусов судов. Робот M2000 (рис. 8, *ж*) представляет шарнирно-сочлененную раму с четырьмя колесами, которая отвечает за повороты, двумя неразрезными мостами, оснащенными дифференциалом и электромотором. Робот оборудован двумя постоянными магнитами, установленными на нижней части мостов. Робот, описанный в [21] (рис. 8з), имеет два больших магнитных фиксатора, предназначенных для создания удерживающей силы, и один малый фиксатор для предотвращения опрокидывания. Контактные устройства представляют два колеса, на общей оси которых смонтирован кольцевой сектор магнитной сборки, состоящий из подложки, четырех магнитов и алюминиевого сепаратора.

Робот HISMAR [22], созданный в Институте исследований в области энергетики им. сэра Джозефа Суона (Swan Institute for Energy Research, Newcastle, England) совместно с МГТУ Станкин (Москва, Россия), предназначен для очистки корпуса корабля от биологического налета (рис. 8, *и*). Он представляет собой четырехколесную платформу, имеющую четыре независимых привода.

Роботы с магнитами, встроенными в колеса, представлены на рис. 9.

Робот, разработанный в Швейцарской высшей технической школе Цюриха (Eidgenössische technische hochschule Zürich, Zürich, Switzerland) [23], предназначен для неразрушающего контроля судовых газгольдеров (рис. 9, *а*). На раме робота установлен электромотор, приводящий в движение колеса через ременную передачу. Изменение траектории движения не предусмотрено, робот использует ребра жесткости газгольдера в качестве направляющих.

Робот, сконструированный командой из Швейцарской высшей технической школы Цюриха, Цюрих, Швейцария (Eidgenössische technische hochschule Zürich, Zürich, Switzerland) и ALSTOM Ltd [24], предназначен для неразрушающего контроля генератора ветровой турбины при установленном роторе (рис. 9, *б*). Он состоит из гибкой рамы (комбинация жестких пластмассовых

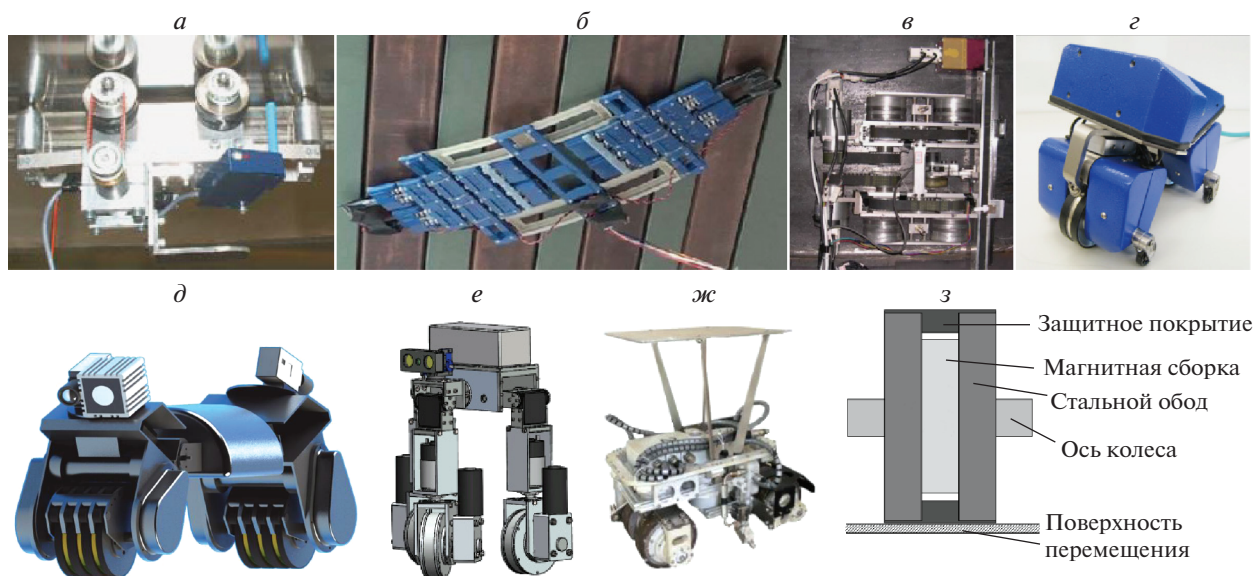


Рис. 9. Роботы с магнитами, встроенными в колеса

участков и гибких металлических лент) и четырех гибких ведущих звеньев. Высота робота составляет 8 мм. Каждое звено имеет 20 магнитных колес, установленных на гибком валу, которые приводятся в движение электромотором через систему шестерен.

Робот, разработанный в Шанхайском университете Цзяотун (Shanghai Jiaotong University, Shanghai, P.R. China) [25], предназначен для обследования сварных швов (рис. 9, в). Он имеет модульную конструкцию. Модуль передвижения состоит из рамы и четырех магнитных колес, которые приводятся в движение через ременную передачу от двух электромоторов.

Робот MagneBike (рис. 9, г), разработанный группой специалистов из Швейцарской высшей технической школы Цюриха (Eidgenössische technische hochschule Zürich, Zürich, Switzerland), Федеральной политехнической школы Лозанны (École polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland) и ALSTOM Ltd [26], предназначен для обследования парораспределительных коробок на электростанциях. Он имеет два магнитных колеса с поддерживающими роликами по бокам. Поворот осуществляется за счет степени свободы у переднего колеса, а адаптация к уклонам поверхности — с помощью шарнирного крепления вилки к корпусу.

Робот Труболаз [27] и робот, описанный в статье [28], разработанные в Уфимском государственном авиационном техническом университете (УГАТУ, Уфа, Россия), предназначены для внутритрубной диагностики трубопроводов переменного диаметра и проведения работ внутри корпуса корабля соответственно. Робот Труболаз (рис. 9, д) представляет трехзвенный механизм, позволяющий адаптироваться к сложному рельефу, с двумя магнитными колесами, оборудованными механизмом отрыва от поверхности перемещения. Управление роботом осуществляется дистанционно по Ethernet-каналу. Робот, описанный в статье [28] (рис. 9, е), выполнен по трехколесной схеме и состоит из двух модулей, соединенных пассивным шарниром с механическими упорами для компенсации неровностей поверхности перемещения. Он оборудован приводами, позволяющими изменять межосевое расстояние и ориентировать колеса для поворота на месте. Для перехода между поверхностями применены поворотные магнитные полукольца, управляемые независимо от самого колеса, что позволяет ориентировать вектор силы притяжения перпендикулярно поверхности перемещения.

Отдельно стоит выделить робота, разработанный специалистами из Чжэцзянского университета (Zhejiang University, Hangzhou, P.R. China) и Шанхайским подразделением технологии инженерно-технического оборудования Китайской национальной шельфовой нефтяной корпорации (CNOOC EnerTech Equipment Technology Co. Ltd. Shanghai Branch, Shanghai, P.R. China) [29], предназначенный для очистки подводных трубопроводов различных диаметров. Этот робот имеет магниты как в колесах, так и на корпусе (рис. 9, ж).

На рис. 9, з показана типичная конструкция колесного контактного устройства роботов с магнитами, встроенными в колесо [30].

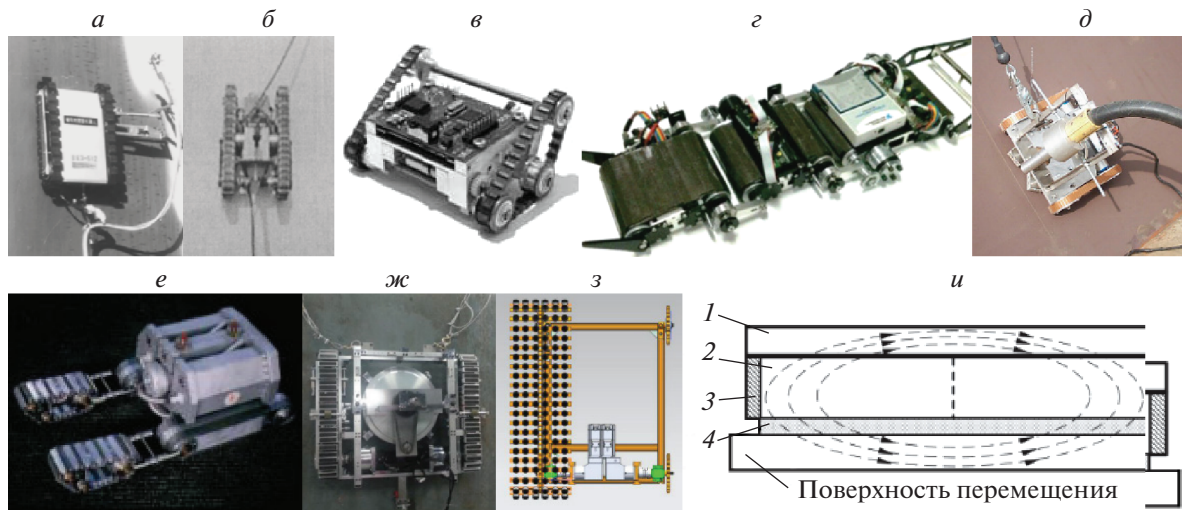


Рис. 10. Гусеничные роботы

3. Гусеничные роботы. На рис. 10 показаны системы, использующие гусеничные ленты и магниты для передвижения.

Робот, разработанный командой из Университета Дэлхаузи (Dalhousie University, Halifax, Canada) и Университета Три Ущелья (Three Gorges University, Yichang, P.R. China) [31] (рис. 10, а), и робот Шанхайского университета Цзяотун (Shanghai Jiaotong University, Shanghai, P.R. China) [32] (рис. 10, б) предназначены для инспекции больших стальных резервуаров, а робот Tripillar [33] (рис. 10, в), созданный в Федеральной политехнической школе Лозанны (École polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland), имеющий магниты как на гусеничной ленте, так и на корпусе, – для обследования внутренней поверхности угольных котлов, что обусловило его малые размеры. Робот, описанный в статье [32], имеет шарнирную раму и балансирную подвеску, что позволяет преодолевать неровности поверхности перемещения.

Робот Combot [34], предназначенный для доставки грузов в судостроительной промышленности, сконструирован командой из Университета Сеула (Seoul National University, Seoul, ROK), Йоннамского университета (Yeungnam University, Gyeongsan, ROK) и Samsung Electronics, Suwon, ROK (рис. 10, г). Он состоит из трех основных модулей, соединенных шарнирами, и управляемого хвоста; возможность поворота не предусмотрена.

Робот Lazaro [35], разработанный в Политехническом университете Картахены (Universidad politécnica de Cartagena, Cartagena, Spain), предназначен для чистки корпусов судов (рис. 10, д). Он отличается от вышеперечисленных тем, что магниты расположены в нижней части корпуса, а не встроены в гусеничную ленту.

Робот Neptune [36] создан в университете Карнег–Меллон (Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA) для обследования внутренних поверхностей резервуаров с нефтепродуктами (рис. 10, е). Он использует механически отключаемые постоянные магниты, расположенные в раме гусеничного хода, что позволяет уменьшить сопротивление при развороте на горизонтальных поверхностях, а также уменьшить налипание ферромагнитных оксидов.

Робот, сконструированный командой специалистов из Шэньчжэньских институтов передовых технологий (Shenzhen Institutes of Advanced Technology, CAS, Shenzhen, P.R. China), Харбинского научно-технического университета (Harbin University of Science and Technology, Harbin, P.R. China), Китайского университета Гонконга (The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong) и China Merchants Heavy Industry (Shenzhen) Co. Ltd. [37], предназначен для перемещения по корпусу корабля (рис. 10, ж). Контактные устройства этого робота состоят из гусеничной ленты и магнитных блоков, закрепленных на ней (рис. 10, и). Магнитный блок представляет алюминиевую раму (3) с подложкой (1), на которую установлены два постоянных магнита (2) и защитное нейлоновое покрытие (4).

Робот, разработанный Технологическим университетом Внутренней Монголии (Inner Mongolia University of Technology, Huhehot, P.R. China) и Институтом инспекции специального оборудования Ордоса (Erdos Special Equipment Inspection Institute, Ordos, P.R. China) [38], предназначен для неразрушающего контроля больших резервуаров под давлением; оборудован *pedrail* – гусеницами (рис. 10, з).

Заключение. Шагающие роботы обладают наилучшей способностью преодолевать препятствия в автономном режиме, что делает их предпочтительным вариантом для перемещения по поверхностям с нерегулярным рельефом, но они сложны механически и в управлении. Фиксаторы данных роботов обладают способностью самоочищаться от налипших ферромагнитных частиц благодаря управляемым магнитным устройствам и цикличности передвижения. Также шагающие роботы легко позволяют изменять положение корпуса относительно поверхности перемещения, не изменяя расположения стоп.

Колесные роботы имеют самую высокую скорость перемещения, просты механически и в управлении. Однако они малопригодны для преодоления препятствий и имеют малую площадь контакта с поверхностью перемещения. Большинство таких роботов не имеет возможности самоочищения контактных устройств, так как это приводит к усложнению конструкции.

Гусеничные роботы позволяют решить проблему малой площади контакта с поверхностью перемещения, а также способны преодолевать большие, чем колесные, препятствия. Однако возможно поочередное отсоединение магнитных блоков от поверхности перемещения, что приведет к опрокидыванию робота. Данная проблема требует индивидуального решения в зависимости от назначения робота. Большинство гусеничных роботов также не обладает возможностью самоочищения контактных устройств.

На основе проведенного исследования можно сделать вывод, что мало изучено влияние магнитного гистерезиса на функционирование контактных устройств с постоянными магнитами, в которых осуществляется управление силой магнитного сцепления посредством электромагнита. Также недостаточно исследованы вопросы равновесия роботов на поверхности, ориентированной к горизонту под различными углами. Изучение этих вопросов поможет определить критические режимы функционирования роботов вертикального перемещения и избежать возникновения аварийных ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Minor M., Dulimarta H., Danghi G., Mukherjee R., Tummala R. L., Aslam D.* Design, Implementation, and Evaluation of an Under-Actuated Miniature Biped Climbing Robot // Proc. 2000 IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Takamatsu: IEEE, 2000.
2. *Grieco J., Prieto M., Armada M., Gonzalez de Santos P.* A Six-Legged Climbing Robot for High Payloads // Proc. Intern. Conf. on Control Applications. Trieste: IEEE, 1998.
3. *Armando S.R., Mayra G.G., Armida G.L.* 4Steel-Robot: a Climbing Mobile Robot for Gas Containers Inspection // Proc. 3rd WSEAS/IASME Intern. Conf. on Dynamical Systems and Control. Arcachon: WSEAS Press, 2007.
4. *Kamagaluh B., Kumar J.S., Virk G.S.* Design of a Multi-terrain Climbing Robot for Petrochemical Applications // Proc. 15th Intern. Conf. on Climbing and Walking Robots, CLAWAR. Baltimore: World Scientific Publishing, 2012.
5. *Rochat F., Beira R., Bleuler H., Mondada F.* Tremo: an Inspection Climbing Inchworm Based on Magnetic Switchable Device // Proc. Intern. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. Paris: World Scientific Publishing, 2011.
6. *Rochat F., Schoeneich P., Bonani M., Magnenat S., Mondada F., Bleuler H., Christoph H.* Design of Magnetic Switchable Device (msd) and Applications in Climbing Robot // Emerging Trends in Mobile Robotics. Nagoya: World Scientific Publishing, 2010.
7. *Romao J.C., Tavakoli M., Viegas C., Pedro N., Anibal T. de Almeida.* InchwormClimber: a Light-Weight Biped Climbing Robot with a Switchable Magnet Adhesion Unit // IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). Hamburg: IEEE, 2015.
8. *Ward P., Quin P., Pagano D., Liu D., Waldron K., Dissanayake G.* Climbing Robot for Steel Bridge Inspection: Design Challenges // Austroads Bridge Conf. Sydney: ARRB Group, 2014.
9. *Ward P., Liu D., Waldron K., Hasan M.* Optimal Design of a Magnetic Adhesion for Climbing Robots // Proc. 16th International Conf. CLAWAR-2013 on Nature-Inspired Mobile Robotics. Sydney: World Scientific Publishing, 2013.

10. *Fischer W., Hürzeler C., Siegwart R.* Lightweight Magnetic Foot with Variable Force, for Docking/Landing with Micro-Helicopters on Rust-Covered Walls in Boiler Furnaces // Proc. Intern. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. Nagoya: World Scientific Publishing, 2010.
11. *Souto D., Faina A., Deibe A., Lopez-Pena F., Duro R.J.* A Robot for the Unsupervised Grit-Blasting of Ship Hulls // Intern. J. Advanced Robotic Systems. 2012. V. 9. № 3. P. 1–16.
12. *Luk B.L., White T.S., Cooke D.S., Hower N.D., Hazel G., Chen S.* Climbing Service Robot for Duct Inspection and Maintenance Applications in a Nuclear Reactor // Proc. 32nd Intern. Symp. on Robotics. Seoul: Intelligent Microsystem Center, 2001.
13. *Berns K., Braun T., Hillenbrand C., Luksch T.* Developing Climbing Robots for Education // Proc. Intern. Conf. on Climbing and Walking Robots. Madrid: Springer, 2004.
14. *Sanchez J., Vazquez F., Paz E.* Machine Vision Guidance System for a Modular Climbing Robot Used in Ship-building // 9th Intern. Conf. on Climbing and Walking Robots. Sheffield: Springer, 2006.
15. *Shang J., Bridge B., Sattar T., Mondal S., Brenner A.* Development of a Climbing Robot for Inspection of Long Weld Lines // Industrial Robot: An Intern. J. 2008. V. 35. № 3. P. 217–223.
16. *Howlader M.O.F., Sattar T.P.* Development of Magnetic Adhesion Based Climbing Robot for Non-Destructive Testing // Computer Science and Electronic Engineering Conf. (CEEC). Colchester: IEEE, 2015.
17. *Tavakoli M., Marques L., de Almeida A.T.* OmniClimber: an Omnidirectional Light Weight Climbing Robot with Flexibility to Adapt to Non-Flat Surfaces // Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Vilamoura: IEEE, 2012.
18. *Tavakoli M., Lourencxo J., Viegas C., Neto P., de Almeida A.T.* The Hybrid OmniClimber Robot: Wheel Based Climbing, Arm Based Plane Transition, and Switchable Magnet Adhesion // Mechatronics. 2016. V. 36. P. 136–146.
19. *Li J., Wang X.S.* Novel Omnidirectional Climbing Robot with Adjustable Magnetic Adsorption Mechanism // 23rd Intern. Conf. on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP). Nanjing: IEEE, 2016.
20. *Ross B., Bares J., Fromme C.* A Semi-Autonomous Robot for Stripping Paint from Large Vessels // Intern. J. Robotics Research. 2003. V. 22. № 7–8. P. 617–626.
21. *Song W., Jiang H., Wang T., Ji D., Zhu S.* Design of Permanent Magnetic Wheel-Type Adhesion-Locomotion System for Water-Jetting Wall-Climbing Robot // Advances in Mechanical Engineering. 2018. V. 10. № 7. P. 1–11.
22. *Balashov V.S., Gromov B.A., Ermolov I.L., Roskilly A.P.* Cleaning by Means of the HISMAR Autonomous Robot // J. Russian Engineering Research. 2011. V. 31. № 6. P. 589–592.
23. *Fischer W., Tache F., Siegwart R.* Inspection System for Very Thin and Fragile Surfaces, Based on a Pair of Wall Climbing Robots with Magnetic Wheels // Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS. San Diego: IEEE, 2007.
24. *Fischer W., Caprari G., Siegwart R., Moser R.* Compact Climbing Robot Rolling on Flexible Magnetic Rollers, for Generator Inspection with the Rotor Still Installed // Proc. 14th Intern. Conf. on Climbing and Walking Robots. Paris: World Scientific, 2011.
25. *Yanqiong F.E.I., Libo S.* Design and Analysis of Modular Mobile Robot with Magnetic Wheels // Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. 2008. V. 3. № 12. P. 902–911.
26. *Tache F., Fischer W., Caprari G., Moser R., Mondada F., Siegwart R.* Magnebike: a Magnetic Wheeled Robot with High Mobility for Inspecting Complex Shaped Structures // J. Field Robotics. 2009. V. 26. № 5. P. 453–476.
27. *Мунасытов П.А., Шахмаматьев Т.П., Москвичев С.С.* Телеуправляемая робототехническая система внутритрубной диагностики // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 3. С. 73–77.
28. *Мунасытов П.А., Шахмаматьев Т.П., Москвичев С.С., Слетнев П.В., Мешков И.В.* Роботизированная платформа высокой мобильности для задач диагностики элементов судовых конструкций // Тр. Междунар. научно-технической конф. “Экстремальная робототехника”. Санкт-Петербург: ООО “АП4Принт”, 2016.
29. *Fan J., Yang C., Chen Y., Wang H., Huang Z., Shou Z., Jiang P., Wei Q.* An Underwater Robot with Self-Adaption Mechanism for Cleaning Steel Pipes with Variable Diameters // Industrial Robot: An International J. 2018. V. 45. № 2. P. 193–205.
30. *Fischer W., Tache F., Siegwart R.* Magnetic Wall Climbing Robot for Thin Surfaces with Specific Obstacles // Field and Service Robotics: Results of the 6th Intern. Conf. Chamonix: Springer, 2008.
31. *Shen W., Gu J.* Permanent Magnetic System Design for the Wall-climbing Robot // Intern. Conf. on Mechatronics and Automation. Niagara Falls: IEEE, 2005.
32. *Xu Z., Ma P.* A Wall-Climbing Robot for Labelling Scale of Oil Tank’s Volume // Robotica. 2002 V. 20. № 2. P. 209–212.

33. *Rochat F., Schoeneich P., Nguyen O., Francesco M.* Tripillar: Miniature Magnetic Climbing Robot with Plane Transition Ability // Intern. Conf. on Climbing and Walking Robots. Istanbul: World Scientific, 2009.
34. *Lee G., Kim J., Seo T.* Combot: Compliant Climbing Robotic Platform with Transitioning Capability and Payload Capacity // Intern. Conf. on Robotics and Automation, ICRA. Saint Paul: IEEE, 2012.
35. *Ortiz F., Alonso D., Pastor J., Alvarez B., Iborra A.* A Reference Control Architecture for Service Robots as Applied to a Climbing Vehicle // Proc. 10th Ada-Europe Intern. Conf. on Reliable Software Technologies. New York: Springer, 2005.
36. *Schempf H., Chemel B., Everett N.* Neptune: Above-Ground Storage Tank Inspection Robot System // IEEE Robotics & Automation Magazine. 1995. V. 2. № 2. P. 9–15.
37. *Mao J., He K., Li J., Sun X.* Simulation and Experimental Verification of Permanent Magnet Adsorption Unit for Wall-Climbing Robot // Proc. IEEE Intern. Conf. on Information and Automation. Ningbo: IEEE, 2016.
38. *Zhu Y.J., Cui Z.X., Feng Z.H., Guo Y.P., Shi R.D., Li J.L., Yang T., Zhang W.Z.* Effect of Magnetic Components on the Smoothness of Linear Motion for a Pedrailed Wall-Climbing Robot // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Nanjing: IOP Publishing, 2018.