

# Адаптация технологического оборудования для использования на мобильном робототехническом комплексе вертикального перемещения (МРК), спроектированного для работы на вертикальных и горизонтальных поверхностях нефте- и газохранилищ

И. Л. Ермолов, М. М. Князьков, Е. А. Семенов, А. Н. Суханов

Рассмотрен мобильный робототехнический технологический комплекс, способный перемещаться по поверхностям произвольного наклона и выполнять инспекционные, диагностические, профилактические и иные регламентные технологические операции. На его базе создано технологическое оборудование для проведения технологического контроля поверхностей нефте- и газохранилищ и выполнения целого ряда технологических операций.

**Ключевые слова:**

робототехнический технологический комплекс, многофункциональная система диагностики, технологический контроль, модульная структура

УДК 621 | ВАК 2.5.2

DOI: 10.22184/2499-9407.2022.28.3.58.64

## Введение

Работы по ремонту, диагностике и очистке корпусов объектов хранения нефти и газа от старых лакокрасочных покрытий – весьма трудоемкий процесс, поэтому актуальным становится применение мобильных роботизированных комплексов (МРК) для автоматизации выполнения

подобных операций. МРК могут оснащаться различным диагностическим и технологическим оборудованием, однако наиболее широкое коммерческое применение получили МРК для автоматизированной очистки старых лакокрасочных покрытий. Как правило, такие системы используют технологию гидроструйной очистки поверхностей под



**Рис. 1.** МРК M250, перемещающийся по ферромагнитной поверхности. Источник <http://www.jetstreameurope.co.uk>

сверхвысоким давлением (до 3000 бар). Применение данной технологии снижает уровень образования пыли по сравнению с использованием пескоструйных и дробеструйных аппаратов. Отходы крупной фракции в этом случае собирают с помощью специального вакуумного устройства и подают в модуль фильтрации.

При этом количество отходов, которые могут попасть в окружающую среду, минимизировано.

Для фиксации МРК на вертикальной или наклонной поверхности используются один из двух распространенных методов: использование магнитных или вакуумных устройств сцепления с поверхностью.

Одним из примеров мобильных роботов, использующих для удержания магниты, является МРК Magnetic Crawler M250 (рис. 1), разработанный фирмой Jetstream Europe. Данный МРК может перемещаться по ферромагнитным поверхностям, благодаря встроенным в конструкцию постоянным магнитам, а также электромагнитам.

МРК был разработан для удаления старых лакокрасочных покрытий, а также ржавчины и окалины с поверхностей произвольного наклона. Он подходит для использования на корпусах судов, резервуарах для хранения и любых больших стальных поверхностях, для которых требуется подготовка поверхности перед нанесением нового покрытия.

Для облегчения конструкции рама МРК изготовлена из алюминия и оснащена гусеничным шасси с резиновым покрытием и двумя движителями с пневматическим приводом. Конструкция гусеничного шасси, состоящая из восьми постоянных магнитов, расположенных по обеим сторонам, позволяет ему преодолевать большие сварные швы, вмятины и другие деформированные фрагменты. Для удержания на поверхности также используется встроенный электромагнит, который повышает надежность сцепления.

Технологическая оснастка включает в себя 250-мм чистящую насадку и вакуумное устройство для удаления



**Рис. 2.** МРК Hull BUG фирмы ONR Discovery: а – внешний вид; б – работа аппарата под водой. Источник <https://www.automate.org/tech-papers/hull-cleaning-robot-for-large-ships>

мусора, включая краску и грязь. В системе очистки используется роторно-поршневой насос, обеспечивающий расход 2100 м<sup>3</sup>/ч и давление 500 бар.

Особенность данного МРК заключается в том, что он не нуждается в вакуумной системе фиксации на поверхности. Две подобные машины использовались в Северной Франции для удаления тяжелого осадка от сырой нефти с внутренних поверхностей резервуаров общим объемом 3785 м<sup>3</sup>.

Фирма ONR Discovery (США) разработала подводный аппарат Hull BUG (Hull Bio-inspired Underwater Grooming) для очистки внешней поверхности корпусов судов (рис. 2) (подробнее об очистке корпусов судов в [14]). Это автономный аппарат, принцип работы которого аналогичен работе автоматизированных платформ, которые очищают стенки бассейнов. Он оснащен колесным шасси и удерживается на корпусе судна благодаря вакуумному методу фиксации.

Сенсорная система МРК включает в себя детектор био-загрязнения, в котором используется модифицированная технология флуориметрии (метод определения концентрации вещества по интенсивности флуоресценции, возникающей при облучении вещества монохроматическим излучением), позволяющая МРК обнаруживать разницу между чистыми и грязными поверхностями на корпусе корабля.

МРК оснащен различными инструментами: вращающимися щетками и системой гидроструйной очистки. МРК Hull BUG может также осуществлять подводные инспекции корпусов кораблей.

### Структура перспективного МРК, разработанного в ИПМех РАН

Структура робототехнического комплекса вертикального перемещения разработана по модульному принципу. В зависимости от решаемых технологических задач его состав может изменяться при сохранении модульного подхода к построению структуры в целом.

Инфраструктура комплекса включает следующие базовые модули [15] (рис. 3): транспортный (5, 6), технологический (4, 7) и управляющий (3), а также сервисные

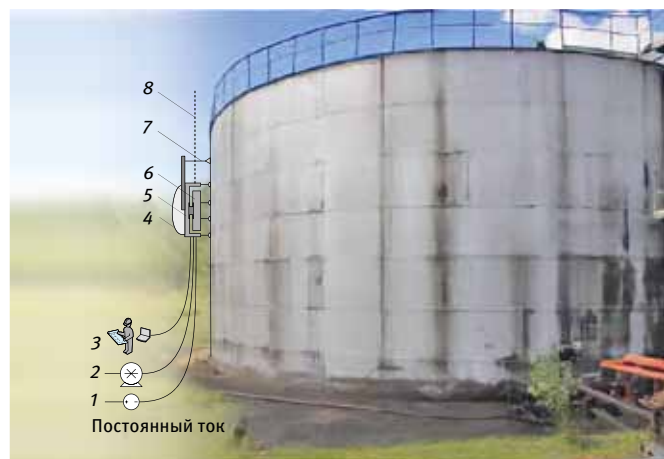


Рис. 3. Компоненты модульной структуры перспективного МРК

подсистемы: коммуникационную, подсистемы энергопитания (1, 2) и безопасной эксплуатации (8).

Назначение компонентов МРК:

- **транспортный модуль** обеспечивает сцепление и движение робота по поверхности перемещения, пневматические приводы ног робота осуществляют фиксацию захватных устройств на поверхности перемещения во время движения робота и выполнения технологических операций;
- **технологический модуль** обеспечивает работу измерительных процедур, синхронизацию измерений с движением транспортного модуля, а также организует необходимые параметры контакта и траекторию движения измерительного оборудования относительно поверхности перемещения;
- **консоль управления** представляет собой набор специализированных операторских пультов для управления движением и выполнением различных технологических операций.

Назначение подсистем:

- **коммуникационная подсистема** включает кабель электропитания для подачи напряжения 24 В на технологический и транспортный модули, кабель «витая пара» для подключения консоли управления и пневматическая магистраль для подачи воздуха диаметром 20 мм и длиной до 100 м (масса 1 м шланга 400 г);
- **подсистема энергопитания** является внешней для системы МРК и включает подсистему подачи воздуха, для этого используется компрессор или магистраль сжатого воздуха и система электроснабжения 380 В (3 фазы);
- **подсистема безопасной эксплуатации** включает средства аварийной остановки МРК, световую сигнализацию и фал страховочной системы для предотвращения аварийного отрыва МРК от поверхности.

Работа МРК начинается с его установки в начальную позицию на поверхности перемещения. Для этого МРК поднимается в стартовую зону обслуживаемого объекта и прижимается к поверхности. На электропневматическую подсистему подается электропитание и сжатый воздух, что обеспечивает надежное сцепление МРК с поверхностью. После проверки надежности сцепления, МРК готов к выполнению команд оператора. Оператор с консоли дает команду на начало движения и выводит МРК в рабочую зону на поверхности объекта. Оператор может дать команду на выполнение измерений или продолжить маневр.

Для окончания работы МРК перемещают в начальную позицию и прекращают подачу воздуха. МРК теряет сцепление с поверхностью и после отключения питания готов к транспортировке.

Таблица 1. Технические характеристики разработанного МРК

Перемещение	Поверхности произвольного наклона, с шагом 20 см (погрешность $\pm 2$ мм в пределах одного шага), а также поворот устройства на $90^\circ$
Радиус закругления поверхности	10 м
Скорость перемещения	До 4 м / мин
Дальность перемещения	До 100 м
Полезная нагрузка	До 50 кг
Габаритные размеры	
транспортной платформы	460 × 460 × 260 мм
в собранном виде с технологической платформой	790 × 760 × 560 мм
Поверхности перемещения	Металл и бетон (окрашенные или не окрашенные)
Условия работы в воздушной среде	Температура 0... +50 С°
Режимы функционирования пневматической системы	При подаче сжатого воздуха 6...10 атм. (расход воздуха от 30 м <sup>3</sup> / ч)
Навигация	Построена на базе системы телевизионного контроля, которая, помимо функций ориентации МРК в пространстве, также обеспечивает контроль обследуемой поверхности
Технологический модуль	Имеет возможность разместить на нем как инспекционное технологическое оборудование (толщиномер, структуроскоп, дефектоскоп), так и ремонтно-монтажное (например, резак, сварочный аппарат)

Основные технические характеристики МРК приведены в табл. 1.

Структурная схема транспортного модуля МРК включает три основных узла:

- корпус;
- приводную систему;
- приводы ног робота с вакуумными присосками.

Корпус МРК двухуровневый и состоит из двух платформ: основной, или маршевой, и внутренней, или поворотной.

Внутренняя платформа (рис. 4) построена на поворотном механизме и включает блок из четырех приводов ног робота, каждая из которых имеет по три вакуумные присоски. Поворотный механизм построен на базе электромотора с червячным редуктором. Передаточное число червячного редуктора равно 1/500. Каждый привод ноги робота состоит из пневмоцилиндра с рабочим давлением 2,5–10 бар и может создавать усилие в режиме втягивание / выдвигание до 1000 Н. Уровень разрежения в присосках регулируется в диапазоне 0,3–0,7 атм.

Основная платформа – это опорная часть (каркас) корпуса МРК, выполнена из алюминиевого сплава. К платформе

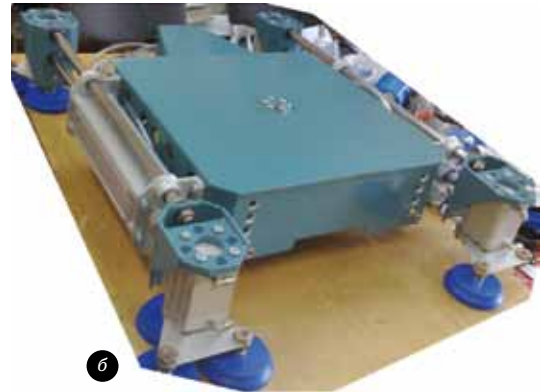


Рис. 4. Внешний вид разработанного перспективного МРК: а – внутренняя платформа МРК; б – внешняя (основная) платформа МРК

крепятся два маршевых пневмоцилиндра, которые обеспечивают перемещение МРК. Рабочее давление пневмоцилиндров – 2,5–10 бар, усилие в режиме втягивание / выдвигание составляет до 1500 Н. К маршевым пневмоцилиндрам крепятся по два привода ног робота. Каждый привод ноги робота имеет по три вакуумных присоски. Приводы ног робота и присоски идентичны тем, которые установлены на внутренней платформе МРК.

Технологический модуль МРК (рис. 5) состоит из двух основных узлов: узла контрольно-измерительной аппаратуры,

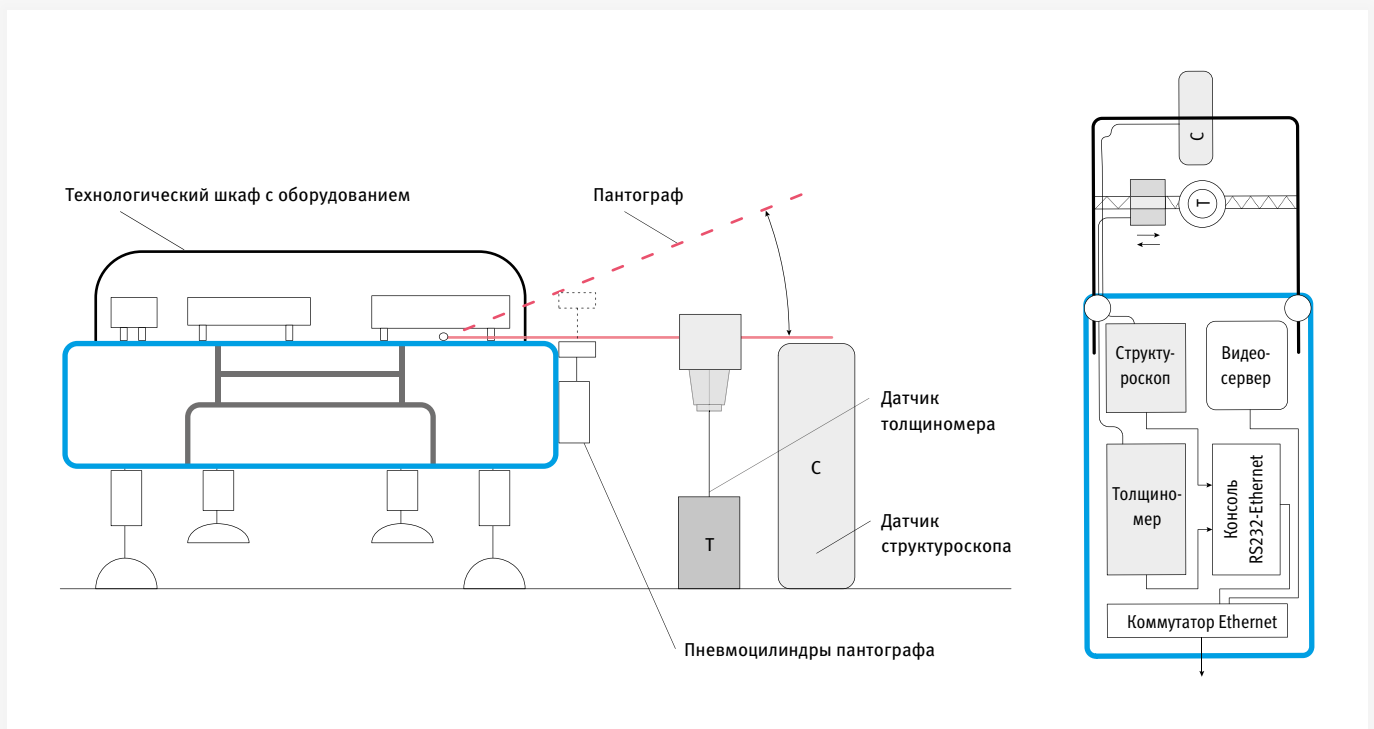


Рис. 5. Размещение технологической платформы на МРК



Рис. 6. Размещение оборудования на технологической платформе



Рис. 7. Размещение датчиков измерительного оборудования (толщиномер, структуроскоп) на пантографе

состоящим из пантографа с датчиками измерительной подсистемы и технологического шкафа с оборудованием.

Технологический шкаф с оборудованием имеет типовые размеры: 400×300×250 мм. Данные размеры позволяют разместить в нем базовое оборудование измерительной подсистемы, видеосервер, преобразователь интерфейсов RS232/Ethernet и коммутатор Ethernet.

Пантограф (рис. 6) крепится к основной платформе при помощи двух пневмоцилиндров. Пневмоцилиндры обеспечивают необходимый контакт измерительных датчиков с поверхностью.

Рабочее давление пневмоцилиндров составляет 2,5–10 бар, усилие в режиме втягивание / выдвигание до 500 Н. Продвижение датчика толщиномера по поверхности объекта обеспечивает линейный пневмопривод. Использование линейного пневмопривода позволяет получить непрерывные линейные, до 30 см, измерения участка поверхности в рабочей зоне.

На пантографе устанавливаются датчики измерительного оборудования, фотокамеры для проведения визуального контроля поверхности. На рис. 7 показаны установленные на пантографе датчики структуроскопа и толщиномера на линейном приводе.

Система управления МРК (рис. 8) включает две связанные подсистемы: управление движением и управление технологическими операциями. В целом, предусмотрено управление всей системой с одной ЭВМ с использованием нескольких программных консолей, однако для более

точного управления каждой подсистемой управление выполняется с отдельных пультов, в частности, для технологической операции «Измерение толщины» для проведения калибровок и точных настроек должен использоваться штатный пульт толщиномера УТ-04.

Программный пульт управления представляет собой ряд дружественных графических интерфейсов для работы с оборудованием МРК. Для работы программного пульта управления достаточно одного ноутбука с типовыми характеристиками.

Для управления движением предусмотрено сообщение с контроллером транспортной платформы по каналу RS232. Контроллер транспортной платформы МРК управляет работой электромагнитных клапанов и датчиков вакуума.

Для управления измерительным оборудованием предусмотрена связь с измерительной системой по проводной технологии Fast Ethernet или бес-

проводной WiFi 802.1a/b/g.

Индивидуальные пульты управления предназначены для отладки, калибровки и выполнения других специальных операций с оборудованием.

Пульт управления транспортной платформы позволяет в ручном режиме выполнять операции по маневрированию МРК.

Пульт управления толщиномером УТ-04 предназначен для проведения калибровки прибора или установки его в другой измерительный режим.

## Заключение

Разработанный перспективный мобильный робототехнический комплекс может стать одним из основных компонентов проекта по созданию многофункциональной системы диагностики, задача которого заключается в комплексном подходе к инспектированию и освидетельствованию объектов хранения нефти и газа.

По результатам исследований областей применения робототехнического комплекса можно сделать вывод о его широких эксплуатационных возможностях на различных объектах хранения нефти и газа.

Часть исследований проводится в рамках НИР «Разработка робототехнического комплекса для очистки корпуса судна от обрастания» Стратегического проекта 4 «Морская робототехника» Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

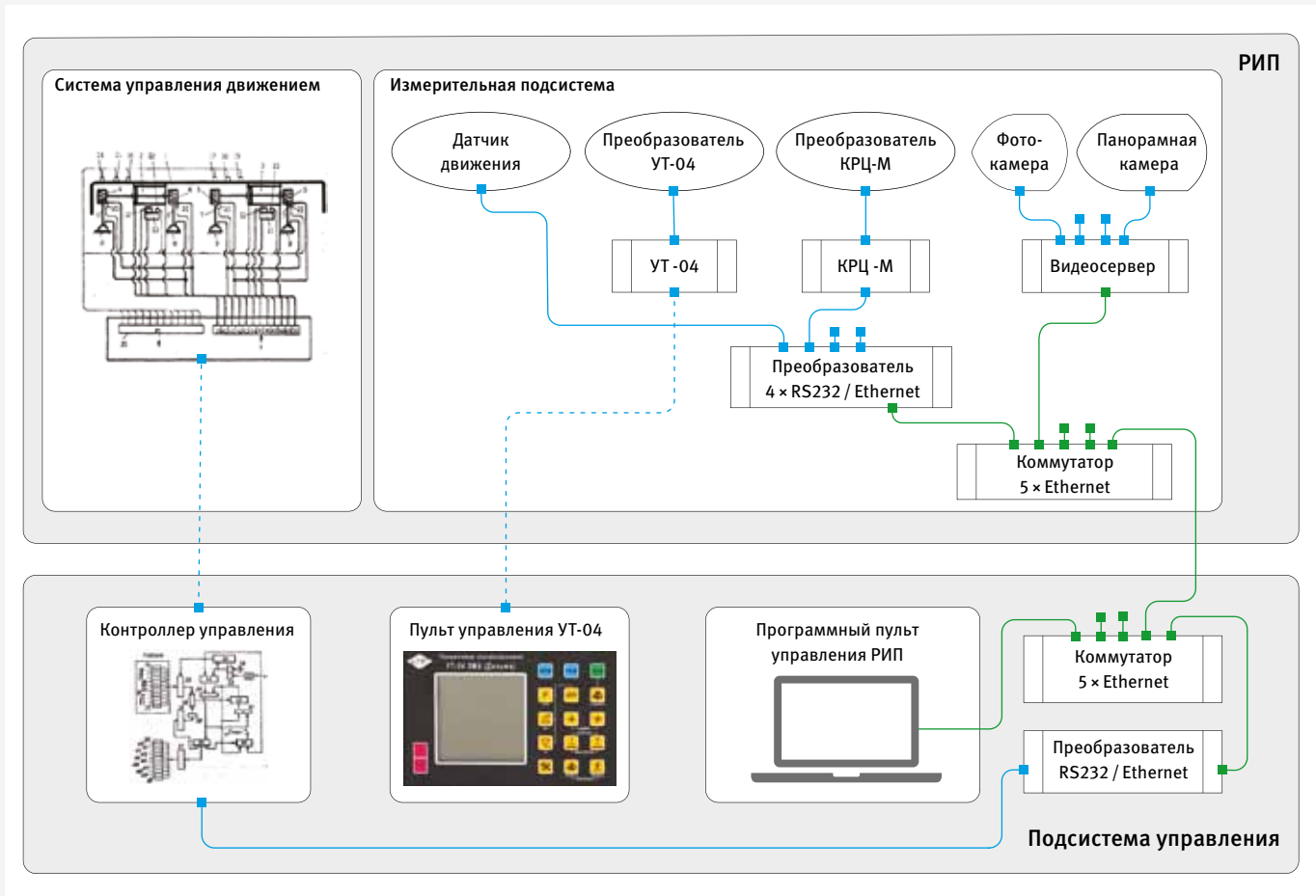


Рис. 8. Схема системы управления МРК

## Литература

1. Градецкий В. Г., Князьков М. М., Семенов Е. А., Суханов А. Н. Динамические процессы в вакуумных контактных устройствах роботов вертикального перемещения в водной среде // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20. № 7. С. 417–421.
2. Gradetsky V. G., Knyazkov M. M., Semenov E. A., Sukhanov A. N. Dynamic characteristics of pneumatic wall-climbing robots // Journal of Advanced Research in Technical Science, (North Charleston, USA). 2018. № 10–1. С. 58–64.
3. Градецкий В. Г., Князьков М. М. Состояние и перспективы развития роботов вертикального перемещения для экстремальных сред // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 1 (2). С. 9–16.
4. Князьков М. М., Семенов Е. А. Диагностический робототехнический комплекс вертикального перемещения // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. № 24 (127). С. 43–46.
5. Градецкий В. Г., Князьков М. М., Семенов Е. А., Чашухин В. Г. Основные направления и перспективы развития роботов вертикального перемещения материалы XX международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника, нано-, микро- и макро роботы». 2010. С. 41–44. Дивноморск, Россия.
6. Градецкий В. Г. Об особенностях развития робототехники в книге «Академик И. И. Артоболевский. 100-летие со дня рождения» // Материалы юбилейных заседаний Ученого совета ИМАШ и Объединенного научного совета РАН по комплексной проблеме. «Машиностроение». М.: Наука, 2007. С. 126–146.
7. Черноусько Ф. Л., Градецкий В. Г. Принципы движения и проблемы динамики мобильных роботов // Сб. материалов Международной выставки-конгресса «Мехатроника и робототехника», МИР-07, Ленэкспо, 2007. С. 89–90.
8. Градецкий В. Г., Фомин Л. Ф. Анализ динамики управляемых движений робота вертикального перемещения с многозвенными манипуляторами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 12.
9. Градецкий В. Г., Вешников В. Б., Калинин С. В., Кравчук Л. Н. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. М.: Наука, 2001. 359 с.

10. **Градецкий В. Г., Князьков М. М., Кравчук Л. Н., Соловцов В. Н., Фомин Л. Ф.** Анализ управления многосвязными мобильными роботами, перемещающимися в пространстве, Препринт ИПМех РАН, № 732. М., 2003. 35 с.
11. **Градецкий В., Рачков М., Петухов С., Иванюгин В., Выжелевский Б.** Измерительные системы робототехнического комплекса для работы в атомном реакторе, Препринт ИПМех РАН, 656, М., 1999. 46 с.
12. **Hosokai H., Hara F.** Manoeuvrability passing over obstacles on a pipeline by pipeline inspection, Proceed. of CLAWAR 2001 International Conference, Sept. 2001, Professional Engineering Publishing Ltd., London UK, pp. 883–889.
13. **Yoned K., Ota Y., Hirano K., Hirose S.** Design of a light-weight wall climbing quadruped with reduced degrees of freedom, Proceed. of CLAWAR 2001 International Conference, Sept. 2001, Professional Engineering Publishing Ltd., London UK, pp. 907–912.
14. **Balashov V. S., Gromov B. A., Ermolov I. L., Roskilly A. P.** Cleaning by means of the HISMAR autonomous robot, Journal Russian Engineering Research, June 2011, Volume 31, Issue 6, pp 589-592.
15. **Ермолов И. Л., Хрипунов С. П.** Формирование обобщенной структурной схемы робототехнических комплексов // Робототехника и техническая кибернетика. 2017. № 1.

## Авторы

**Ермолов Иван Леонидович** –

доктор технических наук, профессор, заместитель директора ФГБУН «Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН»

**Князьков Максим Михайлович** –

кандидат технических наук, с. н. с., ФГБУН «Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»

**Семенов Евгений Александрович** –

кандидат технических наук, с. н. с. ФГБУН «Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН»

**Суханов Артем Николаевич** –

кандидат технических наук, н. с. ФГБУН «Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН»

## НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 1090 руб.

# НОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Под редакцией В. А. Глазунова, С. В. Хейло

Данная монография является третьей в серии, посвященной новым механизмам, предназначенным для перспективных робототехнических и измерительных систем.

Первая книга была посвящена 80-летию Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН) и содержала работы исследователей, связанных с институтом. Во второй монографии были представлены труды авторов, работающих в различных учебных, научных и промышленных организациях.

Третья монография содержит новые результаты, связанные с синтезом и анализом механизмов, применяемых для перспективных робототехнических и измерительных систем. Рассматриваются вопросы, связанные с характеристиками и функциональными возможностями новых механизмов, применяемых в сельскохозяйственной и сварочной технике, а также в измерительных и диагностических системах.

Круг авторов данной монографии представляет разные организации: ИМАШ РАН, ФНАЦ ВИМ, МГТУ им. Н. Э. Баумана, РГАУ-МСХА, Университет ИТМО, РГУ им. А. Н. Косыгина, ЮЗГУ, научно-производственную компанию «Шторм», НТЦ «Эталон».

Издание предназначено для широкого круга читателей – студентов, аспирантов, инженеров и научных работников, занимающихся вопросами синтеза и анализа механизмов, применяемых в робототехнических системах.

М.: ТЕХНОСФЕРА,  
2022. – 244 с.,  
ISBN 978-5-94836-647-0

### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; ✉ [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru), [sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)



# ТЕРМООБРАБОТКА

Пятнадцатая международная специализированная выставка

Единственная в России выставка  
термического оборудования и технологий

## 13 - 15 сентября 2022

Россия, Москва, ЦВК "Экспоцентр", павильон 7



### Основные разделы:

- Термическое и химико-термическое оборудование
- Промышленные печи, сушильные шкафы
- Индукционное оборудование
- Жаропрочная оснастка
- Вакуумная техника и компоненты вакуумных систем
- Огнеупоры, теплоизоляция и футеровка тепловых агрегатов
- Изделия из графита, углеродного волокна и углерод-углеродных композитов
- Установки нанесения покрытий
- Диагностическое и измерительное оборудование

Независимый  
выставочный  
аудит



### Информационная поддержка:



**Факты о выставке 2021 года:** 50 экспонентов из 11 стран мира - Россия, Беларусь, Германия, Австрия, Италия, Швейцария, Польша, Китай, Словения, Франция, Турция; 3022 кв.м. экспозиции, 2150 посетителей-специалистов.

Официальный сайт выставки:  
[www.htexporus.ru](http://www.htexporus.ru)

