

16. Kiselyov L.V., Inzartsev A.V., Matviyenko Yu.V., Rylov N.I. Actual Problems of Navigation and Control at Creation of Autonomous Underwater Vehicles, *Proceedings of International Conference on Subsea Technologies SubSeaTech'2007, June 25-28, 2007, St.Petersburg, Russia*, ISBN 5-88303-409-8.
17. Matvienko Yu.V., Rylov N.I., Rylov R.N., Kamornyy A.V. Gidroakusticheskaya navigatsionnaya sistema podvodnogo robota bez opornykh navigatsionnykh mayakov [Hydroacoustic navigation system of underwater robot without reference to navigation beacons], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Researches and Robotics], 2009, No. 1, pp. 15-21.
18. Matvienko Yu.V., Kamornyy A.V., Kuz'min A.V., Nurgaliev R.F., Rylov R.N. Sposob navigatsionnogo obespecheniya avtonomnogo podvodnogo robota kontroliruemogo s borta obespechivayushchego sudna [Method of navigational support of Autonomous underwater robot controlled from the Board providing a vessel]. Patent RF No. 2 344 435, 08.05. 2007.
19. Matvienko Yu.V., Vaulin Yu.V., Kamornyy A.V. Graduirovka navigatsionnykh sredstv podvodnykh robotov [Calibration of navigation AIDS underwater robots], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Researches and Robotics], 2015, No. 1 (19), pp. 16-22.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Ю.К. Алексеев.

**Матвиенко Юрий Викторович** – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИПМТ ДВО РАН); e-mail: ymat@marine.febras.ru; г. Владивосток, ул. Суханова, 5а; тел.: 84232431624; д.т.н.; заместитель директора по научной работе.

**Инзарцев Александр Вячеславович** – e-mail: inzar@marine.febras.ru; д.т.н.; заведующий лабораторией.

**Киселев Лев Владимирович** – e-mail: kiselev@marine.febras.ru; д.т.н.; главный научный сотрудник.

**Щербатюк Александр Федорович** – e-mail: scherba@marine.febras.ru; д.т.н.; член-корр. РАН; заведующий лабораторией.

**Matvienko Yuriy Viktorovich** – The Federal State Budgetary Scientific Institution “Institute of Marine Technology Problems”, IPMT FEB RAS; e-mail: ymat@marine.febras.ru; 5A, Sukhanov street, Vladivostok, Russia; phone: +74232431624; dr. of eng. sc.; deputy director on scientific work.

**Inzartsev Alexandr Vyacheslavovich** – e-mail: inzar@marine.febras.ru; dr. of eng. sc.; head of laboratory.

**Kiselev Lev Vladimirovich** – e-mail: kiselev@marine.febras.ru; dr. of eng. sc.; chief researcher.

**Shcherbatyuk Alexandr Fedorovich** – e-mail: scherba@marine.febras.ru; dr. of eng. sc.; member-corr. of the Russian Academy of Sciences; head of laboratory.

УДК 627.02:007.52

**В.В. Чернышев, В.В. Арыканцев, Ан.Е. Гаврилов**

### **УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ПОДВОДНЫХ ШАГАЮЩИХ АППАРАТОВ ПЕРЕДВИГАЮЩИХСЯ ПО ДНУ\***

*Шагающие машины и роботы передвигающиеся по дну в ряде случаев имеют ряд существенных преимуществ в сравнении с плавающими аппаратами и традиционными колесными и гусеничными машинами. В работе обсуждаются различные подходы к управлению движением подводных шагающих робототехнических систем. Проведен анализ ин-*

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-08-01109-а, 15-41-02451 р\_поволжье-а, 15-08-04166-а, 16-31-00427-мол\_а.

*формационно-измерительных и управляющих систем известных донных самоходных устройств. Обозначены характерные проблемы, возникающие при управлении движением подводных шагающих аппаратов. Показано, что задача эффективного управления подводными шагающими роботами адаптивного типа пока еще в полной мере не решена. Предложен новый подход к управлению подводными шагающими аппаратами с цикловыми движителями. Цикловые движители позволяют не заботиться о сохранении походки и устойчивости и исключают необходимость управляемой системы адаптации. В результате машины имеют минимальное число управляемых степеней свободы и становятся существенно проще и дешевле аналогов с адаптивным управлением. Приведены некоторые результаты подводных испытаний шагающего аппарата МАК-1, специально разработанного для оптимизации параметров цикловых механизмов шагания и отработки методов управления движением шагающих робототехнических систем передвигающихся по дну. Проведенные эксперименты также подтвердили существенное превосходство шагающих машин по грунтовой и профильной проходимости перед традиционными транспортными средствами. Показано, что подводные аппараты подобного типа могут найти широкое применение уже в настоящее время. Результаты работы могут быть востребованы при разработке подводных шагающих робототехнических систем предназначенных для подводно-технических работ, для новых промышленных технологий освоения ресурсов морского дна, для обеспечения антитеррористической и техногенной безопасности объектов подводной инфраструктуры и др. работ.*

*Подводные аппараты; машины передвигающиеся по дну; робототехнический комплекс; мобильный робот; мехатронное устройство; подводно-технические работы; информационно-измерительная и управляющая система; сенсоры; шагающий движитель; подводные испытания.*

**V.V. Chernyshev, V.V. Arykantsev, An.E. Gavrilo**

#### **MOTION CONTROL OF UNDERWATER WALKING MACHINES MOVING ACROSS THE BOTTOM**

*Walking machines and robots, which move at sea bottom in some cases, have a range of significant advantages, in comparison with swimming devices and traditional wheeled and tracked machines. Different approaches to movement control of underwater walking robotic systems are discussed in the work. The analysis of information measuring and control system of known seabed self-moved units was held. Typical problems, which appear during movement control of underwater walking devices are marked. It is was shown, that task of efficient adaptive type of underwater walking robots control is not solved yet. Offered the new approach to underwater walking devices with cyclic movers control. Cyclic movers allow not to care about safety and stability of the walk and exclude the necessity of controlled adaptation system. In result, machines have a minimal number of controlled degrees of freedom and become significantly simpler and cheaper than analogues with adaptive control. Some results of the walking device МАК-1, which was developed for optimization of cyclic walking mechanisms parameters and adjustment of control methods of robotic systems, which move at sea bottom, subsea tests are shown. Held experiments are also confirmed significant excellence of walking machines on ground and shape passableness in comparison with traditional vehicles. It is shown, that underwater devices of that type can find a wide application already nowadays. Results can be demand in development of underwater walking robotic systems, designed for subsea works execution, for new industrial technologies of seabed resources mastering, for anti-terrorist and technogenic safety of subsea infrastructure objects providing, etc.*

*Underwater units, bottom-moved machines, robotic system; mobile robot; mechatronic device; subsea technical works; information measuring and control system; sensors, walking mover, subsea tests.*

**Введение.** Подводные роботизированные аппараты играют важную роль в деле исследований морей и океанов, в операциях по контролю экологического мониторинга и при проведении поисково-спасательных работ [1]. Существуют аппараты решающие задачи подводной разведки и охраны, антитеррористического патрулирования, обнаружения и уничтожения мин [2–5]. Изучение и промышлен-

ное освоение ресурсов морского дна также невозможно без специальных подводно-технических средств [6, 7]. Большинство подводных аппаратов под водой используют винтовые или водометные движители, позволяющие им маневрировать и нырять на большие глубины [1]. Вместе с тем, в ряде случаев, более удобно использовать подводные робототехнические системы передвигающиеся по дну, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с плавающими аппаратами. Так, например, плавающие аппараты зачастую не могут работать в условиях сильного подводного течения, а также в зоне прибой. В подобных условиях использование аппаратов передвигающихся по дну более удобно, так как им не надо при движении развивать скорость, превосходящую скорость течения, и они могут эффективно работать на малых глубинах и даже выползать на берег. Практика подводно-технических работ ставит целый ряд задач, связанных с проведением грунтовых работ (равнение площадок на дне, отмыв траншей для закладки в них трубопроводов и кабелей, закрытие их грунтом, разработка подводных месторождений твердых полезных ископаемых и др.). Эти работы, очевидно, также более удобно проводить с помощью машин и роботов передвигающихся по дну.

**1. Колесные и гусеничные машины передвигающиеся по дну.** Разработки колесных и гусеничных машин для подводно-технических работ и добычи ресурсов морского дна ведутся практически во всех развитых странах мира. В России, в частности, есть несколько единичных образцов подводных аппаратов на гусеничном шасси, используемых для реальных подводно-технических работ. К ним, например, относится подводный самоходный траншеекопатель [8], разработанный в ООО «Аква-эко» (г. Иркутск). Траншеекопатель разработан на базе военной машины БМП (рис. 1). Он может быть также укомплектован экскаваторной установкой, гидромолотом и др. сменным технологическим оборудованием. Глубина погружения машины — до 50 м. Управление аппаратом может осуществляться водолазом под водой или оператором с берега по кабелю. При помощи видеонаблюдения обеспечивается постоянный мониторинг рабочего пространства. Дистанционное управление позволяет выполнять подводные работы без участия водолазов, что сокращает сроки проведения работ и удешевляет их стоимость. Схожую конструкцию также имеет подводный самоходный кабелеукладчик разработанный в ЗАО «Подводспецстрой». Кабелеукладчик смонтирован на шасси тягача ГТТ. Электропитание кабелеукладчика осуществляется по кабелю с надводной платформы от дизель-генератора. Интервал перемещения кабелеукладчика за одну установку надводной платформы – до 150 м.



Рис. 1. Подводный самоходный траншеекопатель (ООО «Аква-эко»)

За рубежом машины, передвигающиеся по дну, представлены более широко. Существуют различного типа подводные бульдозеры, экскаваторы, кабелеукладчики, а также донные самоходные добычные агрегаты.

Большинство подводных бульдозеров разработаны японскими фирмами («Hitachi», «Komatsu», «Sumimoto» и др.), специализирующимися на производстве наземных бульдозеров. Наиболее типичную конструкцию имеют подводные бульдозеры фирмы «Komatsu» (Япония) [9]. Они могут иметь рабочую глубину от нескольких метров до 60–70 м. В бульдозерах предназначенных для работы на небольших глубинах воздух для работающего ДВС подается по шноркелю. Длина этой трубы определяет максимальную глубину, на которой может работать бульдозер. Такие машины Komatsu D155W для работы на глубинах до 7 м выпускались серийно (рис. 2). Делались попытки освоить 15 м, но с увеличением длины трубы продольные и поперечные уклоны, естественные для землеройной машины, создавали проблемы в плане устойчивости к опрокидыванию. В глубоководных бульдозерах, например в Komatsu UB, в качестве тягового привода используется трехфазный электродвигатель, погруженный в масло. Электропитание осуществляется по кабелю. Трансмиссия машины — механическая. Корпуса бортового механического оборудования герметичны, и в них автоматически поддерживается давление воздуха на 0,03–0,05 МПа выше давления окружающей воды. Подводные бульдозеры могут управляться с поверхности или с берега по кабелю и под водой водолазом. Для перемещения грунта бульдозеры снабжаются бульдозерным щитом, экскаваторным ковшом, навесными ножами или фрезами с грунтососами. Система управления механизмами бульдозера электрогидравлического типа. Команды в виде электрических сигналов подаются по многоканальной системе телеуправления на соленоидные клапаны гидросистемы. Все перемещения бульдозера и отдельных его механизмов отражаются на пульте поста управления. Скорость передвижения подводных бульдозеров составляет не более 3–5 км/ч. Масса бульдозеров, как правило, составляет десятки тонн.

К наиболее интересным, с технической точки зрения, подводным экскаваторам можно отнести экскаваторы фирмы «Menzi Muck» [10], созданные для строительства газопровода между Норвегией и Великобританией. Экскаваторы смонтированы на колесном шасси (рис. 3) и могут работать на глубине до 1000 м, подготавливая и выравнивая дно. Работы по расчистке дна производятся с помощью гидравлического размыва и всасывания. При необходимости подводный экскаватор может быть оснащен приспособлениями для рубки и разрушения. Экскаватор управляется оператором с помощью радиоустройства. Подводные камеры и 3D-системы обеспечивают оператора необходимой информацией.

В глубоководных подводных кабелеукладчиках также в основном используется гусеничный движитель (рис. 4), но есть устройства близкие к шагающим машинам. Так подводным рабочим органом кабелеукладчика Tусо Resolute является устройство, которое движется за судном на двух ногах спереди и двух колесах сзади [11]. С помощью этого аппарата (массой около 12 т) кабель зарывается в морское дно на глубину до 1 м. Ноги имеют определенные возможности по адаптации к изъяснам морского дна. Аппарат оборудован подводными камерами, через которые полученное изображение отображается на мониторах в операторской кабине, откуда и контролируется процесс. Управление устройством осуществляется с помощью джойстика. Скорость перемещения – не более 2 км/ч.



*Рис. 2. Подводный бульдозер фирмы «Komatsu» (Япония)*



*Рис. 3. Подводный экскаватор фирмы «Menzi Muck»*



*Рис. 4. Глубоководный гусеничный кабелеукладчик на борту судна*

Также известны донные самоходные устройства, предназначенные для добычи полезных ископаемых [7]. Так, например, компанией «De Beers Marine» для добычи алмазов у берегов Намибии используется разработанная «IHC Merwede Group» добывающая система (рис. 5), включающая в себя добычный гусеничный модуль (массой 280 т), который может работать на глубине до 200 м. Самоходный добычный модуль связан с судном производственной поддержки кабель-тросом и управляется дистанционно. Самоходный добычный агрегат разрыхляет и всасывает донный материал, который затем транспортируется к поверхности через гибкий плавучий шланг большого диаметра. Добычный модуль периодически поднимают с глубины на судно сопровождения для проведения технического обслуживания.



*Рис. 5. Подводный добычный гусеничный модуль компании «De Beers Marine» на борту судна производственной поддержки*

Наиболее близко к разработке глубоководных месторождений твердых полезных ископаемых подошла компания «Nautilus Minerals Inc.». Компания реализует проект промышленной разработки тихоокеанского месторождения полиметаллических сульфидов «Solwara 1» вблизи Папуа-Новой Гвинеи [12]. Проект предусматривает ежегодную добычу 2 млн. т рудной массы. Пробы руды с участка показывают высокое содержание золота – до 15,5 г/т, серебра – до 418 г/т, до 16 % меди и до 23,2 % цинка. Для размельчения и сбора руды предполагается использовать дистанционно управляемые добычные гусеничные модули 3-х различных типов на базе единого гусеничного шасси (рис. 6). Рудный материал будет в виде суспензии закачиваться по вертикальному металлическому трубопроводу на судно сопровождения. После обезвоживания полученное минеральное сырье будет грузиться на баржи для перевозки на берег. В настоящее время уже готовы все донные добычные модули и заканчивается изготовление судна сопровождения.

Масса самоходных добычных модулей компаний «De Beers Marine» и «Nautilus» составляет 250–300 т. Поэтому требуется судно сопровождения значительных размеров. В Южной Корее используют другой – модульный принцип построения донных добычных устройств. Модули сравнительно небольшой массы (20–30 т) предполагается соединять на дне в многосекционные блоки [13]. В рамках этой программы уже испытан 25-тонный гусеничный добычный робот MineRo (рис. 7). На его базе планируется организовать добычу марганцевой руды в Тихом океане к юго-востоку от Гавайских островов. Использование сравнительно небольших добычных устройств позволяет использовать для технологической поддержки суда сравнительно небольших размеров.



Рис. 6. Глубоководные добычные гусеничные модули компании «Nautilus Minerals»



Рис. 7. Глубоководный добычный робот MineRo (Южная Корея)

Управление самоходными гусеничными добычными модулями осуществляется оператором с судно сопровождения по кабелю. Постоянный мониторинг выполняемых работ обеспечивается, в основном, при помощи видеонаблюдения. Самоходные донные добычные модули, как правило, перемещаются в условиях известных характеристик рельефа. Проведение гидролокационной съемки рабочего пространства проводится с судна сопровождения. В таких условиях подводным добычным роботам не нужна высокоточная навигационная система и нет необходимости в системе обнаружения и обхода препятствий.

**2. Подводные шагающие аппараты.** Опыт эксплуатации подводных гусеничных и колесных машин показывает, что условия морского дна, характеризующиеся сложным рельефом и низкой несущей способностью грунтов, зачастую делают непригодными традиционные типы движителей. Даже гусеничные машины могут работать только на плотных грунтах с небольшими уклонами дна [14]. Причем и в этих условиях их возможности по грунтовой проходимости и маневренности сильно ограничены. Опыт подводно-технических работ показывает, что на слабых грунтах возможна посадка машины днищем на грунт с потерей сцепного веса. При поворотах в гусеничный движитель попадают камни или грунт и его либо заклинивает, либо слетает гусеница. Для машин передвигающихся по дну

более подходящим представляется шагающий движитель. В сравнении с гусеничными и колесными движителями, шагающие обладают более высокими возможностями по грунтовой и профильной проходимости [16–21]. Также имеет место снижение затрат тягового усилия на сопротивление движению – для шагающих машин, в отличие от колесных и гусеничных, грунт не является препятствием для движения, а лишь требует необходимых затрат мощности на его прессование [22].

К наиболее совершенным подводным шагающим роботам можно отнести ArieI-II и Crabster CR200. Автономный робот ArieI-II (рис. 8) разработан «iRobot Corporation» по заказу Управления перспективных разработок и исследований (DARPA) и Управления морских исследований США [3]. Робот предназначен для сбора противодесантных мин (массой до 6 кг) в зоне прибоя и на глубине до 22 м. При разработке робота был взят способ передвижения краба. Каждая из 6-ти ног аппарата обладает 2-мя степенями свободы. ArieI-II может передвигаться по песку, илу, гальке и перебираться через препятствия. Скорость передвижения аппарата – менее 1 км/ч. Датчики положения корпуса и системы управления ног ориентированы на быструю реакцию на изменяющиеся условия. Используется распределенную модель управления походкой, которая рассчитывает буксование и повороты, т.е. базируется на динамике взаимодействия ног с грунтом.



*Рис. 8. Подводный шагающий робот ArieI-II (США) предназначенный для сбора противодесантных мин в зоне прибоя*

ArieI-II был испытан в Атлантическом океане. Испытания подтвердили хорошую устойчивость аппарата на береговых склонах и способность локализовать стальные объекты. Однако согласно сообщениям фирмы-разработчика требуется еще большой объем работ по обеспечению динамического управления моделью [3]. При испытаниях был выявлен ряд комплексных проблем, требующих проведения дополнительных исследований. В их число входят обеспечение точной навигации, восстановление походки шагающего аппарата после случайного проскальзывания ног аппарата; преодоление препятствий в условиях крайне интенсивной турбулентности прибойной зоны.

Робот Crabster CR200 [23], разработанный Korean Institute of Ocean Science and Technology, конструктивно тоже похож на краба (рис. 9). Он является альтернативой плавающим аппаратам, которые плохо справляются с сильными подводными течениями. Движитель шагающего робота состоит из 6-ти ног, имеющих датчики касания. Передние конечности могут выполнять функции манипуляторов. Ноги, в общей сложности, насчитывают 30 управляемых приводов. Максимальная глубина погружения робота составляет 200 м, скорость передвижения — до 1 км/ч. Электропитание аппарата осуществляется с поверхности посредством гибкого кабеля. Робот оборудован высокочувствительным гидролокатором, акустической



камерой, гидроакустической системой и несколькими оптическими видеокамерами. Управление роботом осуществляется командой из 4-х человек. Первый – пилот, он отвечает за передвижение робота по дну. Второй – помощник пилота, ответственный за работу прожекторов, камер и манипуляторов. Третий, навигатор, разрабатывает маршрут и следит, чтобы аппарат двигался согласно выбранному направлению. Четвертый – инженер, контролирует функционирование систем робота, отслеживает показания 2 гидролокаторов и датчиков.



Рис. 9. Подводный шагающий робот Crabster CR200I (Южная Корея)

Crabster CR200 участвовал в спасательных операциях в Желтом море при крушении парома Sewol на глубине около 45 м. Работа в месте крушения была затруднена плохой видимостью (менее 0,2 м) и сильным течением (более 15 км/ч). Несмотря на сложные условия Crabster CR200 шел по дну, содержащему камни и грязь, и успешно использовал свою акустическую камеру и сонар для съемки изображения морского дна. Вместе с тем, он не смог войти внутрь судна. Предполагается, что следующая модификация робота должна стать с более мощным с гидравлическими захватами. Пока его силовые и тяговые возможности существенно ограничены, т.к. при реализации любого усилия совместно могут быть задействованы лишь малая часть из его 30 приводов.

**3. Отработка методов управления движением подводного шагающего аппарата МАК-1.** Управление большинства подводных колесных и гусеничных аппаратов осуществляется с поверхности оператором, получающим визуальную информацию с бортовых видеосенсоров. Такой подход к управлению многоногими шагающими машинами не применим, так как оператор не может эффективно управлять всеми ногами одновременно. Механизмы шагания всех известных подводных аппаратов – это адаптивные механические системы с 3-мя и более управляемыми степенями свободы. Ноги имеют следящие привода по каждой из степеней свободы, что обуславливает сложность их согласованного управления, высокую стоимость и сравнительно низкую надежность роботов такого типа. Известные интеллектуальные системы управления шагающими роботами, также еще несовершенны и не могут быть реализованы в аппаратах небольшой стоимости. Таким образом, проблема эффективного согласованного управления ногами подводных шагающих роботов пока еще не решена. Также, из-за плохой видимости под водой, существует проблема определения характеристик рабочего пространства. Приходится использовать сенсоры различного типа. Поступающая с них информация зачастую носит противоречивый характер и управление осуществляется в условиях неполного и неоднозначного представления о текущей ситуации.

Для отработки методов управления движением подводных шагающих робототехнических систем и оптимизации на стадии проектирования параметров их механизмов шагания в ВолгГТУ (совместно с ОАО «ЦКБ «Титан») разработан подводный шагающий аппарат МАК–1 [24]. Конструктивно МАК–1 (рис. 10) включает в себя шагающие опоры (шагающие модули) правого и левого борта, соединенные посредством сменной рамы, которая может меняться в зависимости от типа навесного оборудования. Шагающие опоры выполнены в виде несущих балок, на которых установлены шагающие движители и тяговый электропривод. Бортовые электропривода (на базе асинхронных электродвигателей с частотным регулированием скорости вращения), выполнены в виде отдельных силовых блоков, расположенных в водозащищенных боксах. Суммарная мощность бортовых приводов – около 2 кВт. Скорость аппарата, в зависимости от условий движения, составляет 3–5 км/ч. Длина шага 0,8–1,2 м. Питание привода осуществляется по кабелю от бензогенератора. Управление также осуществляется по кабелю по видеоинформации, поступающей с бортовых цветных видеокамер с инфракрасной подсветкой. Поворот осуществляется за счет разных скоростей бортов либо за счет разной длины шага движителей правого и левого борта. Робот при габаритах 1,8x1,8x0,9 м весит около 170 кг. Модульный принцип построения робота позволяет его разбирать на части и легко транспортировать на большие расстояния. Для сборки аппарата достаточно 2-х человек.



*Рис. 10. Подводный шагающий аппарат МАК–1 (ВолгГТУ, Россия)*

Шагающие движители каждого борта аппарата состоят из 3-х механизмов шагания. Механизмы шагания – цикловые, на базе 4-х звенных плоских механизмов, с шарнирно присоединенными сменными стопами (рис. 11,а). Входящие в состав движителя механизмы шагания кинематически связаны и работают в противофазе (2 механизма работают синфазно, а средний в противофазе). В результате в любой момент времени хотя бы один из механизмов шагания находится в опорной фазе. Коэффициент режима такого движителя равен 1. Использование цикловых движителей позволяет не заботиться о сохранении походки и устойчивости и исключает необходимость адаптивной системы управления. В результате машины имеют минимальное число управляемых приводов и становятся проще, надежнее и на порядок дешевле аналогов с адаптивным управлением. Вместе с тем моделирование типовых режимов движения показывает, что для полной реализации возможностей циклового движителя по профильной проходимости и маневренности необходима возможность корректировки программных движений ног. Например, увеличение высоты или длины шага при прохождении препятствия, комбинирование положения опорных точек при повороте для снижения момента сопротивления

повороту и др. В аппарате возможность корректировки движений ног была достигнута путем введения в механизм шагания управляемого поворотного звена – дополнительного кривошипа с линейным электроприводом (рис. 11,а) [25].

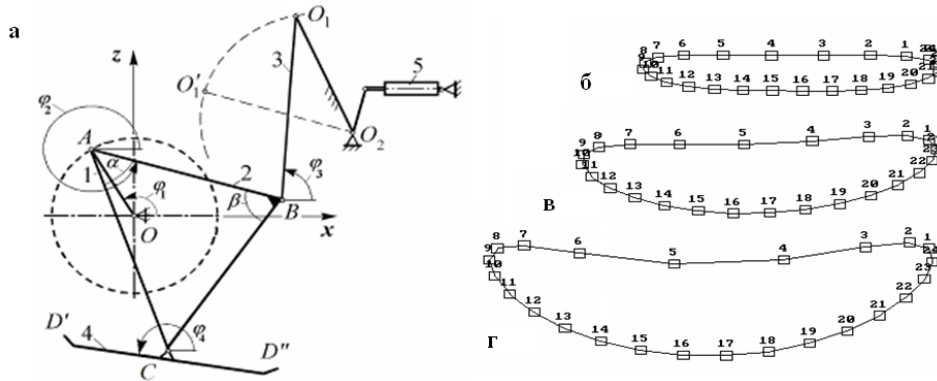


Рис. 11. Механизм шагания аппарата МАК-1 (а) и трансформация траектория его опорной точки С при смещении точки подвеса коромысла (б, в, г):  
 1 – ведущий кривошип; 2 – опорное звено (нога); 3 – коромысло; 4 – стопа;  
 $O_1O_2$  – управляемое поворотное звено

Управление траекторией опорных точек сводится к дискретному изменению углового положения кривошипа (аналогично переключению передач в традиционных транспортных средствах). Это приводит к смещению точки подвеса коромысла и трансформированию базовой траектории маршевого движения (рис. 11,б) в траекторию режима преодоления препятствий с увеличенной высотой и длиной шага (рис. 11,в,г). Механизм шагания при этом остается одноступенным. Точки на траекториях расположены через равные промежутки времени – через  $1/24$  периода цикла. Нижние ветви траекторий (точки 11–22) соответствуют опорной фазе. В маршевом режиме движения (рис. 11,б) опорная ветвь траектории практически не отличается от прямой, поэтому движение аппарата происходит практически без вертикальных колебаний корпуса. В режимах специального маневрирования такие колебания имеют место в каждом цикле движения, что требует дополнительных энергозатрат. Поэтому их целесообразно использовать лишь при малых скоростях. Для проверки работоспособности основных систем шагающего аппарата МАК-1 были проведены его подводные испытания [26]. Испытания проводились на малых глубинах (до 20 м) в Кандалакшском заливе Белого моря (рис. 12). Предполагается, что в дальнейшем аппарат сможет работать на глубинах до 300 м. Подводные испытания показали, что МАК-1 уже сейчас превосходит известные зарубежные аналоги по скорости и маневренности. Максимальная скорость передвижения робота под водой сейчас составляет 3–5 км/ч и может быть увеличена до 7–10 км/ч. Также он проще в управлении и превосходит зарубежные аналоги по тяговым возможностям. Модульный принцип построения аппарата позволяет его легко модернизировать для решения конкретных задач. По адаптации к опорной поверхности МАК-1 несколько уступает аналогам адаптивного типа — адаптация к неорганизованной опорной поверхности происходит не за счет требуемого движения стоп в пространстве, а за счет изменения длины или высоты шага и за счет хорошей маневренности. Так же требует доработки его система управления движением.

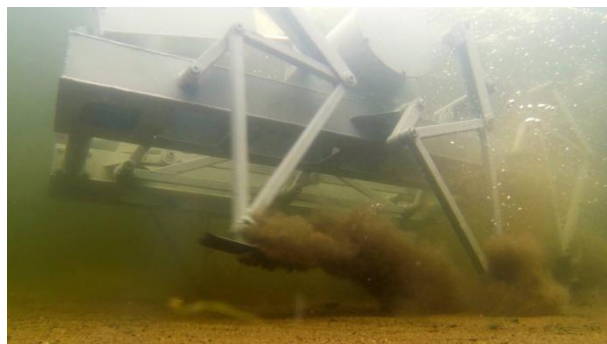


Рис. 12. Подводные испытания шагающего аппарата МАК–1

Предполагается реализовать следующий подход при управлении движением. Оператор находится вне рабочего пространства (на берегу или лодке) и контролирует работу автономно работающей машины по информации поступающей по кабелю с бортовых видеосенсоров. Он задает скорость и направление движения и может менять, в зависимости от окружающей обстановки, длину и высоту шага (аналогично переключению передач в традиционных транспортных средствах), а в управление ногами вмешивается лишь при необходимости. При проведении подводных испытаний такое управление уже было успешно реализовано. Задачу управления движением ног предполагается решать без участия оператора на низшем уровне управления (бортовым компьютером). При этом не ставится задача выделения алгоритмами обработки изображений полезной информации в сигналах бортовых видеокамер с целью определения характеристик рабочего пространства. Внешние условия будут задаваться и отображаются на экране монитора оператора как функции углов и угловых скоростей шарнирно закрепленных стоп, по положению ведущих кривошипов и по току бортовых тяговых электродвигателей. Эта задача пока еще в полной мере не решена. Система управления на низшем уровне, в общем случае, не позволяет обнаруживать и достоверно определять тип и расположение препятствий – управление будет осуществляться в условиях неполного и неоднозначного представления о текущей ситуации. Поэтому возможны сбои в управлении, при которых управление передается на верхний уровень (оператору машины). Такая система управления существенно проще, чем у подводных шагающих роботов адаптивного типа и ее можно будет реализовать в подводных аппаратах сравнительно малой стоимости.

**Заключение.** Управление практически всех передвигающихся по дну машин с традиционными типами движителей осуществляется с поверхности оператором, получающим визуальную информацию с бортовых видеосенсоров. Такой подход к управлению многоногими шагающими машинами не применим, так как оператор не может эффективно управлять всеми ногами одновременно. Известные интеллектуальные системы управления подводными шагающими роботами, также еще несовершенны и не могут быть реализованы в аппаратах небольшой стоимости. Задача управления подводными шагающими аппаратами может быть существенно упрощена в случае использования шагающих движителей циклового типа. Использование цикловых движителей позволяет не заботиться о сохранении походки и устойчивости и исключает необходимость адаптивной системы управления. В результате машины имеют минимальное число управляемых приводов и становятся существенно проще и дешевле аналогов с адаптивным управлением. При этом возможности циклового движителя по адаптации к опорной поверхности, как показали подводные испытания шагающего аппарата МАК–1, можно существенно

повысить путем корректировки программных движений ног. Подводные шагающие аппараты с двигателями подобного типа отличаются простотой и надежностью и могут найти широкое применение уже в настоящее время.

Результаты работы могут быть востребованы при разработке подводных шагающих робототехнических систем предназначенных для подводно-технических работ, для новых промышленных технологий освоения ресурсов морского дна, для обеспечения антитеррористической и техногенной безопасности объектов подводной инфраструктуры и др. работ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ляхов Д.Г.* Современные задачи подводной робототехники // Подводные исследования и робототехника. – 2012. – № 1. – С. 15-23.
2. *Илларионов Г.Ю.* Некоторые аспекты военного применения подводных роботов за рубежом // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 3 (128). – С. 65-75.
3. *Илларионов Г.Ю., Сидоренко В.В., Смирнов С.В.* Автономные необитаемые подводные аппараты для поиска и уничтожения мин // Подводные исследования и робототехника. – 2006. – № 1. – С. 31-39.
4. *Сиденко К.С., Латтев К.З., Илларионов Г.Ю.* Управляемые по кабелю необитаемые подводные аппараты для поиска и уничтожения мин // Двойные технологии. – 2009. – № 3. – С. 28-31.
5. *Сиденко К.С., Илларионов Г.Ю.* Новые подходы к проблеме защиты объектов морской инфраструктуры от подводных диверсантов и террористов // Морская радиоэлектроника. – 2008. – № 4. – С. 2-9.
6. *Андреев С.И., Казакова В.Е., Бабаева С.Ф., Черкашнёв Г.А.* Твердые полезные ископаемые мирового океана: история открытий, геологическое изучение, перспективы освоения // Горный журнал. – 2013. – № 11. – С. 65-72.
7. *Verichev S., Laurens de Jonge, Wiebe B., Rodney N.* Deep mining: from exploration to exploitation // Minerals of the Ocean – 7 & Deep-Sea Minerals and Mining – 4: abstracts of International Conference / VNIIOkeangeologia. St. Petersburg, 2014. – P. 126-138.
8. Подводно-технические работы. – Режим доступа: <http://www.птр.аква-эко.рф/content/podvodnyu-transheekopatel>. – Загл. с экрана.
9. Amphibious Bulldozer. – Режим доступа: [http://www.komatsu.com/CompanyInfo/views/pdf/201312/Views\\_No20\\_amphibious\\_bulldozer.pdf](http://www.komatsu.com/CompanyInfo/views/pdf/201312/Views_No20_amphibious_bulldozer.pdf). – Загл. с экрана.
10. Подводный экскаватор Menzi Muck подготавливает океанское дно к прокладке газопровода – Режим доступа: [http://www.exkavator.ru/main/news/inf\\_news/~id=7683](http://www.exkavator.ru/main/news/inf_news/~id=7683). – Загл. с экрана.
11. Кабелеукладчик «Tyco Resolute». – Режим доступа: [http://korabley.net/news/kabeleukladchik\\_tyco\\_resolute/2011-02-21-778](http://korabley.net/news/kabeleukladchik_tyco_resolute/2011-02-21-778). – Загл. с экрана.
12. Nautilus Minerals. – Режим доступа: <http://www.nautilusminerals.com>. – Загл. с экрана.
13. *Jin-Ho Kim, Tae-Kyeong Yeu, Suk-Min Yoon, Hyung-Woo Kim, Jong-Su Choi, Cheon-Hong Min and Sup Hong* Electric-Electronic System of Pilot Mining Robot, MineRo-II // Proceedings of the Tenth ISOPE Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium Szczecin, Poland, September 22-26, 2013. – P. 269-273.
14. *Hong S., Kim H.W., Choi J.S.* Transient Dynamic Analysis of Tracked Vehicles on Extremely Soft Cohesive soil // The 5th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. – 2002. – P. 100-107.
15. *Kim H.W., Hong S., Choi J.S.* Comparative Study on Tracked Vehicle Dynamics on Soft Soil: Single-Body Dynamics vs. Multi-body Dynamics, ISOPE, OMS-2003, Tsukuba, Japan, 2003. – P. 132-138.
16. *Брискин Е.С., Чернышев В.В., Малолетов А.В., Шаронов Н.Г.* Сравнительный анализ колёсных, гусеничных и шагающих машин // Робототехника и техническая кибернетика. – 2013. – № 1. – С. 6-14.
17. *Pavlovsky, V.E., Platonov, A.K.* Cross-Country Capabilities of a Walking Robot, Geometrical, Kinematical and Dynamic Investigation // Theory and Practice of Robots and Manipulators, Romansy 13: Proc. of the 13-th CISM-IFTOMM Symposium, Zakopane, Poland, 2000. – P. 131-138.
18. *Брискин Е.С., Чернышев В.В., Малолетов А.В. и др.* Шагающая машина «Восьминог» // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 5. – С. 48-49.

19. Чернышев В.В. Опыт использования шагающей машины для ликвидации аварийного разлива нефти // Безопасность жизнедеятельности. – 2003. – № 5. – С. 28-30.
20. Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V. et al. On ground and profile practicability of multi-legged walking machines // Climbing and Walking Robots. CLAWAR 2001: Proc. of the 4-th Int. Conf. Karlsruhe, Germany, 2001. – P.1005-1012.
21. Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V., Zhoga V.V. The Investigation of Walking Machines with Movers on the Basis of Cycle Mechanisms of Walking // The 2009 IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation: conf. proceedings. – [China], 2009. – P. 3631-3636.
22. Chernyshev V.V., Gavrilov A.E. Traction properties of walking machines on underwater soils with a low bearing ability // Minerals of the Ocean – 7 & Deep-Sea Minerals and Mining – 4: abstracts of Int. Conf. / VNIIOkeangeologia. St. Petersburg, 2014. – P. 21-24.
23. Yoo, S.Y., Jun, B.H., Shim, H. (2014). Design of static gait algorithm for hexapod subsea walking robot: Crabster, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, A. – September 2014. – Vol. 38, Issue 9. – P. 989-997.
24. Чернышев В.В. Арыканцев В.В. МАК-1 – подводный шагающий робот // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 2. – С. 45-50.
25. Патент 2207583 РФ В 62 D 57/032. Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / Чернышев В.В., Брискин Е.С., Савин А.Ю. – Волгоград: ВолГГТУ, 2003.
26. Арыканцев В.В., Чернышев В.В. Подводные исследования тягово-сцепных свойств и проходимости шагающего аппарата МАК-1 // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 10. – С. 169-178.

## REFERENCES

1. Lyakhov D.G. Sovremennye zadachi podvodnoy robototekhniki [The challenges of underwater robotics], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Researches and Robotics], 2012, No. 1, pp. 15-23.
2. Illarionov G.Yu. Nekotorye aspekty voennogo primeneniya podvodnykh robotov za rubezhom [Some aspects for military application of underwater vehicles abroad], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 3 (128), pp. 65-75.
3. Illarionov G.Yu., Sidorenko V.V., Smirnov S.V. Avtonomnye neobitaemye podvodnye apparaty dlya poiska i unichtozheniya min [Autonomous unmanned underwater vehicles for search and destruction of mines], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Researches and Robotics], 2006, No. 1, pp. 31-39.
4. Sidenko K.S., Laptev K.Z., Illarionov G.Yu. Upravlyaemye po kabelyu neobitaemye podvodnye apparaty dlya poiska i unichtozheniya min [Managed cable uninhabited underwater vehicles for search and destruction of mines], *Dvoynye tekhnologii* [Dual technology], 2009, No. 3, pp. 28-31.
5. Sidenko K.S., Illarionov G.Yu. Novye podkhody k probleme zashchity ob"ektov morskoy infrastruktury ot podvodnykh diversantov i terroristov [New approaches to the problem of protection of objects of sea infrastructure from underwater saboteurs and terrorists], *Morskaya radioelektronika* [Marine Radio electronics], 2008, No. 4, pp. 2-9.
6. Andreev S.I., Kazakova V.E., Babaeva S.F., Cherkashev G.A. Tverdye poleznye iskopaemye mirovogo okeana: istoriya otkrytiy, geologicheskoe izuchenie, perspektivy osvoeniya [Solid minerals in the world ocean: history of discoveries, geological research, prospects of development], *Gornyy zhurnal* [Mining Journal], 2013, No. 11, pp. 65-72.
7. Verichev S., Laurens de Jonge, Wiebe B., Rodney N. Deep mining: from exploration to exploitation, *Minerals of the Ocean – 7 & Deep-Sea Minerals and Mining – 4: abstracts of International Conference*, VNIIOkeangeologia. St. Petersburg, 2014, pp. 126-138.
8. Podvodno-tekhnicheskie raboty [Underwater-technical work]. Available at: <http://www.ptr.akva-eko.rf/content/podvodnyy-transheekopatel>.
9. Amphibious Bulldozer. Available at: [http://www.komatsu.com/CompanyInfo/views/pdf/201312/Views\\_No20\\_amphibious\\_bulldozer.pdf](http://www.komatsu.com/CompanyInfo/views/pdf/201312/Views_No20_amphibious_bulldozer.pdf).
10. Podvodnyy ekskavator Menzi Muck podgotavlivaet okeanskoe dno k prokladke gazoprovoda [Underwater excavator Menzi Muck shall prepare the ocean floor for the laying of vasoprovoda]. Available at: [http://www.exkavator.ru/main/news/inf\\_news/~id=7683](http://www.exkavator.ru/main/news/inf_news/~id=7683).
11. Kabeukladchik «Tyco Resolute» [A Cable-Handling Vessel "Tyco Resolute"]. Available at: [http://korabley.net/news/kabeukladchik\\_tyco\\_resolute/2011-02-21-778](http://korabley.net/news/kabeukladchik_tyco_resolute/2011-02-21-778).
12. Nautilus Minerals. Available at: <http://www.nautilusminerals.com>.

13. Jin-Ho Kim, Tae-Kyeong Yeu, Suk-Min Yoon, Hyung-Woo Kim, Jong-Su Choi, Cheon-Hong Min and Sup Hong Electric-Electronic System of Pilot Mining Robot, MineRo-II, *Proceedings of the Tenth ISOPE Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium Szczecin, Poland, September 22-26, 2013*, pp. 269-273.
14. Hong S., Kim H.W., Choi J.S. Transient Dynamic Analysis of Tracked Vehicles on Extremely Soft Cohesive soil, *The 5th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium*, 2002, pp. 100-107.
15. Kim H.W., Hong S., Choi J.S. Comparative Study on Tracked Vehicle Dynamics on Soft Soil: Single-Body Dynamics vs. Multi-body Dynamics, ISOPE, OMS-2003, Tsukuba, Japan, 2003, pp. 132-138.
16. Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V., Sharonov N.G. Sravnitel'nyy analiz kolesnykh, gusenichnykh i shagayushchikh mashin [Comparative analysis of wheeled, tracked and walking machines], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2013, No. 1, pp. 6-14.
17. Pavlovsky, V.E., Platonov, A.K. Cross-Country Capabilities of a Walking Robot, Geometrical, Kinematical and Dynamic Investigation, *Theory and Practice of Robots and Manipulators, Romansy 13: Proc. of the 13-th CISM-IFTOMM Symposium, Zakopane, Poland, 2000*, pp. 131-138.
18. Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V. i dr. Shagayushchaya mashina «Vos'minog» [Walking machine "Octopus"], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. [Mechatronics, Automation, Control], 2004, No. 5, pp. 48-49.
19. Chernyshev V.V. Opyt ispol'zovaniya shagayushchey mashiny dlya likvidatsii avariynogo razliva nefi [Experience in the use of a walking machine for the elimination of emergency oil spill], *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life Safety], 2003, No. 5, pp. 28-30.
20. Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V. et al. On ground and profile practicability of multi-legged walking machines, *Climbing and Walking Robots. CLAWAR 2001: Proc. of the 4-th Int. Conf. Karlsruhe, Germany, 2001*, pp. 1005-1012.
21. Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V., Zhoga V.V. The Investigation of Walking Machines with Movers on the Basis of Cycle Mechanisms of Walking, *The 2009 IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation: conf. proceedings*. China, 2009, pp. 3631-3636.
22. Chernyshev V.V., Gavrilov A.E. Traction properties of walking machines on underwater soils with a low bearing ability, *Minerals of the Ocean – 7 & Deep-Sea Minerals and Mining – 4: abstracts of Int. Conf./VNIOkeangeologia*. St. Petersburg, 2014, pp. 21-24.
23. Yoo, S.Y., Jun, B.H., Shim, H. Design of static gait algorithm for hexapod subsea walking robot: Crabster, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, A*. September 2014, Vol. 38, Issue 9, pp. 989-997.
24. Chernyshev V.V. Arykantsev V.V. MAK-1 – podvodnyy shagayushchiy robot [MAC-1 – underwater walking robot], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2015, No. 2, pp. 45-50.
25. Chernyshev V.V., Briskin E.S., Savin A.Yu. Shagayushchaya opora dlya transportnykh sredstv povy-shennoy prokhdimosti [Walking bearing for vehicles terrain], Patent 2207583 RF V 62 D 57/032. Volgograd: VolgGTU, 2003.
26. Arykantsev V.V., Chernyshev V.V. Podvodnye issledovaniya tyagovo-stsepnnykh svoystv i prokhdimosti shagayushchego apparata MAK-1 [Subsea investigations of traction properties and passability of walking unit MAK-1], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 10, pp. 169-178.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Пындак.

**Чернышев Вадим Викторович** – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: dtm@vstu.ru; 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, 28; д.т.н.

**Арыканцев Владимир Владимирович** – аспирант.

**Гаврилов Андрей Евгеньевич** – к.т.н.

**Chernyshev Vadim Viktorovich** – Volgograd State Technical University; e-mail: dtm@vstu.ru; 28, Lenin ave., Volgograd, 400005, Russia; dr. of eng. sc.

**Arykantsev Vladimir Vladimirovich** – postgraduate student.

**Gavrilov Andrei Evgenievich** – of eng. sc.