

РОБОТОТЕХНИКА
И МЕХАТРОНИКА

УДК 629.369

**В. В. Чернышев, В. В. Арыканцев,
А. Е. Гаврилов, Я. В. Калинин**

*Волгоградский государственный технический университет,
г. Волгоград, Россия*

ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВИЖИТЕЛЯ ПОДВОДНОГО ШАГАЮЩЕГО АППАРАТА С ДОННЫМ ГРУНТОМ¹

Обсуждаются результаты испытаний подводного шагающего аппарата МАК-1. Предложена методика исследования динамики взаимодействия шагающего движителя с подводным грунтом. Результаты работы могут быть востребованы при разработке подводных шагающих робототехнических систем для новых промышленных технологий освоения ресурсов морского дна.

Ключевые слова: подводные аппараты, мобильные роботы, шагающий движитель, взаимодействие с грунтом, натурные испытания.

**V. V. Chernyshev, V. V. Arykantsev,
A. E. Gavrilov, Y. V. Kalinin**

Volgograd State technical University, Russia, Volgograd

RESEARCH OF DYNAMIC OF UNDERWATER WALKING MACHINE MOVER WITH BOTTOM GROUND

The results of underwater walking machine MAK-1 tests are discussed. Research method of dynamic of interaction of walking mover with underwater ground has been offered. The results can be used in underwater walking robotic systems development for new industrial technologies of developing resources of sea bottom.

Key words: underwater devices, mobile robots, walking mover, interaction with ground, real tests.

В условиях возрастающего дефицита минерального сырья наблюдается повышенный интерес к разработке подводных месторождений полезных ископаемых [1]. Важная роль среди машин для освоения ресурсов морского дна отводится самоходным донным агрегатам, несущим на себе добычные рабочие органы в виде рыхлителей, ковшей, подборщиков, отвалов, грунтовых насосов и т.п.

© Чернышев В. В., Арыканцев В. В., Гаврилов А. Е., Калинин Я. В., 2015

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 13-08-01144-а, 15-08-10166-к, 14-01-31376-мол-а и гранта Президента РФ МК-6434.2014.1.

В качестве самоходных донных добычных агрегатов уже используются гусеничные машины [2]. Однако условия морского дна зачастую делают непригодными традиционные типы движителей из-за низкой несущей способности грунтов и сложного рельефа дна. Шагающий движитель представляется более подходящим для донных добычных агрегатов.

В сравнении с гусеничными и колесными машинами, шагающие обладают более высокими возможностями по грунтовой и профильной проходимости [3–5]. Также имеет место снижение затрат тягового усилия на сопротивление движению – грунт для шагающих машин, в отличие от колесных и гусенич-

ных, не является препятствием для передвижения, а лишь требует необходимых затрат мощности на его прессование [6; 7]. Схема сил, действующих на колесную, гусеничную и шагающую машину, приведена на рис. 1, где $F_{\text{тяги}}$ – сила тяги, идущая на совершение полезной (тяговой) работы; $F_{\text{сцепл}}$ – сила сцепления; $F_{\text{сопр}}$ – сила сопротивления движению со стороны грунта; $R_{\text{воды}}$ – сила гидравлического сопротивления воды.

Как видно из схемы сил, для наземных колесных и гусеничных транспортных средств $F_{\text{тяги}} = F_{\text{сцепл}} - F_{\text{сопр}}$. Силы сцепления $F_{\text{сцепл}} = k_{\phi} N$ и сопротивления движению $F_{\text{сопр}} = k_f N$ пропорциональны нормальной реакции грунта N . Для слабонесущих грунтов соотношение коэффициентов сцепления k_{ϕ} и сопротивления движению k_f таково, что даже гусеничный движитель на таких грунтах не позволяет реализовать значительных тяговых усилий. На слабых грунтах у гусеничных машин коэффициент сцепления лежит, как правило, в пределах $k_{\phi} = 0,2-0,3$, а коэффициент $k_f = 0,1-0,2$. В подводных условиях сила тяги уменьшается на силу сопротивления воды $R_{\text{воды}}$. Так как колесные и гусеничные машины имеют плохо обтекаемые корпуса, то сила сопротивления воды соизмерима с $F_{\text{сопр}}$ даже при небольших скоростях движения. Придонное течение может привести к возрастанию силы $R_{\text{воды}}$ во много раз. Также нужен определенный запас тяги для преодоления уклонов. Таким образом, традиционные транспортные средства могут двигаться под водой лишь на пределе сцепления.

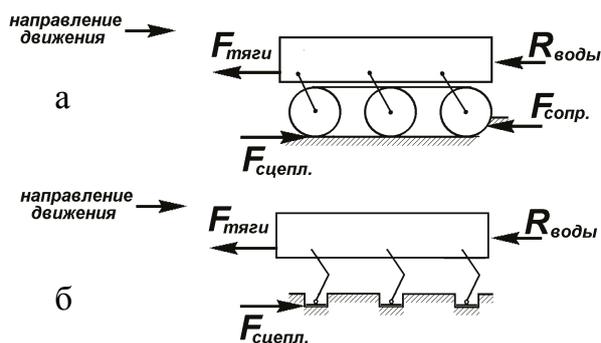


Рис. 1. Силы, действующие на колесную и гусеничную (а) и шагающую (б) машину

Шагающий движитель может обеспечить на слабонесущих грунтах более высокие тягово-сцепные свойства. Сила тяги (без учета сопротивления воды) для шагающих машин равна силе сцепления $F_{\text{тяги}} = F_{\text{сцепл}}$ (рис. 1, б). Кроме того, аналог коэффициента сцепления для шагающих машин может быть $\gg 1$. Например, если ноги находятся глубоко в грунте, то, очевидно, можно реализовать значительную горизонтальную силу тяги.

В Волгоградском государственном техническом университете с целью определения влияния конструктивных особенностей шагающего движителя на его тягово-сцепные свойства в подводных условиях были проведены экспериментальные исследования динамики взаимодействия его опорных элементов (стоп) с донным грунтом. Исследования осуществлялись путем испытаний на небольших глубинах подводного шестиногого шагающего аппарата МАК-1 (рис. 2), разработанного



Рис. 2. Испытания подводного шагающего аппарата МАК-1

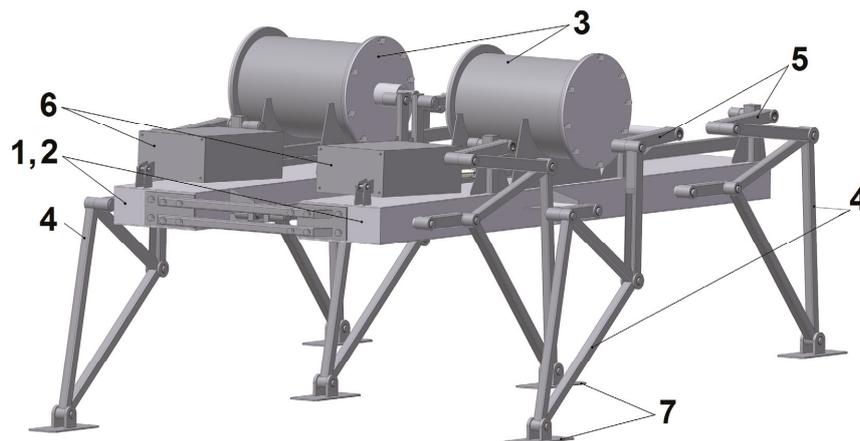


Рис. 3. Конструктивная схема подводного шагающего аппарата МАК-1:

1 – шагающие опоры; 2 – несущие балки; 3 – бортовой электропривод в водозащищенных боксах;
4 – механизмы шагания; 5, 6 – механизм смещения точек подвеса механизмов шагания и его линейный электропривод, соответственно; 7 – стопы

в ВолгГТУ совместно с ОАО «ЦКБ Титан» (г. Волгоград).

В конструкции аппарата шагающего аппарата МАК-1 (рис. 3) использована модульная технология, позволяющая легко модернизировать аппарат под конкретную задачу. Аппарат включает в себя жестко соединенные между собой шагающие опоры (шагающие модули) правого и левого борта. Шагающие опоры выполнены в виде несущих балок, снабженных бортовым силовым электроприводом, на которых закреплены шагающие движители. Бортовые электроприводы выполнены в виде отдельных силовых блоков, расположенных в герметичных водозащищенных боксах. Питание привода – по кабелю от внешнего автономного источника электропитания (бензогенератора) или от бытовой электросети. Суммарная мощность бортовых приводов – около 2 кВт. Предусмотрена возможность плавного изменения скорости передвижения. Максимальная скорость на суше до 3–5 км/ч, под водой – около 1 км/ч. Аппарат может работать на глубинах до 20 м. Масса аппарата около 150 кг.

Шагающие движители аппарата – циклового типа, с возможностью корректировки траектории опорных точек. Механизмы шагания – цикловые, на базе 4-звенных плоских механизмов с шарнирно прикрепленными стопами (рис. 4). Стопы сменные (лыжеобразные и малые, скругленные с неразвитой опорной поверхностью). Возможно движение без сменных стоп (конструкция опорных точек механизмов шагания адаптирована к взаимодействию с грунтом).

Цикловой движитель состоит из 3 механизмов шагания (рис. 4) циклового типа, ки-

нематически жестко связанных и работающих в противофазе (2 механизма шагания работают синфазно, а средний в противофазе). В результате в каждый момент времени хотя бы один из механизмов шагания находится в контакте с грунтом, таким образом, коэффициент режима такого движителя равен 1. Использование цикловых движителей позволяет не заботиться о сохранении походки и устойчивости и исключает необходимость управляемой системы адаптации. В результате машины имеют минимальное число управляемых степеней свободы и становятся существенно проще и на порядок дешевле аналогов с адаптивным управлением. Испытания в реальных условиях экспериментальных образцов шагающих машин с цикловыми движителями показывают, что они отличаются простотой и надежностью и могут эффективно работать в экстремальных ситуациях [8; 9]. Вместе с тем моделирование динамики типовых случаев движения цикловых шагающих машин показывает, что для полной реализации их возможностей по профильной проходимости и маневренности необходима возможность комбинирования и корректировки программных движений ног. Например, изменение длины шага перед препятствием для обеспечения наиболее выгодного положения стопы, увеличение высоты шага при прохождении выступающего препятствия, комбинирование ног при повороте для снижения момента сопротивления повороту и др.

В шагающем аппарате МАК-1 возможность комбинирования и корректировки программных движений ног была достигнута путем введения в механизм шагания дополни-

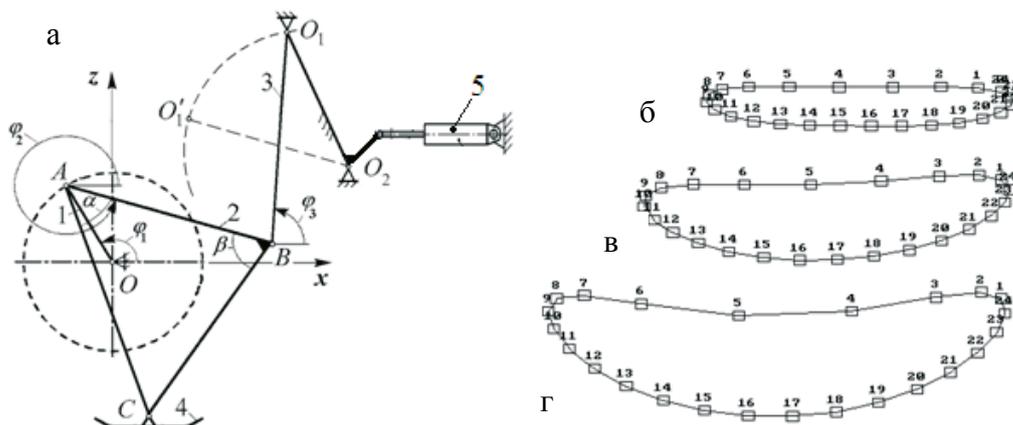


Рис. 4. Схема циклового механизма шагания аппарата МАК-1 (а) и трансформация траектории его опорной точки при смещении точки подвеса коромысла (б, в, г): 1 – ведущий кривошип; 2 – опорное звено; 3 – коромысло; 4 – стопа; 5 – линейный электропривод; O_1, O_2 – управляемое поворотное звено смещения точек подвеса

тельной управляемой степени свободы в виде дополнительного поворотного звена (дополнительного кривошипа) с линейным электроприводом (рис. 4). Управление поворотным звеном сводится к дискретному изменению его углового положения (аналогично переключению передач в традиционных транспортных средствах). Это приводит к смещению точки подвеса коромысла механизма шагания и трансформированию базовой траектории маршевого движения (рис. 4, б) в траекторию режима преодоления препятствий с увеличенной высотой и длиной шага (рис. 4, в, г). Механизм шагания при этом остается одноступенным. Тем самым достигается управление (в довольно широких пределах) относительной траекторией опорных точек.

Также в шагающем аппарате МАК-1 реализована система пассивной адаптации стопы к опорной поверхности – была синтезирована траектория опорной точки механизма шагания, обеспечивающая за счет его кинематики и трения в шарнире стопы, подъем носка стопы в фазе переноса как при прямом, так и при реверсивном (задним ходом) движении [10; 11]. Самоадаптация стопы повышает возможности движителя по приспособляемости к неровностям грунта и дает возможность преодолевать препятствия, более чем вдвое превышающие высоту подъема опорной точки механизма шагания.

При проведении подводных экспериментов использовался метод, основанный на непосредственной видеосъемке процесса движения шагающего аппарата при постепенно увеличивающейся крюковой нагрузке с по-

следующей покадровой обработкой видеозаписи на ЭВМ [12].

По ходу движения шагающей машины со стороны каждого ее борта устанавливались на штативе видеокамеры, направленные перпендикулярно движению таким образом, что в поле их видимости попадали стопы и механизмы шагания одного борта, а также шкала динамометра, установленного на крюке машины. Это позволяло в течение эксперимента (нескольких шагов) непрерывно фиксировать показания динамометра, курсовые перемещения корпуса машины (по положению меток на несущих балках шагающих опор) и курсовые перемещения находящихся на грунте стоп при их буксовании, а также угловое положение ведущих кривошипов механизмов шагания. Угол поворота ведущих кривошипов φ_1 (рис. 4, а) определялся либо непосредственно по положению кривошипов, либо по угловому положению опорного звена φ_2 или коромысла механизма шагания φ_3 , если кривошип в кадре закрывался другими звеньями механизма. Видеокамеры работали в режиме секундного отсчета времени. Для определения долей секунды использовался счетчик кадров.

Покадровая обработка видеозаписи осуществлялась с помощью программы «Microsoft Paint» (рис. 5) и заключалась в определении положения относительно любого естественного ориентира, попавшего в кадр, меток, расположенных на ногах и корпусе шагающего аппарата. Измерения производились в условных единицах (в пикселях монитора ЭВМ) с помощью указателя координат курсора. Это позволяло определить законы движе-



Рис. 5. Процесс движения (а) и кадровая обработка на ЭВМ видеозаписи процесса движения (б) подводного шагающего аппарата:
1– 4 – метки ног и корпуса (рамы) шагающего аппарата; 5 – естественный ориентир

ния ног и корпуса в курсовом и вертикальном направлениях, а по их значениям – скорость буксования стоп. Результаты экспериментов были использованы при определении коэффициентов сцепления для шагающих машин рассматриваемого типа.

Проведенные подводные испытания показали, что шагающие машины по тягово-сцепным свойствам и грунтовой проходимости существенно превосходят колесные и гусеничные машины. Таким образом, в условиях подводного слабонесущего грунта шагающие движители, в сравнении с гусеничными и колесными, могут обеспечить более высокие тягово-сцепные свойства и повышенную грунтовую проходимость. Профильная проходимость шагающих машин также существенно выше. Поэтому шагающие машины могут быть востребованы при внедрении новых промышленных технологий освоения ресурсов морского дна.

Библиографические ссылки

1. Андреев С. И., Казакова В. Е., Бабаева С. Ф., Черкашён Г. А. Твердые полезные ископаемые мирового океана: история открытий, геологическое изучение, перспективы освоения // Горный журнал. 2013. № 11. С. 65–72.
2. Verichev S., Jonge L., 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. 21–24.
3. 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.

4. Чернышев В. В. Полевые исследования шагающих машин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2004. № 4. С. 20–22.
5. Отработка методов нечёткого управления шагающим роботом «Ортоног» в полевых условиях / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, Н. Г. Шаронов [и др.] // Исследования наукограда. 2013. № 2. С. 43–48.
6. Планетоходы / под ред. А. Л. Кемурджиана. М. : Машиностроение, 1982. 319 с.
7. 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 International Conference / VNIIOkeangeologia. St. Petersburg, 2014. P. 21–24.
8. Брискин Е. С., Чернышев В. В. Динамика шагающих машин с движителями на базе цикловых механизмов при ослабленной гравитации // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2006. № 1. С. 15–20.
9. Чернышев В. В. Опыт использования шагающей машины для ликвидации аварийного разлива нефти // Безопасность жизнедеятельности. 2003. № 5. С. 28–30.
10. Брискин Е. С., Чернышев В. В. Цикловые механизмы шагания с пассивно управляемой стопой // Теория механизмов и машин. 2004. № 1. С. 80–88.
11. Пат. 2156711 РФ, МПК 7 В 62 D 57/032. Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / Охоцимский Д. Е., Брискин Е. С., Чернышев В. В., Шерстобитов С. В. ; ВолГТУ. 2000.
12. Брискин Е. С., Чернышев В. В., Фролова Н. Е. О позиционной зависимости тягово-сцепных свойств шагающих машин с цикловыми движителями // Тракторы и сельхозмашины. 2009. № 6. С. 21–25.

Статья поступила в редакцию
12.03.2015 г.