

ИСПЫТАНИЯ ПОДВОДНОГО ШАГАЮЩЕГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ВОЛГО-АХТУБИНСКОЙ ПОЙМЫ

В.В. Чернышев, В.В. Арыканцев

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, пр. Ленина, 28
E-mail: Vad.Chernyshev@mail.ru

Обсуждаются результаты исследований по определению параметров дна, полученные при испытаниях подводного шагающего аппарата МАК-1. В ходе экспериментов осуществлялось движение по дну проток и ериков. Управление и питание подводного аппарата осуществлялось по кабелю с берега или лодки. Характеристики дна получались по визуальной информации, поступающей с бортовых видеокамер аппарата. Для получения информации о положении донных объектов использовались спутниковые системы глобального позиционирования. Испытания показали, что с помощью аппаратов передвигающихся по дну можно получить достаточно большой объем информации о характере дна.

Ключевые слова: подводные аппараты; мобильные роботы; аппараты, передвигающиеся по дну; шагающий движитель; подводные испытания; управление гидрологическим режимом; Волго-Ахтубинская пойма.

Введение. В экосистеме Нижнего Поволжья особое место занимает Волго-Ахтубинская пойма – уникальное природное образование, простирающееся на 450 км от Волгограда до Астрахани и представляющее собой россыпи нескольких тысяч озер, разнообразные лиственные леса вдоль берегов многочисленных рек, ериков и протоков, заливные луга с редкими цветами и травами. Современный гидрологический режим Волго-Ахтубинской поймы, полностью определяемый хозяйственно-экономическими приоритетами, ведет к ее деградации: объем летнего водостока реки Волги сокращен по сравнению с природным более чем на 30%, а зимнего – вырос более чем в два раза; время искусственного весеннего паводка («спецпропуска») понизилось в два раза; рыбные запасы и площади нерестилищ сократились в десятки раз. Более того, во время катастрофического маловодья лета 2015 г. приходилось закачивать воду в ерики из Волги для обеспечения водой ряда поселений Волго-Ахтубинской поймы. Федеральной целевой программой «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах» предусмотрено создание концепции сохранения этой уникальной

природной системы. В рамках этой программы учеными Волгоградского государственного университета разработана гидродинамическая численная модель динамики поверхностных вод на территории северной части Волго-Ахтубинской поймы [1]. Разработанная модель может служить основой для постановки и решения оптимизационной и теоретико-игровой задачи управления паводковым гидрологическим режимом для эколого-экономической системы «Волжская ГЭС – Волго-Ахтубинская пойма». С использованием модели рассчитаны временные зависимости площади затопления для разных гидрографов, исследованы условия обводнения территории. Изучены особенности затопления Волго-Ахтубинская поймы в зависимости от режима попуска воды через Волжскую ГЭС с учетом свойств рельефа местности. Продемонстрирован алгоритм построения оптимального гидрографа, который должен лежать в основе оптимального управления рассматриваемой системой.

Вместе с тем при математическом моделировании ряд параметров, определяющих силу гидравлического трения между жидкостью и дном (рельеф дна водоемов, свойства подстилающей по-

верхности, придонное трение и т.п.), задавались приблизительно, так как для их точного определения требуется большой объем полевых исследований. В плане определения характеристик дна выполнялись только измерения глубин в основном русле и рукавах Волги (через 100 м) и в русле Ахтубы (через каждые 50 м), что дает лишь ориентировочные данные о рельефе речного дна. Характер дна большинства ериков и протоков в настоящее время вовсе не изучен. В работе обсуждаются результаты экспериментов по определению параметров дна водных объектов Волго-Ахтубинская поймы, полученных при испытаниях опытного образца подводного шагающего аппарата МАК-1 (рис. 1).

Материалы и методы. Подводные роботизированные аппараты играют важную роль в деле исследований морей и океанов. Они, в частности, широко используются в операциях по экологическому мониторингу и при проведении поисково-спасательных работ [2]. Изучение и промышленное освоение ресурсов морского дна также невозможно без специальных подводно-технических средств [3, 4]. Большинство подводных аппаратов для передвижения под водой используют винтовые или водометные движители [2]. Вместе с тем, в ряде случаев, более удобно использовать робототехнические системы, передвигающиеся по дну, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с плавающими аппаратами. Так, например, плавающие аппараты плохо работают в условиях сильного подводного течения, а также в зоне прибоя. В подобных условиях использование самоходных донных аппаратов более удобно – им не надо развивать скорость, превосходящую скорость течения, они могут работать на малых глубинах и даже выползать на берег. Практика подводно-технических работ ставит целый ряд задач, связанных с проведением на дне грунтовых работ. Эти работы, как правило, требуют значительных тяговых усилий и их также более удобно проводить с помощью машин передвигающихся по дну. В настоящее время для

передвижения по дну в основном используются с гусеничные машины. Существуют различного типа подводные гусеничные бульдозеры, экскаваторы, кабелеукладчики, а также донные самоходные добычные агрегаты [5]. Однако опыт подводно-технических работ показывает, что в подводных условиях даже гусеничные машины могут работать лишь на достаточно ровных и плотных грунтах с небольшими уклонами дна [6]. Для машин, передвигающихся по дну, более подходит шагающий движитель, который может обеспечить повышенную грунтовую и профильную проходимость [7–9] и более экологичен [10]. У шагающих машин также имеет место снижение затрат тягового усилия на сопротивление движению – для них, в отличие от колесных и гусеничных машин, грунт не является препятствием для передвижения [11].

Конструктивно шестиногий шагающий аппарат МАК-1 [12] содержит шагающие модули правого и левого борта, жестко соединенные между собой посредством рамы (рис. 2). Рама аппарата сменная, ее конструкция может меняться в зависимости от навесного оборудования. Каждый шагающий модуль выполнен в виде несущей балки, на которой установлены механизмы шагания, образующих шагающий движитель, а также бортовой электропривод в виде отдельных силовых блоков, расположенных в водозащищенных боксах. Электропривод – на базе асинхронных электродвигателей с частотным регулированием угловой скорости. Суммарная мощность бортовых электроприводов – около 2 кВт. Электропитание аппарата осуществляется по кабелю с берега или лодки от автономного бензогенератора. Поэтому аппарат может оставаться на дне в течение продолжительного времени. Управление аппаратом также осуществляется по кабелю по визуальной информации, поступающей с бортовых видеосенсоров. Поворот осуществляется за счет разных скоростей вращения электродвигателей бортовых приводов либо за счет разной длины шага движителей

правого и левого борта. Робот при габаритах 1,8x1,8x0,9 м весит около 170 кг. Максимальная скорость аппарата, в зависимости от условий движения, состав-

ляет 3–5 км/ч. Длина шага до 1,2 м. Модульный принцип построения аппарата позволяет его легко разбирать и транспортировать на большие расстояния.

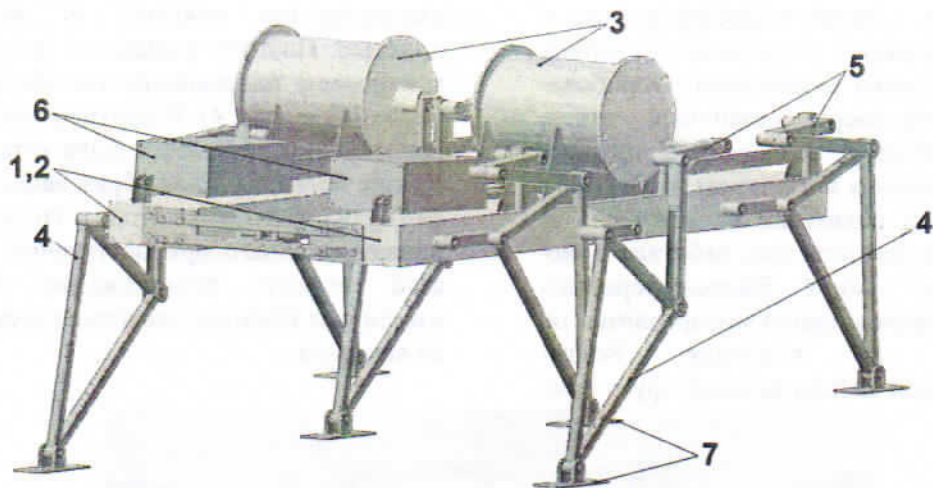


Рис. 1. Испытания подводного шагающего аппарата МАК-1

Шагающий движитель каждого борта аппарата состоит из трех механизмов шагания. Механизмы шагания – цикловые, на базе четырехзвенных плоских механизмов, с шарнирно прикрепленными сменными стопами. В механизме предусмотрена возможность корректировки параметров шага, которая осуществляется, аналогично переключению передач в традиционных транспортных средствах, за счет дискретного смещения точек подвеса механизма [13]. Входящие в состав движителя механизмы шагания кинематически связаны и работают в противофазе (крайние механизмы шагания работают синфазно, а средний – в противофазе). В результате в каждый момент времени хотя бы одна из трех ног каждого борта находится в опоре на грунт. Коэффициент режима такого движителя равен 1. Цикловые движители позволяют не заботиться о сохранении походки и устойчивости и исключают необходимость управляемой системы адаптации. В результате аппарат имеет всего 2 управляемые степени свободы, и становится существенно проще аналогов с адаптивным управлением ног. Так, например, конечности корейского под-

водного робота Crabster CR200, разработанного в KIOST (Korean Institute of Ocean Science and Technology) [14], в общей сложности, насчитывают 30 управляемых степеней свободы. Это существенно усложняет задачу согласованного управления ногами при движении.

Испытания подводного шагающего аппарата МАК-1 осуществлялась в условиях реальных объектов Волго-Ахтубинская поймы. При проведении испытаний проверялась работоспособность основных систем шагающего аппарата, и исследовалось влияние конструктивных особенностей шагающего движителя на его управляемость, маневренность, тягово-сцепные свойства и проходимость. Также существенное внимание было уделено изучению возможности использования шагающего аппарата для определения характеристик дна. Основная часть подводных экспериментов была выполнена на малых глубинах (до 3–4 м). Аппарат предназначен для работы на существенно больших глубинах, однако, глубин более 5–6 м при испытаниях обнаружить не удалось.



1 – шагающие модули правого и левого борта; 2 – несущие балки; 3 – бортовой электропривод в водозащищенных боксах; 4 – механизмы шагания (ноги); 5, 6 – механизм смещения точек подвеса механизмов шагания и его линейный электропривод, соответственно; 7 – стопы

Рис. 2. Конструктивная схема шагающего аппарата МАК-1

В ходе экспериментов осуществлялось движение по дну проток и ериков. В частности, был полностью пройден ерик Куропатка длиной около 3 км (рис. 3). Аппарат при движении буксировал (посредством кабеля электропитания) лодку с оператором и автономным источником электропитания (малогабаритным бензогенератором). В маршевых режимах движения оператор вмешивался

в управление движением лишь при необходимости (оператор может менять величину курсовой скорости, направление движения, а также имеет определенные возможности по корректировке параметров шага). В режиме специального маневрирования, например, при преодолении локальных препятствий, управление осуществлялось преимущественно в ручном режиме.



Рис. 3. Ерик Куропатка (показан трек движения аппарата МАК-1)

Характеристики дна получались по визуальной информации, поступающей с бортовых видеокамер аппарата. Аппарат снабжен двумя подводными цветными

видеокамерами в прочном корпусе с интегрированным кластером светодиодных осветителей, по видеоинформации которых осуществлялось управление

аппаратом, а также цифровыми фото и видео камерами с возможностью записи видео высокого разрешения. Опробовались видеокамеры различных типов, включая камеру, оснащенную трехосевым гироскопом и датчиком давления (с выводом их показаний на монитор). В ходе экспериментов они работали в непрерывном режиме. Видеоинформация всех видеокамер синхронизировалась по времени. В водоемах Волго-Ахтубинской поймы донный грунт пре-



Рис. 4. Визуальная информация с бортовых видеокамер подводного аппарата МАК-1

Покадровая обработка видеозаписи позволяет в любой момент движения определить тип и несущие свойства донного грунта (по глубине погружения стопы в грунт), глубину и величину уклонов дна, а также наличие донной растительности и различных локальных препятствий естественного и техногенного происхождения. Для получения информации о положении объектов речного дна использовались спутниковые системы глобального позиционирования. Сохранялся трек движения (см. рис. 3) с привязкой по времени и координаты точек водоема, где, например, требуется расчистка дна или углубление руела. Работы по расчистке ериков в Волго-Ахтубинской пойме проводятся уже несколько лет, информация о характере дна ериков позволит сократить их объем.

Заключение. Испытания подтвердили превосходство шагающих машин по тягово-сцепным свойствам и проходимости в сравнении с традиционными транспортными средствами. С помощью шагающих аппаратов передвигающихся по дну можно получить достаточно

имущественно илистый и песчано-илистый. Поэтому видимость под водой в курсовом направлении составляла не более 2-3 м (рис. 4). В противоположном направлении видимость была ограничена еще больше – из-за образования взвеси (мути) при отрыве стоп от грунта при движении. Благодаря достаточно большой скорости передвижения облако взвеси, как правило, несколько отставало от аппарата.

большой объем информации о характере дна проток и ериков на протяжении всей их длины. В частности, можно определить параметры, влияющие на силу гидравлического трения между жидкостью и дном (рельеф дна водоемов, свойства подстилающей поверхности, придонное трение и т.п.), которые являются базовыми при решении оптимизационной задачи управления паводковым гидрологическим режимом для эколого-экономической системы «Волжская ГЭС – Волго-Ахтубинская пойма». Результаты работы также могут быть востребованы при разработке шагающих робототехнических систем предназначенных для подводно-технических работ, для новых промышленных технологий освоения ресурсов морского дна, для подводной археологии и для обеспечения антитеррористической и техногенной безопасности объектов подводной инфраструктуры.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов: 16-08-01109-а; 16-31-00427-мол_а; 15-41-02451_р_поволжье-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Задача* управления гидрологическим режимом в эколого-экономической системе «Волжская ГЭС – Волго-Ахтубинская пойма». Ч. 1. Моделирование динамики поверхностных вод в период весеннего паводка / А.В. Хоперсков, С.С. Храпов, А.В. Писарев [и др.] // Проблемы управления. 2012. № 5. С. 18–25.
2. *Ляхов Д.Г.* Современные задачи подводной робототехники // Подводные исследования и робототехника. 2012. № 1. С. 15–23.
3. *Твердые* полезные ископаемые мирового океана: история открытий, геологическое изучение, перспективы освоения / С.И. Андреев, В.Е. Казакова, С.Ф. Бабаева [и др.] // Горный журнал. 2013. № 11. С. 65–72.
4. *Nautilus Minerals* [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.nautilusminerals.com. (дата обращения: 25.11.2016).
5. *Чернышев В.В., Арыканцев В.В., Гаврилов Ан.Е.* Управление движением подводных шагающих аппаратов передвигающихся по дну // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 1. С. 141–155.
6. *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.
7. *On ground* and profile practicability of multi-legged walking machines / E.S. Briskin, V.V. Chernyshev, A.V. Maloletov [et al.] // Climbing and Walking Robots. CLAWAR 2001: Proc. of the 4th Int. Conf. Karlsruhe, Germany, 2001. P. 1005–1012.
8. *Концепция* проектирования, динамика и управление движением шагающих машин. Ч.2. Динамика движения шагающих машин серии «Восьминог» / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, В.В. Жога [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 6. С. 19–26.
9. *Чернышев В.В.* Опыт использования шагающей машины для ликвидации аварийного разлива нефти // Безопасность жизнедеятельности. 2003. № 5. С. 28–30.
10. *Чернышев В.В., Брискин Е.С.* Исследование взаимодействия шагающего движителя с экологически ранимым почвенным покровом // Безопасность жизнедеятельности. 2012. № 1. С. 34–38.
11. *Design and underwater tests of subsea walking hexapod MAK-1* / V.V. Chernyshev, V.V. Arykantsev, A.E. Gavrilov [et al.] // Proc. of the ASME 2016 35th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2016, Busan National University. Busan, 2016. 9 p.
12. *Чернышев В.В., Арыканцев В.В.* MAK-1 – подводный шагающий робот // Робототехника и техническая кибернетика. 2015. № 2. С. 45–50.
13. *Брискин Е.С., Чернышев В.В.* Методы корректировки программных движений цикловых шагающих движителей мобильных робототехнических систем // Искусственный интеллект. НАН Украины. 2004. № 4. С. 685–694.
14. *Bong-Huan Jun.* Multi-legged Seabed Robot Crabster (CR200) for the Exploration of High Tide and Low Visibility Environment // Journal of Institute of Control, Robotics and Systems. 2013. Vol. 19. № 3. P. 14–25.

UNDERWATER WALKING DEVICE TESTS IN WATER OBJECTS OF THE VOLGA-AKHTUBA FLOODPLAIN CONDITIONS

V.V. Chernyshev, V.V. Arykantsev

Volgograd State Technical University, Volgograd, Lenin Av., 28

The results of bottom parameters investigation, which obtained during underwater walking device MAK-1 are discussed. During the tests movement in narrow places at the bottom was implemented. Control and power supply were executed via cable from the shore or boat. Characteristics of the bottom was obtained from visual information from board cameras of the device. For obtaining of information about bottom object position global position systems were used. Tests have shown that it is possible to obtain a large amount of information about profile of the bottom could be obtained using the bottom walking devices.

Keywords: underwater devices, mobile robots, bottom-moved devices, walking mover, underwater tests, management of hydrological regime, The Volga-Akhtuba floodplain.