ШТАМПОВАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ «КОМПРЕССИОННЫХ» СВОЙСТВ ПОДВОДНЫХ ГРУНТОВ

В.В. Чернышев, В.В. Арыканцев, М.Г. Матвейчук, А.В. Бандурко

Волгоградский государственный технический университет,
РФ, г. Волгоград, пр. Ленина, 28
E-mail: vad.chernyshev@mail.ru

Обсуждаются результаты исследований «компрессионного эффекта», возникающего при шагающем способе передвижения на подводных грунтах. На водонасыщенных грунтах при отрыве стопы находящейся в опорной фазе от грунта, из-за разрежения возникающего под стопой, появляется компрессионная сила, препятствующая отрыву стопы от грунта. Предложена конструкция донного электромагнитного штампа и методика экспериментального определения компрессионной силы. Также рассматривается возможность снижения силы отрыва ноги от подводного грунта путем вибрационного воздействия на опорные элементы шагающего движителя. Приведены некоторые результаты экспериментов по определению силы отрыва стопы от подводного грунта.

Ключевые слова: информационно-измерительные приборы и системы, аппараты передвигающиеся по дну, шагающий движитель, взаимодействие с грунтом, компрессионный эффект, вибрационное воздействие.

Поступила в редакцию: 14.08. 2019. После доработки: 09.09.2019.

Введение. Подводные аппараты играют важную роль при исследовании морей и океанов. Они широко используются при экологическом мониторинге морского дна и при проведении поисково-спасательных работ [1]. Существуют аппараты для подводной разведки, обнаружения и уничтожения мин [2–4]. Освоение ресурсов морского дна также невозможно без мобильных подводно-технических средств [5, 6]. Большинство подводных аппаратов — плавающего типа. В ряде случаев более удобно использовать аппараты, передвигающиеся по дну. Существуют подводные бульдозеры, экскаваторы, кабелеукладчики, а также донные самоходные добычные агрегаты [6, 7]. Они, как правило, имеют колёсный или гусеничный движитель. В аппаратах, передвигающихся по дну, находит применение шагающий движитель [8–11], который обладает высокой грунтовой и профильной проходимостью [12–14]. Применение подводных шагающих платформ при разведке и добыче углеводородов считается перспективным направлением [15].

В условиях морского дна имеются специфические особенности взаимодействия шагающего движителя с грунтом.

Существенное влияние на динамику контактного взаимодействия опорных элементов движителя оказывают плавучие свойства грунта. Также имеет место «компрессионный эффект», который возникает на водонасыщенных грунтах при смене ног (при переступании). При отрыве стопы, находящейся в опорной фазе, от грунта, из-за разрежения (снижения давления), возникающего под стопой, появляется сила, препятствующая отрыву стопы от грунта. На грунтах с низкими гидрофильными свойствами эта сила может достигать значительной величины [16]. С увеличением глубины компрессионная сила может существенно возрасти из-за роста давления внешней среды. Значительные силы, препятствующие отрыву стопы от грунта, ограничивают возможности шагающего способа передвижения на больших глубинах. В работе обсуждается методика исследований «компрессионного эффекта» с помощью специально разработанного электромагнитного штампа. Приведены некоторые результаты экспериментов. Также обсуждается возможность снижения силы отрыва от донного грунта путем вибрационного воздействия на стопы движителя.

Материалы и методы. Для исследования компрессионного эффекта разработан прототип штамповой установки с электромагнитным приводом [17]. Измерение компрессионной силы, например, динамометром, затруднено из-за упругости троса, что не позволяет обеспечить «быстрых» движений штампа (компрес-

сионная сила зависит от скорости). Вместе с тем на малых глубинах такие эксперименты проводились [16], а их результаты сопоставлялись с результатами испытаний электромагнитной штамповой установки. Комплект оборудования для исследования компрессионного эффекта представлен на рис. 1.

Рис. 1. Комплект оборудования штамповой установки:

1 — штамп; 2–5 — сменные электромагниты штампа; 6 — кабель-трос; 7 — страховочный линь; 8 — стабилизатор; 9 — бензогенератор; 10 — подводная видеокамера; 11, 12 — проводная подводная видеокамера с интегрированными осветителями и ее монитор, соответственно

Технические характеристики установки приведены в табл. 1. Конструктивно штамп (рис. 2) выполнен в виде установленного на круглой тонколистовой раме электромагнита с поступательным движением подпружиненного якоря. Использовались доработанные длинноходовые электромагниты серии ЭМД 4-х типов. Якорь электромагнита жестко присоединен к нажимному диску и снабжен штоком, к которому крепится сменная стопа. Использовались стопы круглой и лыжеобразной формы. Круглая стопа полностью располагалась внутри рамы, что исключало попадания грунта на стопу. Лыжеобразные стопы выходили за габариты рамы, поэтому для них использовалась рама с прореза-

ми под лыжу. В центре штока располагалась полость грунтозаборного устройства. Упругий элемент прижимает нажимной диск к нижней крышке магнита, которая также является направляющей для штока. Рабочая полость электромагнита штампа отделена от внешней среды эластичной мембраной. При испытаниях, для оценки характера дна, на раме устанавливалась проводная подводная видеокамера с инфракрасной подсветкой. На глубинах до 60 м на раме также устанавливали видеокамеру в герметичном боксе, работающая в непрерывном режиме. Глубина погружений в этом случае была ограничена прочностью бокса.

Таблица 1. Основные технические характеристики штамповой установки

Тип электромагнита	ЭМД 1111М	ЭМД 3111М	ЭМД 5111М	ЭМД 6111М
Ход якоря, мм	15	20	25	30
Масса якоря, кг	0,16	0,32	0,73	1,15
Масса штампа, кг	4	6	8	10
Габариты (Д×Ш×В), мм	200×200×107	200×200×140	200×200×163	200×200×190

Рис. 2. Штамп (а) и его устройство (б):
1 — корпус электромагнита; 2 — кабель-трос; 3 — крышка электромагнита; 4 — сердечник статора; 5 — обмотка статора; 6 — якорь; 7 — диск нажимной; 8 — эластичная мембрана; 9 — пружины; 10 — шток; 11 — крышка направляющая; 12 — сменная стопа; 13 — рама; 14 — полость грунтозабора

Штамповая установка опускалась на дно с борта судна на кабель-тросе. Процесс погружения и характера донного рельефа контролировался по видеoinформации с проводной видеокамеры штампа (рис. 3). Затем на обмотку статора подавалось напряжение и якорь отрывал стопу от грунта. На вязких грунтах из-за компрессионной силы стопа отрывалась с временной задержкой. Варьируя напряжение питающей сети и типоразмер электромагнита, менялась амплитуда отрывающей силы и время отрыва стопы от грунта. При «большой» силе имело место «быстрое» движение якоря штампа. При «малой» силе отрыв стопы от дна происходил с задержкой, после фильтрации воды в зону разрежения под стопой. При испытаниях регистрировалось значение тока в цепи электромагнита. В момент отрыва стопы от грунта ток падал из-за роста индуктивного сопротивления штампа, обусловленного выборкой воздушного зазора в магнитопроводе. Времена отрыва стопы от дон-

ного грунта позволяет оценить его «компрессионные» свойства.

Рис. 3. Погружение штампа с лыжеобразной стопой (отдельные кадры)

Методика определения компрессионной силы при штампových испытаниях разработана путем моделирования динамики якоря штампа. Математическое описание системы проводилось на базе уравнений Лагранжа-Максвелла [18]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W}{\partial \dot{i}} \right) + \frac{\partial \Psi}{\partial i} &= U \cos pt, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial (T + W)}{\partial x} + \frac{\partial \Pi}{\partial x} &= Q, \end{aligned} \quad (1)$$

где i — ток в цепи возбуждения статора; x — вертикальный ход якоря; U и p — амплитуда напряжения и частота питающей сети; $W = Li^2/2$ — энергия магнитного поля системы, где $L=L(x)$ — индуктивность магнитопровода; $\Psi = ri^2/2$ — электрическая диссипативная функция; r — активное сопротивление обмотки статора; $T = m\dot{x}^2/2$ и $\Pi = cx^2/2$ — кинетическая и потенциальная энергия системы, соответственно; c — жесткость пружин; m — масса якоря с присоединенной стопой; Q — непотенциальная обобщенная сила, характеризующая компрессионный эффект.

В случае линейного неупругого сопротивления ($Q = -b\dot{x}$, где b — коэффициент сопротивления) система уравнений (1) приводится к виду

$$\begin{aligned} d(Li)/dt + ri &= U \cos pt, \\ \ddot{x} + 2h\dot{x} + k^2x &= F(x, t)/m, \end{aligned} \quad (2)$$

где $h = b/2m$ — коэффициент демпфирования; k — собственная частота системы; $F(x, t) = 0,5 i^2 dL/dx$ — вынуждающая электромагнитная сила.

Если пренебречь активным сопротивлением электромагнита (при питании переменным током оно пренебрежительно мало по сравнению с индуктивным), из первого уравнения системы (2) можно получить закон изменения тока

$$i = (U_\alpha / pL) \sin pt. \quad (3)$$

После отрыва стопы от грунта компрессионная сила пропадает, и якорь практически мгновенно притягивается к сердечнику статора и замыкает магнитопровод. Индуктивность системы резко увеличивается, а ток в соответствии с (3) падает. Поэтому по току можно судить о времени отрыва стопы от грунта.

Второе уравнение системы (2) описывает механическую часть колебаний. С учетом (3) для вынуждающей электромагнитной силы получаем

$$F(x, t) = \frac{U^2}{2p^2L^2} \frac{dL}{dx} \sin^2 pt. \quad (4)$$

Поскольку $\sin^2 pt = (1 - \cos 2pt)/2$, то сила $F(x, t)$ всегда является положительной величиной (отрывает стопу от грунта). Позиционная зависимость индуктивности магнитопровода $L=L(x)$ определялись экспериментально. Для этого при питании штампа постоянным током измерялась электромагнитная сила при фиксированных положениях его якоря.

Выражение (4) позволяет определять амплитуду силы, отрывающей стопу от грунта. Зависимости времени (скорости) отрыва стопы от грунта, при различных амплитудах отрывающей силы, являются некоторой характеристикой «компрессионных» свойств донного грунта.

Полученные результаты. Работоспособность штамповой установки проверялась путем проведения отладочных испытаний. Испытания проводились в водоемах Волго-Ахтубинской поймы (на глубинах до 5 м) и на озере Байкал (на глубинах до 100 м). Отдельные эксперименты проводились и на больших глубинах. Они показали, что в глубоководных условиях нужен штамп существенно большей массы — проведению экспериментов мешал кабель значительной длины и придонные течения. По результатам испытаний удалось получить некоторые зависимости компрессионной силы от скорости отрыва стопы, условий внешней среды (типа грунта, глубины), площади и физического состояния опорной поверхности. Имело место достаточно большое расхождение экспериментальных данных. После обобщения результатов экспериментов были сделаны следующие выводы.

При отрыве стопы от грунта компрессионная сила может достигать значительной величины. В ряде экспериментов на вязких заиленных грунтах (в водоемах Волго-Ахтубинской поймы) она в 20–30 раз превосходила вес штампа. Предполагалось, что с увеличением глубины компрессионная сила будет возрастать пропорционально росту давления внешней среды. На песчаных грунтах (на озере Байкал) этого замечено не было — сила с ростом глубины возрастала, но не так значительно. На глубине 100 м ее рост, как правило, составлял не более 50–180% по сравнению с мелководьем. Компрессионная сила существенно зависит от скорости отрыва стопы от грунта. При моделировании динамики якоря штамповой установки предполагалась линейная зависимость компрессионной силы от скорости. Эксперименты показали, что на исследованных подводных грунтах эта зависимость несколько выше. Площадь и форма стопы также влияет на величину компрессионной силы. Было замечено, что с увеличением опорной площади при том же давлении стопы на грунт компрессионная сила возрастает у круглой стопы более интенсивно, чем у лыжеобразной. Время

опорной фазы тоже может существенно влиять на величину силы отрыва стопы от грунта. На вязких грунтах были случаи, когда за 2-3 мин компрессионная сила увеличивалась в 1,5–2 раза.

Надо отметить, что сделанные выводы носят предварительный характер. Для полного понимания рассматриваемого явления, безусловно, нужен более значительный объем экспериментов.

В ходе испытаний также исследовалась возможность снижения усилия отрыва стопы от подводного грунта путем вибрационного воздействия на опорные элементы движителя. Вибрационные процессы широко используются в технике и технологиях [19, 20]. Предполагалось, что вибрация может облегчить отрыв стопы от водонасыщенных грунтов за счет динамического роста усилия отрыва и за счет лучшей фильтрации воды в зону контакта. Эксперименты проводились со штампом с лыжеобразной стопой. К лыже присоединялся вибратор электромагнитного типа. Испытания показали, что при воздействии вибрации в некоторых случаях имело место снижение усилия отрыва стопы от грунта в 2–3 раза. В других случаях заметно го снижения усилия не наблюдалось.

Интенсивность колебаний существенно зависит от степени расстройки колебательной системы от резонанса. Использование явления резонанса позволяет повысить эффективность вибрационных установок [19, 20]. При обобщении результатов испытаний определялись резонансные частоты колебательной системы «упругий грунт – стопа – якорь вибратора» (рис. 4).

Рис. 4. Схема колебательной системы: 1 — стопа; 2, 3 — электромагнитный вибратор и его якорь; 4 — дополнительная масса

При свободных колебаниях рассматриваемой консервативной системы с числом степеней свободы $n = 3$ движение описывается дифференциальными уравнениями второго порядка [20]

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \ddot{q}_i + \sum_{j=1}^n c_{ij} q_i = 0, \quad (5)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; $a_{ij} = a_{ji}$, $c_{ij} = c_{ji}$ — коэффициенты инерции и жесткости, соответственно; $q_1 = x_1$, $q_2 = \varphi_1$, $q_3 = x_2$ — обобщенные координаты системы.

Коэффициенты инерции и жесткости находятся из квадратичного представления кинетической и потенциальной энергии системы. В рассматриваемом случае они, соответственно, равны

$$\begin{aligned} a_{11} &= m_1, & a_{12} &= 0, & a_{13} &= 0, \\ a_{21} &= 0, & a_{22} &= J_1, & a_{23} &= 0, \\ a_{31} &= 0, & a_{32} &= 0, & a_{33} &= m_2, \\ c_{11} &= c_1 + c_2, & c_{12} &= c_2 l_2, & c_{13} &= -c_2, \\ c_{21} &= c_2 l_2, & c_{22} &= c_1 l_1^2 + c_2 l_2^2, & c_{23} &= -c_2 l_2, \\ c_{31} &= -c_2, & c_{32} &= -c_2 l_2, & c_{33} &= c_2, \end{aligned}$$

где m_1 и J_1 — масса и момент инерции шарнирно закрепленной стопы; m_2 — масса якоря вибратора; c_1 — жесткость грунта; c_2 — жесткость упругих элементов резонансной настройки вибратора.

Необходимым и достаточным условием ненулевых решений системы (5) является равенство нулю определителя

$$\begin{vmatrix} c_{11} - a_{11} k^2 & c_{12} - a_{12} k^2 & c_{13} - a_{13} k^2 \\ c_{21} - a_{21} k^2 & c_{22} - a_{22} k^2 & c_{23} - a_{23} k^2 \\ c_{31} - a_{31} k^2 & c_{32} - a_{32} k^2 & c_{33} - a_{33} k^2 \end{vmatrix} = 0. \quad (6)$$

Выражение (6) представляет собой уравнение 3-й степени относительно квадрата частоты k^2 . В нашем случае уравнение частот (6) принимает вид

$$\begin{vmatrix} c_1 + c_2 - m_1 k^2 & c_2 l_2 & -c_2 \\ c_2 l_2 & c_1 l_1^2 + c_2 l_2^2 - J_1 k^2 & -c_2 l_2 \\ -c_2 & -c_2 l_2 & c_2 - m_2 k^2 \end{vmatrix} = 0. \quad (7)$$

Решение уравнения (7) дает 3 собственных частоты k_1 , k_2 , k_3 . При резонансной настройке вибратора ($c_2 = m_2 k^2$) его частота равна удвоенной частоте пи-

тающей сети $k_3 = 2p = 200\pi$ рад/с. В этом случае, как следует из (7), две другие собственные частоты совпадают

$$k_1 = k_2 = \sqrt{c_1(l_1^2 + l_2^2) / (m_1 l_2^2 + J_1)}. \quad (8)$$

Их величина определяются размером и инерционными характеристиками стопы, а также реологическими свойствами грунта. Например, для лыжеобразной стопы массой $m_1 = 0,5$ кг (с учетом вибратора) и длинами $l_1 = 0,1$ м, $l_2 = 0,15$ м при жесткости грунта $c_1 = 500$ кН/м из (8) получаем $k_1 = k_2 = 886$ рад/с. Для уменьшения собственных частот надо повышать инерционные свойства стопы. Можно, например, установить дополнительную массу m_3 на расстоянии l_3 от оси вращения стопы. Тогда при $m_3 = 0,5$ кг и $l_3 = 0,15$ м получаем собственные частоты $k_1 = k_2 = 613$ рад/с, близкие к резонансным. При совпадении собственных частот (8) с вынуждающей частотой силы $k_3 = 628$ рад/с будут иметь место наиболее интенсивные угловые и вертикальные колебания стопы, что облегчит ее отрыв от донного грунта.

Заключение. Предложенная методика исследования «компрессионного эффекта» с помощью электромагнитного штампа позволяет оценить силу отрыва стопы шагающего движителя от донного грунта. В ходе испытаний штамповой установки определены некоторые закономерности взаимодействия стопы с донным грунтом. При отрыве стопы от грунта компрессионная сила может достигать значительной величины. С ростом глубины компрессионная сила возрастает из-за роста давления внешней среды. Компрессионная сила сильно зависит от скорости отрыва стопы. Площадь и форма стопы также влияет на ее величину. При увеличении опорной фазы сила отрыва стопы от грунта может возрастать. За счет вибрационного воздействия на опорные элементы шагающего движителя можно добиться снижения компрессионной силы. Однако для этого надо обеспечить равенство собственных частот колебательной системы

«грунт – стопа – якорь вибратора» частоте вынуждающего воздействия.

Результаты работы могут быть востребованы при разработке донных шагающих робототехнических систем для подводного экологического мониторинга, поисково-спасательных работ и новых промышленных технологий освоения ресурсов морского дна.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской обл. в рамках научных проектов № 19-08-01180, 18-48-343005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. С. 65–75.
3. Сиденко К.С., Лаптев К.З., Илларионов Г.Ю. Управляемые по кабелю необитаемые подводные аппараты для поиска и уничтожения мин // Двойные технологии. 2009. № 3. С. 28–31.
4. 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.
5. 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.
6. 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 Int. Conf. / VNIIOkeangeologia. St. Petersburg, 2014. P. 126–138.
7. Чернышев В.В., Арыканцев В.В., Гаврилов А.Е. Управление движением подводных шагающих аппаратов передвигающихся по дну // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 1. С. 141–155.

8. Чернышев В.В., Арыканцев В.В. МАК-1 – подводный шагающий робот // Робототехника и техническая кибернетика. 2015. № 2. С. 45–50.
9. 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.
10. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Gavrilov A.E. et al. Design and underwater tests of subsea walking hexapod MAK-1 // Proc. of the ASME 2016 35th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE 2016. Busan, Korea. 2016. 9 p.
11. Чернышев В.В., Арыканцев В.В. Испытания подводного шагающего аппарата в условиях водных объектов Волго-Ахтубинской поймы // Системы контроля окружающей среды. 2017. № 8 (28). С. 24–29.
12. 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. P. 131–138.
13. 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.
14. 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. proc. 2009. P. 3631–3636.
15. Серов В.А., Ковшов И.В., Устинов С.А. Задачи технологических роботизированных шагающих платформ при освоении подводных (подледных) месторождений полезных ископаемых // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 9 (194). С. 181–192.
16. Арыканцев В.В., Чернышев В.В., Терехов С.Е. Динамика отрыва стопы от особо вязкого грунта // Машиноведение и инновации (МИКМУС 2017): материалы XXIX междунар. конф. (Москва, 6–8 декабря 2017 г.). М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2018. С. 260–263.
17. Арыканцев В.В., Гаврилов А.Е., Калинин Я.В., Чернышев В.В. П. м. 160504 РФ, МПК G01N33/24, G01N3/08, E02D1/00. Устройство для исследования параметров грунтов. 2016.
18. Чернышев В.В., Арыканцев В.В. Моделирование динамики штамповой установки при взаимодействии с подводным грунтом // Известия ВолгГТУ. 2014. Вып. 22. № 25 (152). С. 11–14.
19. Вибрации в технике: справочник. Т. 4. Вибрационные процессы и машины / под ред. Э.Э. Лавендела. М.: Машиностроение, 1981. 509 с.
20. Быховский И.И. Основы теории вибрационной техники. М.: Машиностроение, 1968. 363 с.

STAMPING DEVICE FOR THE RESEARCH OF "COMPRESSION" PROPERTIES OF UNDERWATER SOIL

V.V. Chernyshev, V.V. Arykantsev, M.G. Matveychuk, A.V. Bandurko

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

Results of research of the "compression effect", arising from a walking way of movement on underwater soil are discussed. On waterlogged soil when the foot which is in contact phase is separated from the soil there arises a force interfering the foot separation from the soil because of depression under the foot. The design of a ground electromagnetic stamp and a technique of experimental determination of compression force is offered. Also the possibility of decreasing the force of separation of a foot from underwater soil by vibration impact on support elements of the walking mover is considered. Some results of experiments on determination of the force of separation of foot from underwater soil are given.

Keywords: information and measuring devices and systems, devices for moving along bottom, walking mover, interaction with soil, compression effect, vibration impact.