

ОСНОВНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ДВУХОПОРНОЙ ШАГАЮЩЕЙ УСТАНОВКИ НАД МАШИНАМИ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ДВИЖИТЕЛЕЙ

Е.В. Колотвин

egor.kolotvin.95@gmail.com

SPIN-код: 9225-9830

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены основные преимущества шагающей буровой установки. Перечислены основные типы движителей, с помощью которых возможны перемещения по поверхности дна моря. Указаны их недостатки. Для проведения геологоразведочных работ на поверхности дна моря предложено использовать разработанную в 2016 году двухопорную буровую установку с шаговым движителем. Работая в автономном режиме по заданной программе, она может проходить определенные траектории по дну, попутно извлекая образцы донных отложений. Описан принцип перемещения (перенос центра масс системы при шагании) и представлены траектории движения установки по поверхности морского дна.

Ключевые слова

Экология, геологоразведка, шельф, шагающая установка, буровая установка, гидропривод, грунтовая проходимость, профильная проходимость, энергозатраты

Поступила в редакцию 18.05.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. На сегодняшний день известно множество способов проведения геологоразведочных работ на шельфе. Существуют стационарные и передвижные буровые платформы, опирающиеся на дно моря.

Известны стационарные основания в виде искусственных полуостровов и островов, образуемых после заграждения части прибрежной акватории дамбой и откачки из загражденной области воды. Основания насыпного типа надежно соединены с поверхностью дна моря, поэтому процесс бурения с них не зависит от колебаний волн о буровой став. Однако стоимость бурения резко возрастает с увеличением глубины. Основания насыпного типа целесообразно использовать при глубине до 15 м (рис. 1).

Стационарные основания на металлоконструкциях обычно возводят при глубине до 60 м. Их монтируют на сваях, забитых в грунт в месте бурения.

Стационарные основания описанных типов эффективно используются на мелководных участках акватории Каспийского моря, где с 1950-х годов построено около 400 км эстакадных сооружений и более 1500 оснований на металлоконструкциях.

В качестве средств передвижения по дну могут быть использованы движители гусеничного, колесного и шнекового типов. Изучение и промышленное

освоение ресурсов морского дна невозможно без технических средств — в первую очередь без подводного горного оборудования. Важная роль среди подводных горных машин отводится донным агрегатам, несущим на себе добычные и геологоразведочные рабочие органы в виде всасывающих наконечников, рыхлителей, ковшей, подборщиков, отвалов, грунтовых насосов, эрлифтных головок, зондов, буровых установок.

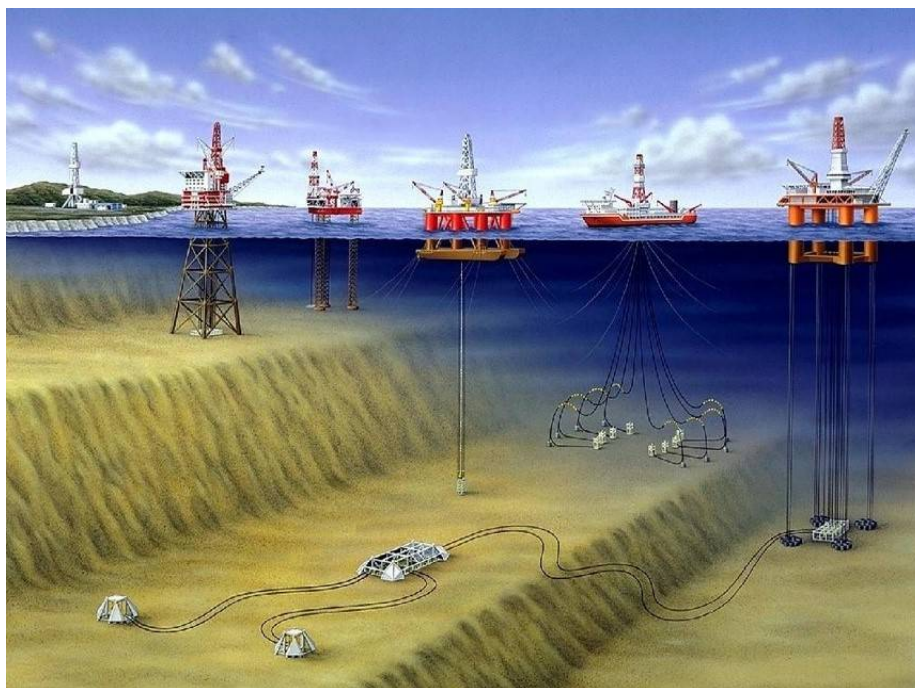


Рис. 1. Основные виды буровых работ, выполняемых на акваториях Мирового океана и внутренних морей

Известно, что проходимость колеса ограничивается уступом высотой в треть его радиуса и шириной траектории в две трети. Колесо, шнек и гусеница деформируют грунт, создавая при этом непрерывную колею, которая, в свою очередь, приводит к нарушению экологии и дополнительным энергозатратам. Наиболее пригоден для эксплуатации в условиях морского дна шагающий движитель, который позволяет преодолевать препятствия, оставляя при этом дискретную колею [1–7]. Согласно результатам исследований, использование шагающего движителя позволяет на 70 % уменьшить деформацию грунта.

Кафедрой машиностроения Санкт-Петербургского горного университета был получен патент на полезную модель «Шагающая буровая установка» (патент на полезную модель № 166446, приоритет полезной модели: 04.07.2016 г.). Предлагаемую шагающую установку (рис. 2) планируется использовать для проведения геологоразведочных работ на дне морей и океанов. Установка включает в себя ферму, опоры с платформами, телескопические штанги, рабочий орган,

систему управления. Ферма выполнена из двух параллельных труб с продольными направляющими и снабжена серьгами, шарнирно соединенными с платформами опор, при этом концы труб жестко связаны между собой поперечными балками с размещенными на них блоками. Рабочий орган выполнен в виде тележки с роликами, взаимодействующими с продольными направляющими фермы, с жестко закрепленными на ней буровым станком и двумя лебедками, снабженными гибкими тяговыми элементами, охватывающими блоки поперечных балок, один конец которых закреплен на барабане лебедки, а другой — на тележке рабочего органа [1, 3].

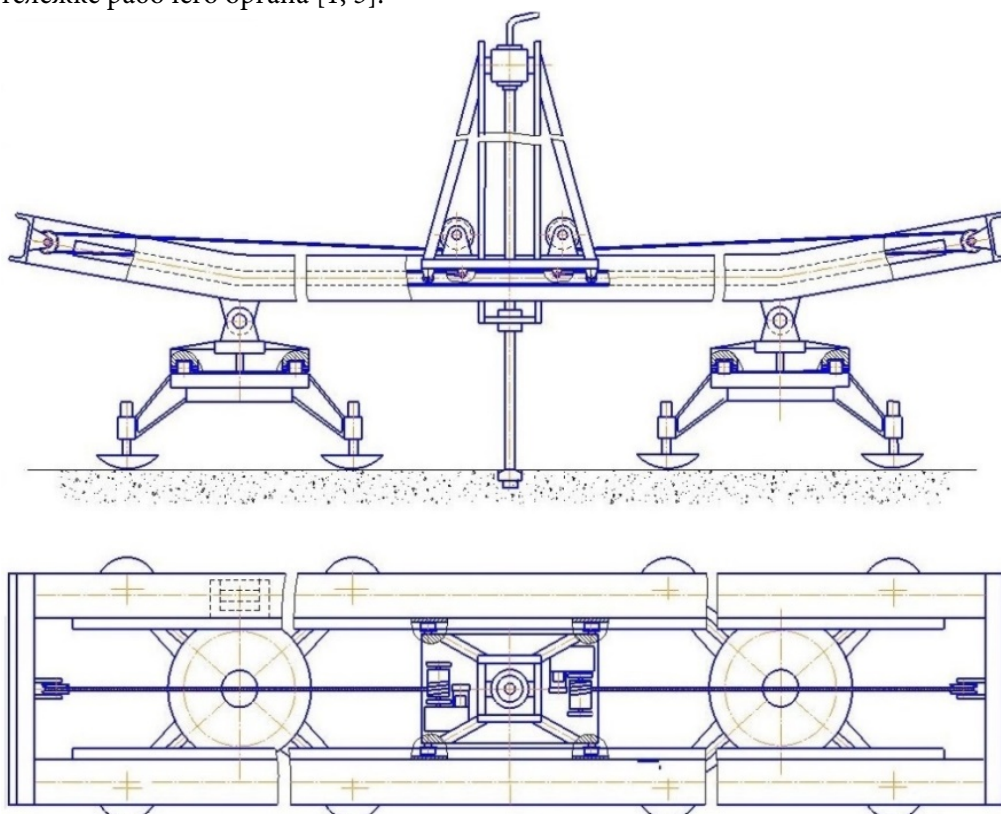


Рис. 2. Конструктивная схема буровой шагающей установки

Установка перемещается по дну благодаря изменению положения центра масс системы. После того как контргруз переходит в крайнее положение, совершается поворот системы в вертикальной плоскости относительно центра опорного стола на заданный угол α . Затем установка поворачивается в горизонтальной плоскости на угол β . Поворот осуществляется с помощью электромеханического привода, расположенного внутри опорного стола.

Применение шагающей установки в условиях работы на морском дне обеспечивает простые траектории движения в зависимости от обрабатываемого участка (рис. 4). Возможны настройки различных радиусов поворота, что позволит повысить производительность и маневренность.

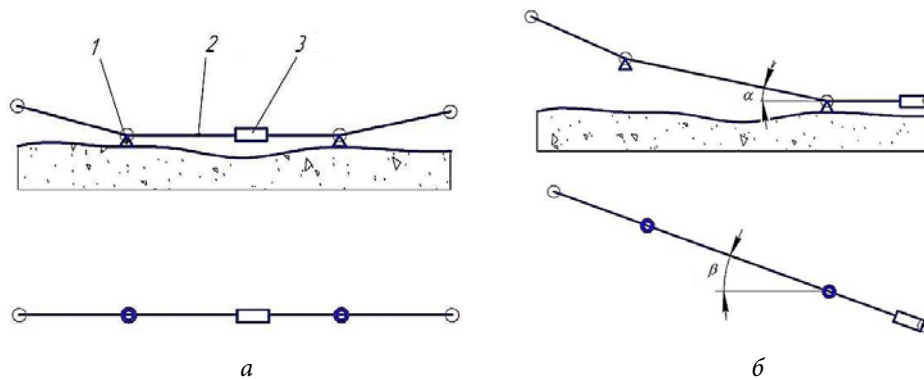


Рис. 3. Схемы перемещения буровой установки:

a — угловые (1 — опорный стол; 2 — несущая рама; 3 — контргруз); *б* — продольные

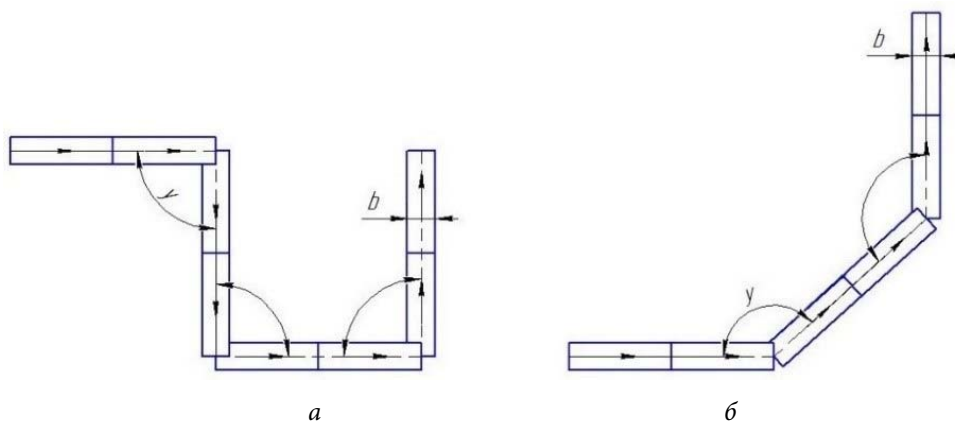


Рис. 4. Схемы рабочих перемещений буровой установки.

a — угловые; *б* — продольные

Показатели качества предлагаемой шагающей установки.

1. Структурные показатели качества. Показатели характеризуют сложность конструкции машины как механической системы и определяются числом тел, входящих в систему. Более удачной считается механическая система, которая состоит из меньшего числа элементов. Предлагаемая шагающая установка содержит несущую раму, два опорных стола, буровой станок, играющий роль контргруза, и приводы. Также установка имеет минимальное число двигателей для шагания и для поворота [6].

2. Кинематические показатели качества. В отличие от традиционных колесных и гусеничных транспортных средств, для шагающих машин направление скорости центра корпуса обычно не ограничивается направлениями, близкими к продольной оси машины, что позволяет машине осуществлять линейные и угловые перемещения независимо друг от друга. Поэтому минимального радиуса поворота недостаточно для оценки маневренности шагающих машин, необходимо ввести еще один показатель маневренности, в качестве которого пред-

ложен диапазон изменения угла между вектором скорости центра корпуса и продольной осью машины. Вводят понятие идеальной маневренности, под которой понимают способность корпуса машины совершать произвольное плоскопараллельное движение в плане местности. При таком понимании маневренность характеризуется двумя показателями: минимальным радиусом кривизны траектории характерной точки корпуса и максимально допустимым углом γ между продольной осью корпуса и вектором скорости v характерной точки [6]. В предлагаемой машине указанный угол принимает произвольные значения в пределах $\pm 180^\circ$.

3. Грунтовая проходимость. Особенность взаимодействия шагающего движителя с грунтом заключается в том, что сопротивление движению не является величиной постоянной. Большая часть энергии на деформацию грунта тратится в начале шага, сразу после наступания ноги на грунт в результате изменения давления стопы на грунт изменяются и условия их сцепления. Кроме того, значительного увеличения горизонтальной составляющей силы сцепления можно добиться при активном управлении стопой. Для оценки этих явлений вводят эффективный коэффициент сцепления, который определяется как отношение реализуемой силы сцепления в горизонтальном направлении к стационарному значению вертикальной нагрузки на стопу [2]. В связи с изменением вертикальной нагрузки эффективный коэффициент сцепления определяется выражением

$$f_{\text{эф}} = f \frac{N}{N_{\text{ст}}},$$

где f — «базовый» коэффициент сцепления; N — реализуемая нормальная реакция; $N_{\text{ст}}$ — стационарное значение нормальной реакции.

4. Профильная проходимость. Подо рвом понимают глубокую впадину на опорной поверхности, на дно которой опираться запрещено или невозможно. Предполагается, что ров преодолевается в квазистатическом режиме, т. е. возможностью проехать этот участок дороги за счет инерционных свойств машины пренебрегают.

Для колесной машины ширина преодолеваемого рва определяется размерами колеса. Предельное значение ширины рва составляет примерно $2/3$ диаметра колеса. Для гусеничной машины ширина преодолеваемого рва равна расстоянию вдоль продольной оси от центра тяжести машины до ближайшего крайнего переднего или крайнего заднего катка гусеницы.

Высота преодолеваемой ступени для колесных и гусеничных машин зависит от радиуса колеса или параметров гусеницы и определяется в значительной степени тягово-сцепными свойствами машины. Так, при одном и том же радиусе колес полноприводный автомобиль способен преодолевать более высокие препятствия, чем машина с приводом на два колеса [4]. Для шагающих машин тягово-сцепные свойства обычно не оказывают заметного влияния на высоту преодолеваемой ступени.

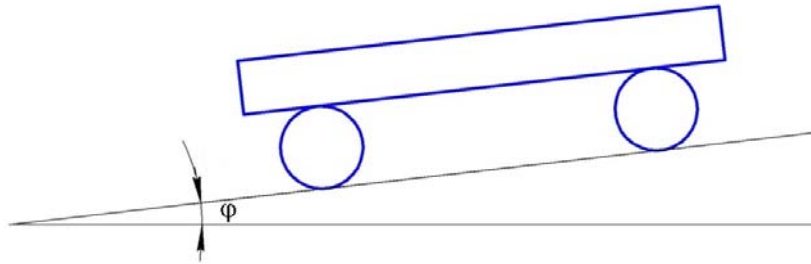


Рис. 5. Схема движения на уклоне колесной машины

Высота преодолеваемой ступени зависит от геометрических параметров движителей и в значительной степени определяется реализуемыми алгоритмами управления. В предлагаемой шагающей машине высота ступени равна высоте подъема опорного стола. Для колесных и гусеничных машин клиренс обычно не изменяется во время движения, лишь в сравнительно небольших пределах уменьшается при увеличении загрузки машины. А для большинства шагающих машин клиренс может изменяться во время движения в значительных пределах в зависимости от алгоритмов управления [5]. При движении на подъем, на спуск или при движении по косоугору допустимые углы наклона определяются двумя принципиально разными способами: по сцеплению и по опрокидыванию. Допустимый угол по сцеплению θ_ϕ определяется в зависимости от коэффициента сцепления ϕ выражением

$$\theta_\phi = \text{arctg} \phi.$$

Физический смысл последнего выражения заключается в том, что составляющая силы тяжести по касательной к опорной поверхности не должна превышать силу сцепления. Поскольку коэффициенты сцепления в продольном и поперечном направлениях могут различаться, предлагаемая шагающая машина оснащена управляемыми стопами [6]. При движении по достаточно пластичному грунту можно целенаправленно деформировать опорную поверхность (рис. 6), в результате чего определение допустимого угла по сцеплению практически теряет смысл.

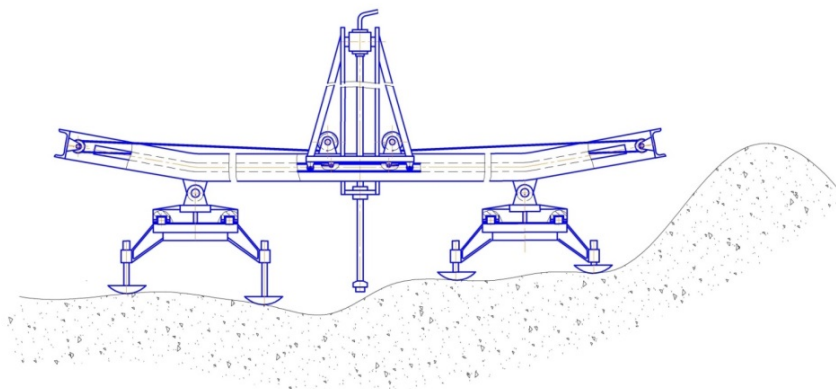


Рис. 6. Схема движения шагающей установки с возможностью адаптации к грунту

Предельный угол в этом случае ограничивается только возможностью опрокидывания машины. Допустимый угол опрокидывания θ_s определяется как угол наклона опорной поверхности, при котором находящаяся на поверхности машина опрокидывается под действием силы тяжести.

5. Динамические показатели. Энергетический баланс шагающей машины состоит из слагаемых, характерных и для других наземных транспортных средств (полезная механическая работа, потери в трансмиссии, потери на преодоление сил сопротивления движению и т. д.), и слагаемых, специфичных для шагающих аппаратов: затрат энергии на разгон-торможение шагающих двигателей на каждом шаге W_ϕ , затрат энергии на разгон-торможение корпуса машины в горизонтальном направлении W_m и затрат энергии на вертикальные перемещения корпуса W_G . Энергетическая эффективность оценивается долей специфичных для шагающих машин затрат энергии в общем энергетическом балансе машины в установившемся режиме движения. Чем меньше эта доля, тем лучше энергетическая эффективность машины [2, 8, 9]:

$$\eta = \frac{W_G + W_m + W_\phi}{W},$$

где W — суммарная мощность при движении машины в установленном режиме.

Теоретико-механическая модель динамики движения машины, позволяя вычислять энергетический баланс, дает возможность определять такие динамические показатели, как максимальная скорость, требуемая удельная мощность двигателей, расход энергии на единицу пути, принципы определения которых не отличаются от тех, которые используются в теории традиционных транспортных средств. К динамическим показателям также относится запас статической устойчивости (определяет способность шагающих машины сохранять устойчивость от опрокидывания при воздействии на нее внешних сил).

6. Экологические показатели. Для оценки экологических свойств шагающей установки вводится показатель дискретности следовой дорожки (рис. 7), который определяется как отношение длины следов установки к длине шага:

$$S_h = \frac{l}{L}$$

где l — длина следа; L — длина шага.

Как и для большинства других показателей, дискретность следовой дорожки определяется не только конструкцией машины, но и реализуемой походкой. Если машина оставляет сплошную колею, то показатель дискретности принимают равным единице. Кроме экологических свойств этот показатель влияет также на проходимость, определяя размеры препятствий, которые машина может перешагнуть без наступания на них [6].

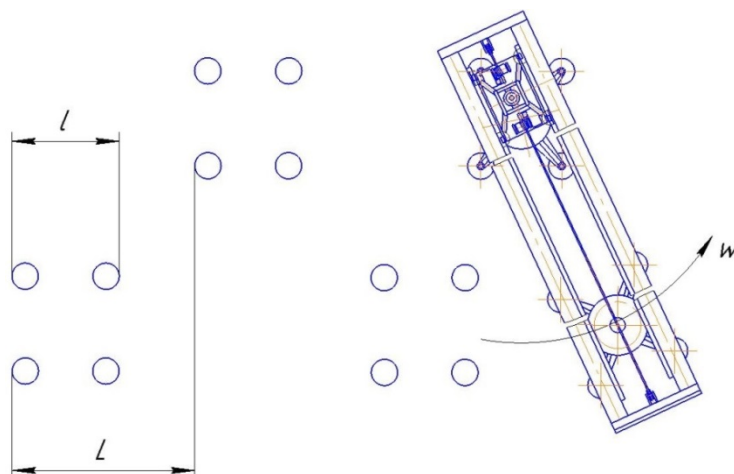


Рис. 7. Следовая дорожка

Еще одним показателем экологических свойств машины является коэффициент деформации грунта, который определяется как произведение дискретности следовой дорожки на глубину следов λ :

$$E_h = \lambda S_h .$$

В ходе изучения представленных проблем при проведении геологоразведки на дне морей было выявлено, что актуальнее использовать шагающую буровую установку, поскольку кинематические и динамические показатели шагового движителя существенно выше показателей колесных и гусеничных движителей. Предлагаемая установка состоит из минимального количества звеньев, что повышает ее кинематические показатели. Грунтовая и профильная проходимость также выше по сравнению с аналогичными параметрами колесных гусеничных движителей. Применение шагающего движителя позволяет существенно снизить деформацию грунта, что важно с экологической точки зрения.

Литература

- [1] Авдеев А.М., Тимофеев И.П., Колотвин Е.В., Игнатъев С.А., Васильев Н.И., Большунов А.В., Соколова Г.В. *Шагающая установка для транспортирования и укладки нефтегазовых труб на морском дне*. Патент РФ 2648365. Заявл. 13.06.2017, опублик. 26.03.2018.
- [2] Колотвин Е.В., Тимофеев И.П. Шагающая машина для геологоразведочного бурения. *Нефть и газ — 2017. Сб. тезисов конф. Т. 1*. Москва, 2017, с. 59.
- [3] Тимофеев, Г.В. Соколова, Г.А. Колтон, И.А. Королев, Е.В. Колотвин. *Шагающая буровая установка*. Патент РФ 166446. Заявл., 04.07.2016, опублик. 24.03.2017.
- [4] Колотвин Е.В., Тимофеев И.П., Королев И.А. Шагающая машина для геологоразведочного бурения. *XXVIII Международная Инновационно-ориентированная конф. молодых ученых и студентов «МИКМУС-2016». Сб. статей конф.* Москва, 2016, с. 248–251.
- [5] Колотвин Е.В., Тимофеев И.П. Шагающая машина для укладки нефтегазопровода под водой. *Нефть и газ — 2016. Сб. тезисов конф. Т. 2*. Москва, 2016, с. 55.

- [6] Малолетов А.В. *Динамика и оптимизация структуры, параметров и алгоритмов управления движением шагающих машин со сдвоенными шагающими двигателями*. Дисс. ... док. тех. наук. Волгоград, ВолгГТУ, 2015, с. 70–87.
- [7] Тимофеев И.П. *Шагающие машины для освоения ресурсов морского дна*. Ленинград, Изд-во Ленинградского университета, 1987, с. 33–64.
- [8] Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е., Яроц В.В., Верейкин А.А., Кулаков Б.Б., Каргинов Л.А. Метод проектирования пространственных древовидных исполнительных механизмов шагающих роботов. *Инженерный вестник*, 2014, № 11. URL: <http://engsi.ru/doc/736600.html>.
- [9] Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е., Яроц В.В. Использование исполнительных датчиков и инерциальной навигационной системы для стабилизации и управления движением двуногого шагающего робота. *Инженерный вестник*, 2012, № 12. URL: <http://engsi.ru/doc/521938.html>.

Колотвин Егор Викторович — студент кафедры «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Тимофеев Игорь Парфенович, доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроения», Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Научный руководитель — Попов Дмитрий Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**THE PRIMARY ADVANTAGES OF THE TWO-POINT WALKING
INSTALLATION OVER THE VEHICLES WITH THE PROPULSION
DEVICES OF DIFFERENT TYPES**

E.V. Kolotvin

egor.kolotvin.95@gmail.com

SPIN-code: 9225-9830

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article considers the key benefits of the walking drilling installation. It lists the basic types of propulsion devices which make it possible to move along the sea floor surface. Their shortcomings are indicated. In order to perform geological exploration works on the surface of the sea floor we suggest using the two-point drilling installation with the stepping propulsor developed in 2016. Working in autonomous mode according to the set program it can pass definite trajectories on the bottom, concurrently extracting the samples of bottom deposits. We describe a principle of moving (the system's center of mass transfer while walking) and demonstrate the installation's motion trajectories along the sea floor surface.

Keywords

Ecology, geological exploration, shelf, walking installation, drilling installation, hydraulic drive, bottom passability, profile passability, energy expenditure

Received 18.05.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Avdeev A.M., Timofeev I.P., Kolotvin E.V., Ignat'yev S.A., Vasil'yev N.I., Bol'shunov A.V., Sokolova G.V. Shagayushchaya ustanovka dlya transportirovaniya i ukladki neftegazovykh trub na morskome dne [Walking machine for underwater oil and gas pipeline transportation and lay]. Patent RF 2648365. Appl. 13.06.2017, publ. 26.03.2018.
- [2] Kolotvin E.V., Timofeev I.P. Shagayushchaya mashina dlya geologorazvedochnogo bureniya [Stepping exploration drilling machine]. *Neft' i gaz — 2017. Sb. tezisov konf. T. 1* [Oil and gas – 2017. Coll. of abstracts. Vol. 1]. Moscow, 2017, p. 59.
- [3] Timofeev, G.V. Sokolova, G.A. Kolton, I.A. Korolev, E.V. Kolotvin. Shagayushchaya burvaya ustanovka [Walking drill unit]. Patent RF 166446. Appl., 04.07.2016, publ. 24.03.2017.
- [4] Kolotvin E.V., Timofeev I.P., Korolev I.A. Shagayushchaya mashina dlya geologorazvedochnogo bureniya [Walking machine for exploratory drilling]. *XXVIII Mezhdunarodnaya Innovatsionno-orientirovannaya konf. molodykh uchenykh i studentov "MIKMUS-2016". Sb. statey konf [XXVIII Int. Innovative Conf. of Young Scientists and Students "MIKMUS-2016". Proc.]*. Moscow, 2016, pp. 248–251.
- [5] Kolotvin E.V., Timofeev I.P. Shagayushchaya mashina dlya ukladki neftegazoprovoda pod vodoy [Walking device for underwater oil and gas pipeline laying]. *Neft' i gaz — 2016. Sb. tezisov konf. T. 2* [Oil and gas – 2016. Coll. of abstracts. Vol. 2]. Moscow, 2016, p. 55.
- [6] Maloletov A.V. Dinamika i optimizatsiya struktury, parametrov i algoritmov upravleniya dvizheniem shagayushchikh mashin so sdvoennymi shagayushchimi dvizhitelyami. Diss. dok. tekh. nauk [Dynamics and optimization of motion control algorithm of walking machines with double walking movers. Doc. tech. sci. diss]. Volgograd, VolgGTU, 2015, pp. 70–87.

- [7] Timofeev I.P. Shagayushchie mashiny dlya osvoeniya resursov morskogo dna [Walking machines for sea bottom resources development]. Leningrad, Izd-vo Leningradskogo universiteta publ., 1987, pp. 33–64.
- [8] Koval'chuk A.K., Kulakov D.B., Semenov S.E., Yarots V.V., Vereykin A.A., Kulakov B.B., Karginov L.A. Engineering method for spatial tree-like operating mechanism of walking robots. *Inzhenernyy vestnik* [Engineering bulletin], 2014, no. 11. Available at: <http://engsi.ru/doc/736600.html>.
- [9] Koval'chuk A.K., Kulakov D.B., Semenov S.E., Yarots V.V. Using executive sensors and inertial navigating system for stabilizing and control of two-leg walking robot motion. *Inzhenernyy vestnik* [Engineering bulletin], 2012, no. 12. Available at: <http://engsi.ru/doc/521938.html>.

Kolotvin E.V. — student, Department of Fluid Mechanics, Hydraulic Machines and Hydraulic and Pneumatic Automation, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — I.P. Timofeev, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Mechanical Engineering, Saint-Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation.

Scientific advisor — D.N. Popov, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Fluid Mechanics, Hydraulic Machines and Hydraulic and Pneumatic Automation, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.