

ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВАКУУМНОЙ ПРИСОСКИ БЕРНУЛЛИ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

М.М. Князьков, П.П. Остриков, Е.А. Семенов, А.Н. Суханов

В статье представлено исследование, посвященное режимам работы присоски «Бернулли» в различных средах. Приводятся полученные экспериментально сравнительные характеристики вакуумных присосок, где генератором вакуума выступает воздушный эжектор и присоска Бернулли при их работе в воздушной и водной среде. Рассматривается возможность использования присосок Бернулли в качестве захватных вакуумных устройств на мобильных роботах, перемещающихся по произвольно ориентированным поверхностям в различных средах, расположенных на объектах морского базирования. Это обусловлено необходимостью обслуживать данные объекты в условиях, где ручной труд или опасен для персонала, или будет слишком дорогостоящим. Использование подобных устройств позволяет мобильным роботам закрепляться и перемещаться по поверхностям, не обладающими ферромагнитными свойствами. Экспериментальные характеристики были получены на специально созданной лабораторной установке, которая позволяет снимать характеристики уровня разрежения в области вакуумирования присосок в воздушной, водной и пограничной средах. Установка позволяет испытывать различные типы присосок в водной среде на глубине до двух метров. На этой установке были проведены натурные испытания различных типов присосок при различном уровне питающего давления сжатого воздуха.

Ключевые слова: присоска Бернулли, вакуумные захватные устройства, генератор вакуума, переходные процессы, мобильный робот вертикального перемещения, экспериментальный стенд, водная и воздушная среда, газодинамические и гидродинамические процессы.

Введение

В настоящее время в нашей стране все активнее ведется освоение ресурсов морского и океанического шельфа. Появляется все больше газо- и нефтедобывающих станций, в том числе в холодных арктических широтах [1]. Одним из таких примеров является нефтедобывающая станция Морская ледостойкая стационарная платформа (МЛСП) «Приразломная» (см. рис. 1), расположенная в Печорском море [2].

Обслуживание станции обусловлено трудностями, связанными с тем, что большую часть года она находится во льдах, а период её освобождения от ледяного покрова приходится на момент, когда температура воды резко повышается до 5–7 градусов тепла. Все это осложняет ее обслуживание и текущий ремонт, в особенности подводной части ее внешнего корпуса. В данный момент ведутся разработки робототехнических средств для обслуживания ее

внешнего корпуса, которые призваны заменить ручной труд водолазов [3, 4]. Однако разработка таких средств сопряжена с рядом сложностей, в частности, в месте расположения станции проходят сильные течения, что мешает в полной мере эффективно использовать различные типы автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). Поверхность внешнего корпуса МЛСП изготовлена из различных материалов, где основным материалом внешней обшивки выступает плакированная сталь, имеющая слабые магнитные свойства. Поэтому использование различных магнитных схватов для удержания робототехнических средств на поверхности корпуса станции не представляется возможным. Одним из решений, которое позволяет удерживаться на поверхности и при этом не повреждать ее, является использование вакуумных захватных устройств различного типа. Ранее в Институте проблем механики РАН им. А.Ю. Ишлинского проводились исследо-



Рис. 1. Морская ледостойкая стационарная платформа (МЛСП) «Приразломная»

вания по разработке ремонтно-диагностических робототехнических комплексов, где для удержания на поверхности использовались вакуумные захватные устройства, в которых генератором вакуума выступал воздушный эжектор [5–7]. Предыдущие исследования показали, что подобные захватные устройства могут быть использованы на разрабатываемых робототехнических комплексах, однако их использование сопряжено с необходимостью усложнения режимов управления при переходе робототехнического средства из одной среды в другую, а именно из воздушной в водную. Помимо этого, при переходе робототехнического средства из воздушной среды в водную происходит увеличение времени достижения рабочего уровня вакуума в захватах эжекторного типа, что ведет к уменьшению скорости перемещения всего робототехнического комплекса.

Вакуумные захватные устройства эжекторного типа показали свою эффективность только на небольшой глубине погружения. С увеличением глубины погружения донный тип устройств резко теряет эффективность, так как давление воды запирает их. Таким образом, была предпринята попытка заменить их на вакуумные захваты иного типа, а именно присоски Бернулли.

■ Подготовка к проведению эксперимента

По своим нагрузочным характеристикам присоски Бернулли (рис. 2) уступают вакуумным захватным устройствам эжекторного типа (рис. 3), однако обладают тем преимуществом, что менее подвержены влиянию окружающей среды.

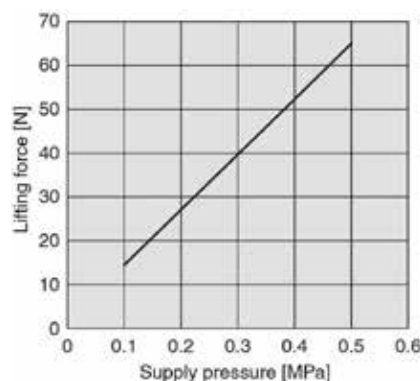


Рис. 2. Паспортные характеристики присоски Бернулли ZNC80, зависимость силы удержания с поверхностью контакта от питающего давления [8]

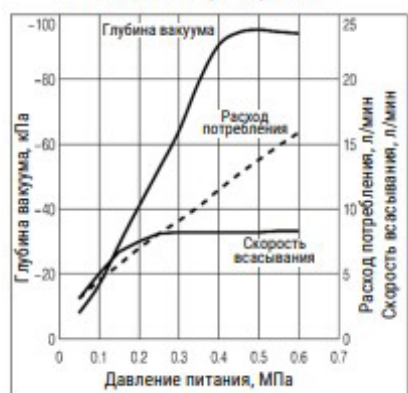


Рис. 3. Паспортные характеристики воздушного эжектора, который используется в вакуумной присоске [9]

Значение силы удержания на поверхности можно вычислить с помощью формулы:

$$F_y = p_v \cdot S_{\text{эфф}},$$

где F_y – сила удержания на поверхности;

p_v – глубина вакуума;

$S_{\text{эфф}}$ – эффективная площадь присоски.

С учетом зависимостей, показанных на рис. 3, можно получить из формулы численные данные для



Рис. 4. Экспериментальная установка



Рис. 5. Экспериментальная установка внутри бассейна

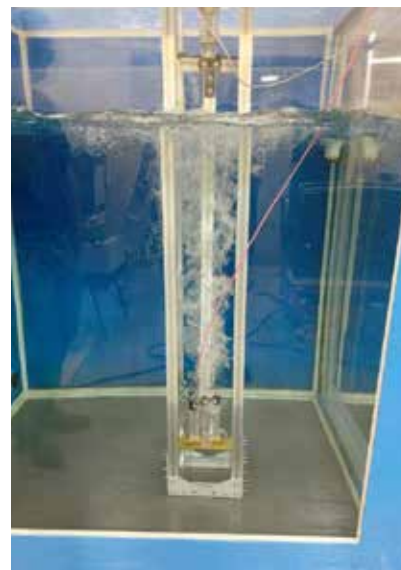


Рис. 6. Проведение испытаний присоски «Бернулли» на глубине 1,5 метра

сопоставления усилий, развиваемых присоской Бернулли, с таковыми для вакуумной присоски эжекторного типа.

Для проведения эксперимента была использована установка (рис. 4), которая позволяет с различным усилием отрывать присоску от поверхности, делать замеры разрежения под присоской в реальном времени, при различном питающем давлении. На установке используется следящий пневматический привод, который регулирует усилие прижатия и отрыва присоски от поверхности. Также на установке закреплены датчик вакуума и датчик расхода сжатого воздуха.

На установке была закреплена присоска Бернулли, что позволило снять экспериментальные характеристики сначала в воздушной среде, а потом в водной среде (рис. 5).

Бассейн позволяет проводить испытания различных типов присосок на глубине до 2 метров, в данном случае испытания присоски Бернулли проводились на глубине 1,5 метра (рис. 6). Стоит отметить, что при работе присоски под водой возникает воздушный пузырь, внутри которого и происходит

создание области пониженного давления. При его деформации и сильном уменьшении размеров пузыря уровень вакуума может падать практически до нулевых значений. Такая деформация может вызываться динамикой жидкости при наличии течения воды.

■ Проведение эксперимента

Ранее были получены динамические характеристики образования заданного разрежения под вакуумными присосками эжекторного типа в воздушной (рис. 7) и водной (рис. 8) среде.

Во время проведения эксперимента с присоской Бернулли также были получены характеристики образования заданного разрежения в области вакуумирования в воздушной (рис. 9) и водной (рис. 10) среде.

Давление питания как при испытании вакуумной присоски эжекторного типа, так и присоски Бернулли было 6 атм. Из графиков видно, что значение разрежения в различных средах в вакуумной присоске

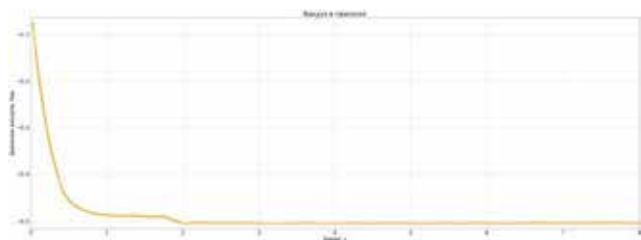


Рис. 7. Время образования заданного разрежения в области вакуумирования в воздушной среде

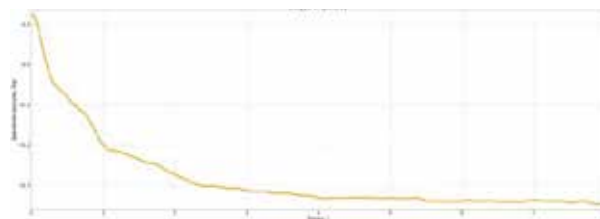


Рис. 8. Время образования заданного разрежения в области вакуумирования в водной среде

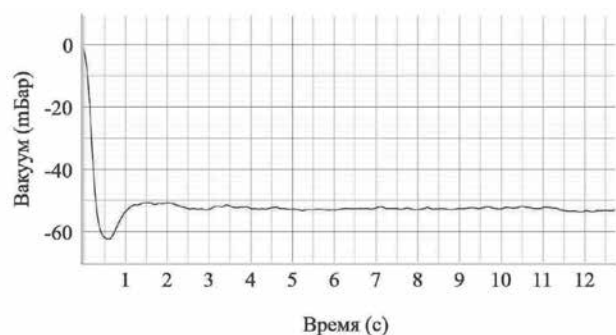


Рис. 9. Время образования заданного разрежения в области вакуумирования присоски Бернулли в воздушной среде

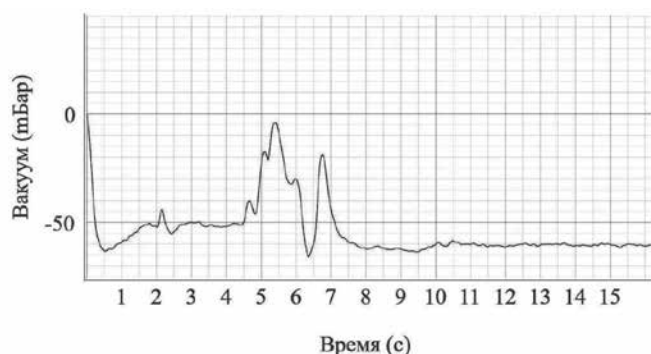


Рис. 10. Время образования заданного разрежения в области вакуумирования присоски Бернулли в водной среде

равно $-0,5$ Бар, а для присоски Бернулли оно равнялось $-0,05$ Бар, что в 10 раз меньше. Однако время образования разрежения в воздушной среде у присоски Бернулли 0,5 секунды, а у присоски эжекторного типа 2 секунды. В водной среде время образования разрежения у присоски Бернулли также 0,5 секунды, в то время как у присоски эжекторного типа уже 4 секунды. Так же на рис. 8 в интервале времени 5–7 секунд происходило резкое падение уровня вакуума почти до нулевых значений, что было вызвано легким отклонением рабочей поверхности присоски от положения, параллельного поверхности. Применение присосок Бернулли возможно на поверхностях с малой кривизной и в ситуациях, когда не происходит сильной деформации воздушного пузыря вокруг присоски.

Заключение

Из проведенных исследований можно сделать вывод, что хотя при одинаковом питающем давлении сжатого воздуха присоска Бернулли показала нагрузочные характеристики, в 10 раз меньшие по сравнению с вакуумной присоской эжекторного

типа, скорость установления рабочего уровня вакуума присоски Бернулли менее подвержена влиянию окружающей среды, так как при ее работе в водной среде не происходит увеличения временных характеристик. Это позволяет сделать предположение, что использование присосок Бернулли в качестве захватных устройств на мобильных робототехнических устройствах возможно, но только в качестве легких инспекционных роботов, в условиях слабых внешних течений воды или их отсутствия.

Гранты и программы

Работа выполнена по теме государственного задания «Динамика сложных механических систем, управление движением летательных аппаратов и подвижных объектов, робототехника и биомеханика, микромеханика, механика навигационных и гироскопических систем» (№ госрегистрации 124012500443-0).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бояринов А.Ю., Литвинова О.В. Перспективы освоения арктического шельфа // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. №2 (104). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.2.034>.
2. Сидоров К., Морозов Г. Своя Арктика // Вокруг света. 2016. № 11 (2914). С. 80–87. ISSN 0321-0669.
3. Albitar H., Dandan K., Ananiev A., Kalaykov I. Underwater Robotics: Surface Cleaning Technics, Adhesion and Locomotion Systems // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2016. <https://doi.org/10.5772/62060>.
4. Park Y.S., Park G.Y., Yoon J., Lee B.J., Oh W.Z. Design and Control of Underwater Wall Ranging Robot for Inspection of Nuclear Reactor. In: Zelinsky A. (ed) Field and Service Robotics. Springer, 1998, London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1273-0_38
5. Бельченко Ф.М., Князьков М.М., Остриков П.П., Семенов Е.А., Суханов А.Н., Чашухин В.Г. Экспериментальные исследования газодинамических и гидродинамических процессов, происходящих в вакуумных захватных устройствах, функционирующих в различных средах // Робототехника и техническая кибернетика. 2025. Т. 13, № 4. С. 285–292.
6. Бельченко Ф.М., Князьков М.М., Остриков П.П., Семенов Е.А., Суханов А.Н. Система управления испытательным стендом для исследования влияния нормальных знакопеременных воздействий на скорость образования разрежения в полости вакуумного захвата в водной среде // Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4, ч. 1. С. 139–145. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.038.
7. Бельченко Ф.М., Князьков М.М., Остриков П.П., Семенов Е.А., Суханов А.Н. Экспериментальные исследования сцепления с поверхностью вакуумных захватных устройств в различных средах // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4, ч. 4. С. 25–32. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.076
8. https://content2.smcetech.com/pdf/ZNC-B_EU.pdf
9. https://docs.smarta.ru/catalogues/PNA/5_Vacuum_SMARTA_2025.pdf

Сведения об авторах:

КНЯЗЬКОВ Максим Михайлович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории робототехники и мехатроники

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

Адрес: 119526, Москва, проспект Вернадского 101-1

Область научных интересов: робототехника и мехатроника

E-mail: ipm_labrobotics@mail.ru

Тел.: 8 (495) 433-77-66

ORCID: 0000-0002-5863-4079

ОСТРИКОВ Павел Павлович, ведущий программист лаборатории робототехники и мехатроники

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

Адрес: 119526, Москва, проспект Вернадского 101-1

Область научных интересов: робототехника и мехатроника

E-mail: ostricov93@yandex.ru

Тел.: 8 (495) 433-77-66

ORCID: 0009-0000-7569-1246

СЕМЕНОВ Евгений Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории робототехники и мехатроники

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

Адрес: 119526, Москва, проспект Вернадского 101-1

Область научных интересов: робототехника и мехатроника

E-mail: sim1165@mail.ru

Тел.: 8 (495) 433-77-66

ORCID: 0000-0002-6196-1433

СУХАНОВ Артем Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории робототехники и мехатроники

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

Адрес: 119526, Москва, проспект Вернадского 101-1

Область научных интересов: робототехника и мехатроника

E-mail: sukhonov-artiom@yandex.ru

Тел.: 8 (495) 433-77-66

ORCID: 0000-0002-4122-492X



Для цитирования:

Князьков М.М., Остриков П.П., Семенов Е.А., Суханов А.Н. ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВАКУУМНОЙ ПРИСОСКИ БЕРНУЛЛИ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ // ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2026. № 3 (57). С. 17–23. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_02. EDN: YVRDHB.



RESEARCH OF THE OPERATION MODES OF THE BERNULLI VACUUM SUCTION CUP IN VARIOUS ENVIRONMENTS

M.M. Knyazkov, P.P. Ostricov, E.A. Semenov, A.N. Sukhanov

The article presents a study on the operation modes of the Bernoulli suction cup in various environments. It provides experimental comparative characteristics of vacuum suction cups using an air ejector and a Bernoulli suction cup as vacuum generators in air and water environments. The article also explores the potential use of Bernoulli suction cups as vacuum grippers on mobile robots that navigate on randomly oriented surfaces in various environments located on marine-based facilities. This is due to the need to maintain these objects in environments where manual labor is either dangerous or too expensive. The use of such devices allows mobile robots to attach themselves and move on surfaces that do not have ferromagnetic properties. Experimental characteristics were obtained on a specially created laboratory installation, which allows to remove the characteristics of the level of rarefaction in the vacuuming area of the suction cups in the air, water and border environments. The installation allows to test different types of suction cups in the water environment at a depth of up to two meters. On this installation, full-scale tests of different types of suction cups were carried out at different levels of the compressed air feeding pressure.

Keywords: Bernoulli suction cup, vacuum gripping devices, vacuum generator, transient processes, mobile vertical movement robot, experimental bench, water and air environment, gas-dynamic and hydro-dynamic processes.

References

1. Boyarinov A.Yu., Litvinova O.V. Perspektivy osvoeniya arkticheskogo shel'fa // Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. 2021. No. 2 (104). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.2.034>
2. Sidorov K., Morozov G. Svoya Arktika // Vokrug sveta. 2016. No. 11 (2914). P. 80–87. ISSN 0321-0669
3. Albitar H., Dandan K., Ananiev A., Kalaykov I. Underwater Robotics: Surface Cleaning Techniques, Adhesion and Locomotion Systems // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2016. <https://doi.org/10.5772/62060>.
4. Park Y.S., Park G.Y., Yoon J., Lee B.J., Oh W.Z. Design and Control of Underwater Wall Ranging Robot for Inspection of Nuclear Reactor. In: Zelinsky A. (ed) Field and Service Robotics. Springer, 1998, London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1273-0_38
5. Bel'chenko F.M., Knyaz'kov M.M., Ostrikov P.P., Semenov E.A., Suhanov A.N., CHashchuhin V.G. Eksperimental'nye issledovaniya gazodinamicheskikh i gidrodinamicheskikh processov, proiskhodyashchih v vakuumnykh zahvatnykh ustroystvakh, funkcioniruyushchih v razlichnykh sredakh // Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika. 2025. T. 13, No. 4. P. 285–292.
6. Bel'chenko F.M., Knyaz'kov M.M., Ostrikov P.P., Semenov E.A., Suhanov A.N. Sistema upravleniya ispytatel'nym stendom dlya issledovaniya vliyaniya normal'nykh znakoperemennykh vozdeystviy na skorost' obrazovaniya razrezheniya v polosti vakuumnogo zahvata v vodnoy srede // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2025. No. 4, ch. 1. P. 139–145. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.038.
7. Bel'chenko F.M., Knyaz'kov M.M., Ostrikov P.P., Semenov E.A., Suhanov A.N. Eksperimental'nye issledovaniya scepneniya s poverhnost'yu vakuumnykh zahvatnykh ustroystv v razlichnykh sredakh // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2024. No. 4, ch. 4. P. 25–32. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.076
8. https://content2.smcetech.com/pdf/ZNC-B_EU.pdf
9. https://docs.smarta.ru/catalogues/PNA/5_Vacuum_SMARTA_2025.pdf

Recommended citation:

Knyazkov M.M., Ostricov P.P., Semenov E.A., Sukhanov A.N. RESEARCH OF THE OPERATION MODES OF THE BERNULLI VACUUM SUCTION CUP IN VARIOUS ENVIRONMENTS. UNDERWATER INVESTIGATIONS AND ROBOTICS. 2026. No. 3 (57). C. 17–23. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_02. EDN: YVRDHB.

Information about the authors

KNYAZ'KOV Maksim M., Ph.D. (Eng), Senior Researcher,
Laboratory of Robotics and Mechatronics
Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of
Sciences
Address: Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526.
Scientific interests: Robotics and Mechatronics
Phone : +74954337766,
E-mail: ipm_labrobotics@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5863-4079

OSTRIKOV Pavel P., lead programmer, Laboratory of Robotics
and Mechatronics
Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of
Sciences
Address: Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526.
Scientific interests: Robotics and Mechatronics
Phone : +74954337766,
E-mail: ostricov93@yandex.ru
ORCID: 0009-0000-7569-1246

SEMENOV Evgeniy A., Ph.D. (Eng), Senior Researcher,
Laboratory of Robotics and Mechatronics
Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of
Sciences
Address: Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526.
Scientific interests: Robotics and Mechatronics
Phone : +74954337766,
E-mail: sim1165@mail.ru
ORCID: 0000-0002-6196-1433

SUKHANOV Artem N., Ph.D. (Eng), Senior Researcher,
Laboratory of Robotics and Mechatronics
Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of
Sciences
Address: Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526.
Scientific interests: Robotics and Mechatronics
Phone : +74954337766
E-mail: sukhonov-artiom@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-4122-492X

