

В. Г. Градецкий, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., gradet@ipmnet.ru,
М. М. Князьков, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ipm_labrobotics@mail.ru,
Е. А. Семенов, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., sim1165@mail.ru,
А. Н. Суханов, мл. науч. сотр., sukhonov-artiom@yandex.ru,
Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН), г. Москва

Динамические процессы в вакуумных контактных устройствах роботов вертикального перемещения в водной среде¹

Обсуждаются результаты исследований условий движения пневматических роботов по вертикальным поверхностям под водой. Выявляются особенности движения вакуумных устройств для разработки уточненной математической модели устройства контакта с поверхностями в водной среде. Выполненные экспериментальные исследования позволили получить дополнительные данные по динамике, построить циклограммы работы и скорректировать полученные ранее результаты. Для аналитического исследования динамических процессов, происходящих в системе вакуумных контактных устройств, с учетом сложности описания нелинейностей были разработаны линеаризованные упрощенные модели системы "воздушный эжектор — устройство контакта — водная среда". Вакуумные контактные устройства предназначены для осуществления гарантированного контакта с вертикально, наклонно или горизонтально расположенными поверхностями, по которым совершает движение подводный робот вертикального перемещения, выполняющий предписанные технологические задачи, например, в бассейнах выдержки атомных электростанций, на поверхностях корпусов кораблей, на поверхностях подводных сооружений. В моделях учитывались силы сцепления с поверхностями, находящимися под водой, — силы, возникающие в результате перепада давлений, силы трения, контактного и вакуумного взаимодействия, упругости стенок полости переменного объема подвижного элемента конструкции устройства. В результате решения модельной задачи получены в явном виде значения механических параметров, а также вакуума и расхода в полости переменного объема как функций изменения зазора между торцом гофрированной мембраны и поверхностями. В результате исследования динамических процессов, происходящих в упрощенных моделях вакуумных контактных устройств "воздушный эжектор — поверхность контакта — водная среда", получены переходные характеристики изменения действующих сил и давлений во времени, а также зависимости нормальной и тангенциальной составляющих сил от глубины погружения в воду. Исследованы варианты конструкций вакуумных устройств контакта с поверхностями, находящимися в водной среде, и проведена модернизация лабораторного стенда для испытаний вакуумных контактных устройств под водой.

Ключевые слова: устройство контакта, робот вертикального перемещения, водная среда, особенности движения, динамические характеристики, математические модели, экспериментальные исследования

Введение

В работе [1] авторов данной статьи рассмотрена математическая модель системы "воздушный эжектор — устройство контакта — водная среда" и получены расчетные соотношения для нахождения вакуума в камере вакуумного контактного устройства, соединенной с вакуумирующей струей эжектора.

Исследование функционирования вакуумных контактных устройств и движений по вертикальным и наклонным поверхностям в водной среде роботов, снабженных такими устройствами, обусловлено тем, что возникает возрастающий интерес к выполнению технологических операций на поверхностях [2—4], расположенных в водной среде, например, в бассейнах выдержки атомных электростанций, на поверхностях корпусов кораблей, на поверх-

ностях подводных сооружений, которые могут проводиться с помощью пневматических роботов вертикального перемещения. К таким операциям относится очистка поверхностей, оценка их качества, техническая диагностика и неразрушающий контроль, сварка, окраска [5—7].

Контактное взаимодействие с поверхностями и удержание на вертикальных поверхностях осуществляется посредством вакуумных устройств. В целях эффективного проведения технологических операций под водой, обоснования выбора конструктивных параметров и структуры управления робототехническими системами вертикального перемещения с возможностью движения в изменяющихся условиях окружающей среды необходимо выявить особенности движения и динамические процессы, происходящие в вакуумных контактных устройствах (ВКУ). В статье рассматривается комплексный подход к разработке моделей движения, учитывающих влияние как гидродинамических, так и механических параметров.

¹Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ, проект № 18-08-00357.

Особенности условий движения ВКУ в водной среде

Дальнейшее изучение динамики, построение математических моделей необходимы в будущем для построения цифрового управления в водной среде. Расчет вакуумного контактного устройства при фиксации на поверхностях в водной среде должен учитывать, что определяющими силами являются силы трения, адгезии, упругости, проскальзывания, возникающие переменные усилия от давления водяного столба в зависимости от высоты погружения в воду и действия вакуумирования.

Динамические процессы, происходящие при изменении состояния в моменты фиксации устройств контакта на поверхности, нелинейны, достаточно сложны и поэтому рассматриваются при сделанных допущениях относительно процессов гидродинамики.

Рассматриваются динамические характеристики вакуумных контактных устройств (ВКУ), которые во многом зависят от начального положения устройства относительно поверхности, к которой робот должен надежно закрепляться (рис. 1). Предполагается, что формирование вакуума в ВКУ осуществляется посредством эжектора, и в случае действия под водой воздушная струя отсасывает воду из полости ВКУ, контактирующей с вертикальной поверхностью.

ВКУ содержит (рис. 1) гофрированную мембрану 1; плоскую опору 2, соединенную со штоком 7 пневмопривода 5; камеру 3, из которой под действием вакуума откачивается воздух и смесь воздуха с водой; генератор вакуума — эжектор 4; датчик вакуума 6.

Соответственно P_0 , P_2 , P_{01} , P_{02} — давление на входе сопла эжектора, давление вакуума, давление на входе и на выходе камер пневмопривода.

Возможны два начальных положения хода ВКУ к контактирующей поверхности: первое — когда зазор между ВКУ и поверхностью равен нулю, и второе — когда зазор не нулевой, а значение абсолютных давлений изменяются в зависимости от эжекции и высоты водяного столба при погружении в воду.

Если эжектор выполняет откачивание воды из емкости ВКУ при нулевом начальном зазоре $x = 0$, то процесс истечения жидкости из емкости будет происходить по кривой обратной экспоненты до величины P_{2m} от началь-

ного давления P_a (рис. 2), равного атмосферному давлению с корректировкой по водяному столбу, когда при глубине погружения 10 м атмосферное давление возрастает примерно на 10^5 Па. При отключении давления питания P_0 эжектора давление в емкости сравнивается с давлением окружающей среды по близкому к экспоненциальному закону (рис. 3) и образуется

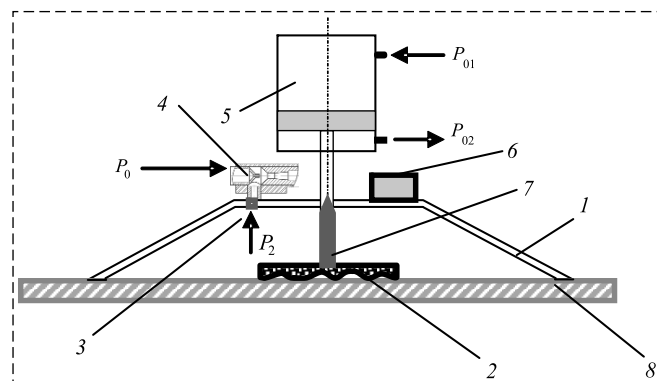


Рис. 1. Принципиальная схема

Fig. 1. Schematic diagram

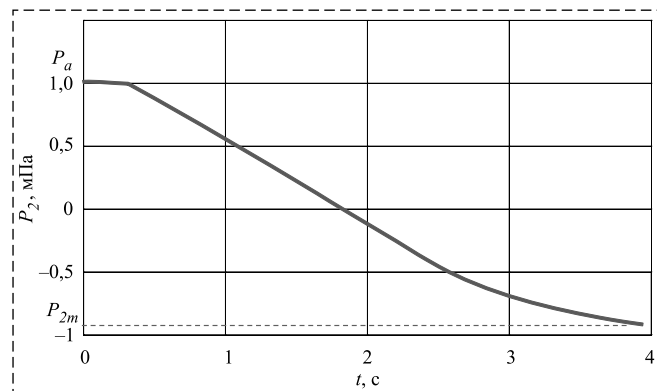


Рис. 2. Изменение давления P_2 в камере 3 ВКУ при создании вакуума при зазоре $x = 0$ (при глубине погружения 10 м)

Fig. 2. Pressure P_2 transient process inside vacuum chamber 3 of vacuum contact device with gap $x = 0$ (10 meters under water)

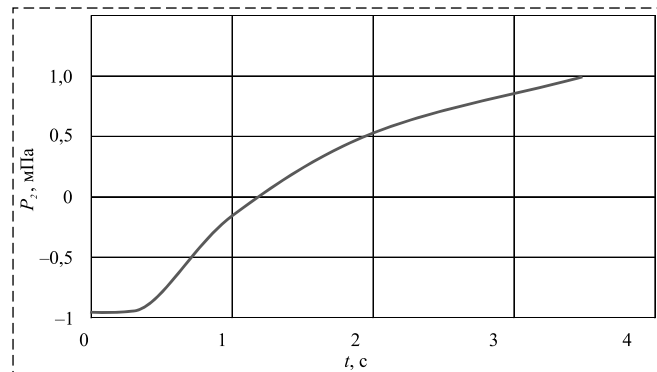


Рис. 3. Изменение давления P_2 в камере 3 ВКУ при отключении эжектора (при глубине погружения 10 м)

Fig. 3. Pressure P_2 transient process inside vacuum chamber 3 of vacuum contact device after ejector deactivation (10 meters under water)

минимальный зазор $x = x_{кр}$, при котором происходит полное заполнение камеры.

Если эжектор откачивает воду из емкости ВКУ при зазоре $x \neq 0$, то в процессе создания вакуума, соответствующего переменному давлению P_{2m} , могут возникать случайные колебания, обусловленные неравномерностью откачки вследствие дополнительного поступления воды через зазор.

Влияние гидродинамических и механических параметров

Определим значение зазора $x_{кр}$, при котором происходит полное заполнение камеры при допущениях о том, что средняя плотность ρ среды в камере не меняется, перемещение торца ВКУ при действии вакуума происходит по линейному закону, упругость стенок с коэффициентом упругости с пропорциональна перемещению, а площадь поперечного сечения мембраны равна эффективной площади. Для этого определим, что приращение объема воздушной смеси в камере мембраны равно произведению площади поршневого действия на перемещение x торца мембраны относительно поверхности перемещения. Тогда масса среды, находящейся в камере мембраны, будет равна $m = V_{0\rho} + x(1 - c)f\rho$. Здесь V_0 — начальный объем; ρ — усредненная плотность; f — эффективная площадь мембраны; c — коэффициент упругости стенок мембраны.

Дифференцируя по времени выражение для m при допущении о постоянстве ρ , получим выражение для массового расхода:

$$\frac{dm}{dt} = G = (1 - c)f\rho \frac{dx}{dt}, \text{ т. е. } \frac{dx}{dt} = \frac{G}{(1 - c)f\rho},$$

откуда получаем, что $x = \int_{t_0}^{t_k} \frac{G}{f\rho} dt$ и при $t_0 = 0$ $x_k = \frac{G}{(1 - c)f\rho} t_k$.

Схемы силового нагружения ВКУ приведены на рис. 4 (см. вторую сторону обложки), где показано действие силы прижатия F_2 (рис. 4, а), действие нормальной и касательной составляющих силы прижатия (рис. 4, б) и действие силы отрыва от поверхности в общем случае (рис. 4, в).

Сила прижатия F_2 к поверхности возникает в результате генерирования вакуума эжектором и равна $F_2 = P_2 f = [(P_a + \rho gh) - |P_B|]f$, где

f — эффективная площадь мембраны вакуумного контактного устройства, $f = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)$; D — усредненный диаметр мембраны; d — диаметр штока; P_a — атмосферное давление; P_B — давление в вакуумируемой полости; ρ — плотность воды; g — ускорение свободного падения; h — глубина погружения или высота столба воды.

Рабочая циклограмма переходных процессов, происходящих в ВКУ при работе в водной среде, приведена на рис. 5. Циклограмма иллюстрирует, как давление, силы и перемещения изменяются в зависимости от времени при изменении входного воздействия — давления питания эжектора и последующего изменения вакуума. На циклограмме обозначено: P_B — давление вакуума; F_B — сила, возникающая в результате генерации вакуума; x — расстояние от торца ВКУ до поверхности. Моменты времени $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ соответствуют переключению действия сил и давлений при подаче и снятии давления питания P_0 эжектора. Глубина погружения h равна 1 м.

Из анализа циклограммы следует, что при погружении ВКУ на глубину 1 м быстродействие всех систем уменьшается в три раза, по сравнению с проведенными ранее экспериментами в воздушной среде [8].

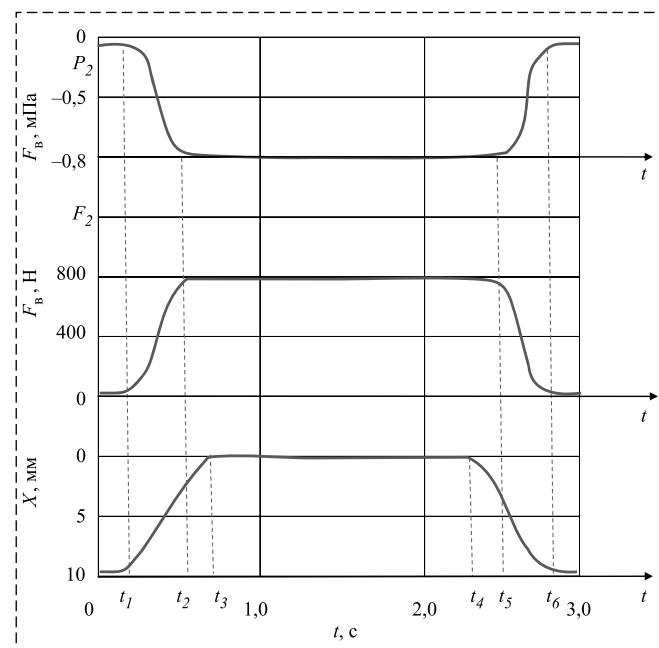


Рис. 5. Циклограмма переходных процессов, происходящих в ВКУ при работе в водной среде

Fig. 5. Transient processes inside suction chamber of vacuum contact device while operating in water environment

Закключение

Выявлены особенности динамики вакуумных контактных устройств в водной среде, состоящие в замедлении протекания переходных процессов, изменении давлений вакуума, действующих сил и скоростей переключения с увеличением глубины погружения на каждый метр в три раза, а также в наложении колебаний на характеристику переключения вследствие образующейся смеси воздуха и воды в моменты переключения.

Получены величины механических параметров — перемещений и сил — в зависимости от гидродинамических значений давления, вакуума и расхода.

Список литературы

1. Gradetsky V., Knyazkov M., Sukhanov A., Semenov E., Chashchukhin V., Kryukova A. Possibility of Using Wall Climbing Robots for Underwater Application // Proceed. of CLAWAR-2017

Intern. Conference. Human-Centric Robotics, Porto, Portugal, Sept. 2017. P. 239–246.

2. Haferkamp H., Bach Fr.-W., Ogawa Y., Rachkov M. Climbing Robot for Underwater Cutting // Proc. International Conf. on Oceans Engineering, OCEANS. 1994. Vol. 1. P. 602–607.

3. Haferkamp H., Bach Fr.-W., Rachkov M., Seevers J. Climbing Robot for Underwater Cleaning // Proc. 5th International Offshore and Polar-Engineering Conf., Hague. 1995. Vol. 2. P. 305–311.

4. Kitowski Z., Garus J. Control of Motion of Underwater Robot Under Condition of External Disturbances // Proc. 7th International Conf. on Advanced Robotics, ICAR'95, Sant Feliu de Guixols, September 1995. Vol. 1. P. 278–282.

5. Rachkov M. Testing of the WCRs' Grippers by the Simulation Systems // Proc. of the Radio Conf., Moscow. 1990. Vol. 2. P. 22–24.

6. Robotics in Nuclear Facilities, 1991 // Special Issue for Exhibitions of the 11th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SmiRT 11). Tokyo. August 1991. P. 25–28.

7. Yamafuji K., Gradetsky V., Rachkov M., Semenov E. Mechatronic Drive for Intelligent Mobile Wall Climbing Robots // Robotics and Mechatronics. 1993. Vol. 5, N. 2. P. 164–171.

8. Градецкий В. Г., Князьков М. М., Семенов Е. А., Суханов А. Н. Адаптивные захватные устройства мобильных роботов с миниатюрными эжекторами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 3. С. 172–177.

Dynamic Processes in Vacuum Contact Devices of Robots for Vertical Motion in the Water Environment

V. G. Gradetsky, gradet@ipmnet.ru, M. M. Knyazkov, ipm_labrobotics@mail.ru, E. A. Semenov, sim1165@mail.ru, A. N. Sukhanov, sukhonov-artyom@yandex.ru, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119526, Russian Federation

Corresponding author: Knyazkov Maksim M., Ph.D., Senior Researcher, Laboratory of Robotics and Mechatronics, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: ipm_labrobotics@mail.ru

Accepted on March 19, 2019

Abstract

The results of experimental investigation intended to improve movement conditions for pneumatic robots on vertical surfaces under water are discussed. Features of the movement of vacuum contact devices for the simulation of mathematical model of the vacuum contact device with surfaces under water are presented. The experimental studies made it possible to obtain additional data on the dynamics of attachment, to obtain transient processes for air-water flow through ejector and to correct the results obtained earlier. For the purpose of analytical study of dynamic processes occurring in the system of vacuum contact devices, and taking into account the complexity of the description of nonlinearities, linearized simplified models of the system "air ejector — contact device — water environment" were developed. Vacuum contact devices are designed to provide guaranteed contact with vertical surfaces, plane slopes or horizontal surfaces on which the underwater robot performs its movement, carrying out the prescribed technological tasks, for example, in dry wells of nuclear power plants, on the surfaces of ship hulls, on the surfaces of underwater structures. The models took into account the forces of adhesion to the surfaces under water — the forces from the pressure drop, the friction force, the contact and vacuum interaction, the elasticity of suction caps. As a result of the solution of the model problem, the values of mechanical parameters, as well as the values of vacuum and flow in the cavity of variable volume as functions of changing the gap between the end of the corrugated membrane and the surfaces are obtained explicitly. As a result of the study of dynamic processes occurring in simplified models of vacuum contact devices "air ejector — contact surface — water environment", the transient characteristics of the change in the operating forces and pressures over time, as well as the dependence of the normal and tangential components of the forces on the depth of immersion in water were obtained. The variants of the designs of vacuum contact devices with surfaces in the water environment are investigated, and the modernization of the laboratory test bench for testing vacuum contact devices under water is carried out.

Keywords: contact device, vertical movement robot, water environment, motion features, dynamic characteristics, mathematical models, experimental studies

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 18-08-00357.

For citation:

Gradetsky V. G., Knyazkov M. M., Semenov E. A., Sukhanov A. N. Dynamic Processes in Vacuum Contact Devices of Robots for Vertical Motion in the Water Environment, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 7, pp. 417–421.

DOI: 10.17587/mau.20.417-421

References

1. **Gradetsky V., Knyazkov M., Sukhanov A., Semenov E., Chashchukhin V., Kryukova A.** Possibility of Using Wall Climbing Robots for Underwater Application, *Proceed. of CLAWAR-2017 Intern. Conference, Human-Centric Robotics*, Porto, Portugal, Sept. 2017, pp. 239–246.

2. **Haferkamp H., Bach Fr.-W., Ogawa Y., Rachkov M.** Climbing Robot for Underwater Cutting, *Proc. International Conf. on Oceans Engineering, OCEANS*, 1994, Brest, vol. 1, pp. 602–607.

3. **Haferkamp, H., Bach Fr.-W., Rachkov, M., Seevers J.** Climbing Robot for Underwater Cleaning, *Proc. 5th International Offshore and Polar-Engineering Conf.*, Hague, 1995, vol. 2, pp. 305–311.

4. **Kitowski Z., Garus J.** Control of Motion of Underwater Robot Under Condition of External Disturbances, *Proc. 7th International Conf. on Advanced Robotics, ICAR'95*, Sant Feliu de Guixols, September 1995, vol. 1, pp. 278–282.

5. **Rachkov M.** Testing of the WCRs' Grippers by the Simulation Systems. *Proc. of the Radio Conf.*, Moscow, 1990, vol. 2, pp. 22–24.

6. **Robotics in Nuclear Facilities**, 1991, Special Issue for Exhibitions of the 11th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SmiRT 11), Tokyo August 1991, pp. 25–28.

7. **Yamafuji K., Gradetsky V., Rachkov M., Semenov E.** Mechatronic Drive for Intelligent Mobile Wall Climbing Robots, *Robotics and Mechatronics*, 1993, vol. 5, no. 2, pp. 164–171.

8. **Gradetsky V., Knyazkov M., Sukhanov A., Semenov E.** *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 3, pp. 172–177 (in Russian).

12-я Мультиконференция по проблемам управления (МКПУ—2019)

23—28 сентября 2019 г., с. Дивноморское, Геленджик, Краснодарский край

СОСТАВ МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИИ

Мультиконференция включает четыре локальные научно-технические конференции:

МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ (ИУ—2019)

Направления работы

1. Интеллектуализация систем:

- Автоматизация и оптимизация планирования действий автономных систем
- Машинное обучение и методы дооснащения в условиях неопределенности
- Интеллектуальный анализ данных, классификация, распознавание и диагностика
- Компьютерная лингвистика и онтологии
- Семантический поиск и управление знаниями
- Невербальные модели
- Когнитивный анализ, биологические сети и целеполагание
- Логический вывод и автоматизация рассуждений
- Методы и технологии «мягких вычислений»

- Обучающие и экспертные системы
- Верификация знаний
- Прикладные интеллектуальные системы управления
- **2. Эргатические проблемы человеко-машинных систем:**
- Интеллектуальная поддержка антропоцентрических систем и профессиональной деятельности человека (оператора, исследователя, инженера, ЛПР и т.п.)
- Проблемы человеко-машинного интерфейса
- Обучающие и тренажерные комплексы эргатических систем управления движением
- Анализ семантических отказов в оперативно-советующих системах
- Прикладные эргатические системы управления

УПРАВЛЕНИЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ (УАКС-2019)

Направления работы

- Управление летательными аппаратами: требования, функции, алгоритмы.
- Моделирование динамики полета, управления движением ЛА
- Интеллектуальные системы управления в авиационно-космической технике
- Методы обработки и представления информации в авиационно-космических системах (АКС) Человеко-машинный интерфейс, технологии VR и AR

- Управление техническим состоянием и самодиагностика АКС
- Архитектура бортовых комплексов, информационное обеспечение, элементы и агрегаты. Управление техническим состоянием и самодиагностика АКС
- Архитектура бортовых комплексов, информационное обеспечение, элементы и агрегаты.

РОБОТОТЕХНИКА И МЕХАТРОНИКА (РИМ-2019)

Направления работы

- Кинематика и динамика роботов и мехатронных систем
- Средства очувствления и навигации роботов
- Алгоритмы и системы управления роботов и мехатронных систем
- Планирование поведения роботов в недетерминированных средах
- Групповое управление роботов

- Безэкипажные машины и автономные наземные роботы
- Беспилотные летательные аппараты
- Роботы для ликвидации ЧС Роботизация в топливно-энергетическом комплексе
- Роботизация в сельскохозяйственном производстве
- Прикладные аспекты проектирования и применения роботов и мехатронных систем