

*Ф. М. Бельченко, М. М. Князьков, П. П. Остриков
Е. А. Семенов, А. Н. Суханов, В. Г. Чашухин*

**ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ПОЛОСТЯХ И КАНАЛАХ ВАКУУМНЫХ ЗАХВАТНЫХ УСТРОЙСТВ***

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

lpm_labrobotics@mail.ru

В статье рассматриваются результаты исследований газодинамических и гидродинамических процессов в полостях и каналах вакуумных захватных устройств, функционирующих в воздушной, водной и смешанной средах. Получены переходные процессы, возникающие в полостях захватных устройств от момента включения питания генератора вакуума до момента установившегося уровня разрежения.

Ключевые слова: вакуумные захватные устройства, генератор вакуума, переходные процессы, мобильный робот вертикального перемещения, экспериментальный стенд.

*F. M. Belchenko, M. M. Knyazkov, P. P. Ostrikov
E. A. Semenov, A. N. Sukhanov, V. G. Chaschuhin*

**STUDIES OF GAS-DYNAMIC AND HYDRODYNAMIC PROCESSES
IN CAVITIES AND CHANNELS OF VACUUM GRIPPING DEVICES**

**Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics
of the Russian Academy of Sciences**

The article discusses the results of studies of gas-dynamic and hydrodynamic processes in cavities and channels of vacuum gripping devices operating in air, water and mixed media. Transient processes were obtained that occur in the cavities of the gripping devices from the moment the vacuum generator is powered up to the moment of the steady-state vacuum level.

Keywords: vacuum gripping devices, vacuum generator, transients, mobile vertical movement robot, experimental stand.

Введение

В Институте проблем механики РАН, в лаборатории робототехники и мехатроники, долгие

годы разрабатываются мобильные роботы, способные перемещаться по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям (рис. 1).



Рис. 1. Мобильный робот вертикального перемещения на вертикальной поверхности нефтехранилища

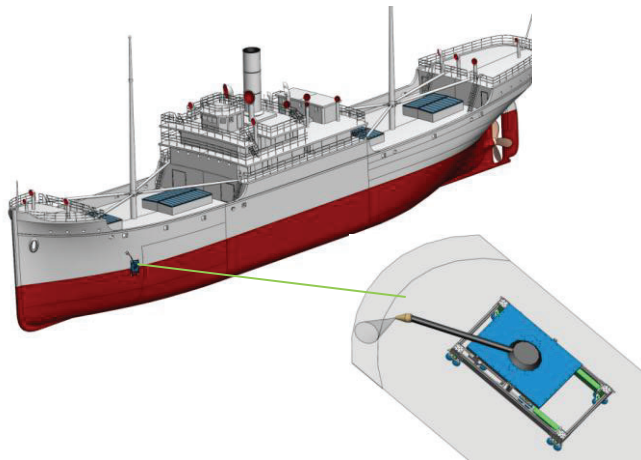


Рис. 2. Робототехнический комплекс вертикального перемещения выполняет операции по очистке корпуса судна

В основном разработанные робототехнические системы функционировали в воздушной среде [1–2], однако в настоящее время возникла необходимость расширения областей применимости роботов вертикального перемещения за счет использования их в водной среде и на границе раздела «воздух – жидкость» [3–8]. Так, в лаборатории ведется разработка мобильных роботов, предназначенных для обслуживания корпусов судов (рис. 2).

В качестве вакуумных захватных устройств для удержания робота на поверхности перемещения используются присоски, а для генерации разрежения под ними – либо воздушные эжекторы, либо мембранный насос с пневматическим приводом. Оба способа генерации вакуума имеют как достоинства, так и недостатки. Так, воздушные эжекторы имеют большую эффективность в воздушной среде, а в водной их быстродействие падает в несколько раз. В связи с этим были необходимы исследования, способные выявить особенности переходных процессов до момента установившегося уровня разрежения в полостях вакуумных захватных устройств робота и режимы работы эжектора, которые смогли бы компенсировать падение скорости генерации разрежения с помощью воздушного эжектора.

1. Разработка стенда для исследований газодинамических и гидродинамических процессов в полостях и каналах вакуумных захватных устройств

Разработка стенда была необходима для проведения исследований по верификации промышленно выпускаемых генераторов вакуума эжекторного типа с известными функциональными характеристиками и сравнения номинальных параметров с реальными данными, получаемыми при их использовании в вакуумных захватных устройствах.

На рис. 3 изображено схематичное представление организации проведения экспериментальных исследований динамики процессов, происходящих в вакуумируемой области присоски при различных начальных условиях при присасывании к стенке емкости. Начальные условия для каждой серии экспериментов определялись с учетом положения присоски относительно уровня воды.

Первая серия испытаний проводилась в воздухе для определения референсных значений параметров переходных процессов. Варьировались параметры входного давления, изменяемого регулятором.

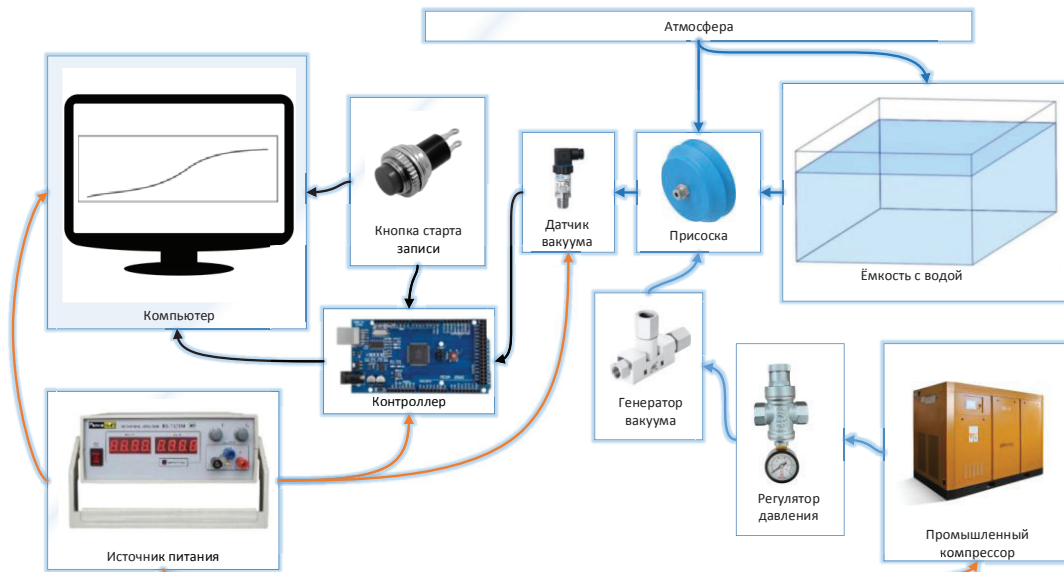


Рис. 3. Общая схема организации эксперимента

Следующая группа исследований предполагала нахождение половины присоски в воде. Проверялась гипотеза о наличии высокочастотных колебаний уровня вакуума в вакуумируемой области вследствие истечения крупных фракций жидкости в газе через выходное сопло с одновременным эффектом запирания эжектора по причине динамического изменения сечения этого сопла ввиду гидрофильности материала.

Последняя группа исследований была направлена на изучение динамики истечения воды из вакуумируемой области присоски при полном погружении присоски в воду. При этом также наблюдались высокочастотные колебания уровня вакуума вследствие попадания рабочего тела в камеру смешения в откачиваемую жидкость и перемешивания двух фаз в сопле истечения.

2. Обработка полученных на стенде экспериментальных значений параметров газодинамических и гидродинамических процессов в вакуумном захватном устройстве

В результате экспериментальных исследований были обнаружены переходные характеристики изменения уровня разрежения в вакуумируемой области от времени. Для создания разрежения использовались два генератора вакуума: эжектор VN-14-H, оптимизированный для получения высокого вакуума при низких скоростях всасывания, и эжектор VN-14-L, способный обеспечить очень быстрый эффект вакуумирования при относительно низком уровне вакуума. Данные по этим эжекторам были взяты с сайта производителя и представлены на рис. 4.

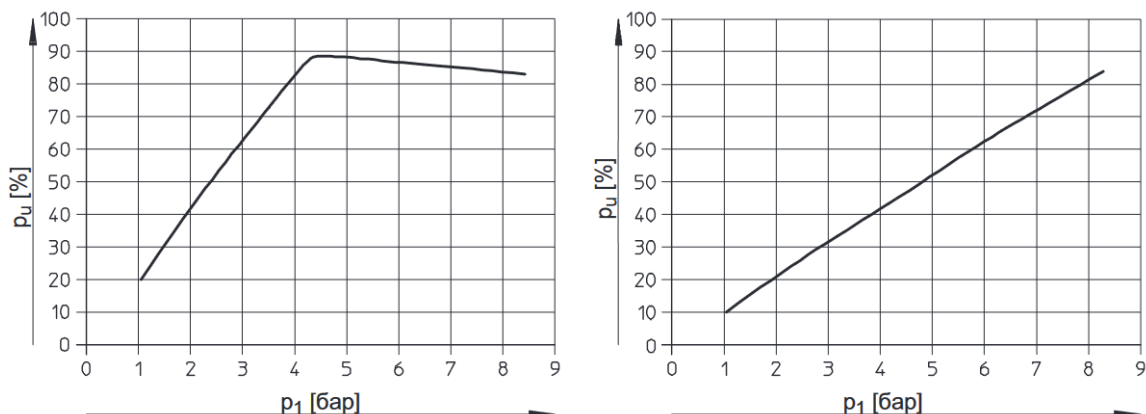


Рис. 4. Зависимости уровня разрежения P_u от рабочего давления P_1 (слева – эжектор типа VN-14-H; справа – эжектор типа VN-14-L)

В процессе проведения серий экспериментов варьировался уровень входного давления рабочего тела. Первая серия исследований проводилась при нахождении присоски в воздушной среде. Эта серия была направлена на верификацию данных производителя для текущей связки присоски и эжектора в условиях рабочего режима, для которого они были разработаны. На рис. 5 изображены результаты проведенной серии экспериментов для эжектора VN-14-H при давлении питания (входном давлении) в 2, 4 и 6 атмосфер.

Как видно из рис. 5, при превышении входного давления в 4,5 атмосферы на воздухе данный генератор вакуума должен терять эффективность ввиду эффекта запирания. В эксперименте было учтено наличие выходного канала, имитирующего конструктивные особенности присоски для работы в переменных средах, которые заключаются в удлиненном канале выхлопа эжектора. Вследствие этого уровень вакуума в вакуумном захватном устройстве оказался меньше, чем заявленный производителем.

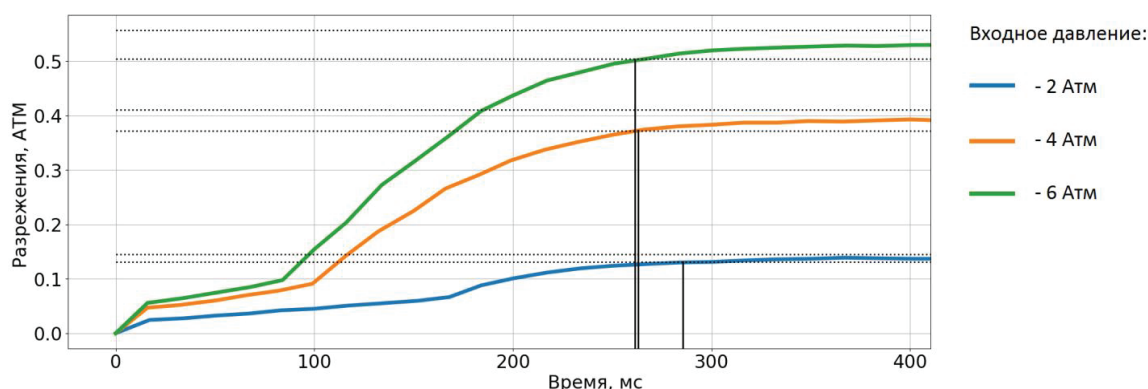


Рис. 5. Результаты первой серии экспериментов с генератором вакуума VN-14-H

Время переходного процесса, определяемое моментом попадания уровня разрежения в 5%-ю трубку точности относительно установившегося значения, для эксперимента с входным давлением в 2 атмосферы составляло 288 мс, в то время как увеличение входного давления до 4 и 6 атмосфер снижало это значение до 269 и 265 мс, соответственно. С момента подачи давления на вход генератора вакуума до некоторого времени, определяемого уровнем входного давления до наступления установившегося режима, можно увидеть небольшое проседание уровня разрежения, что объясняется процессами в трубках, соединяющих вакуумную камеру эжектора и вакуумируемую область в присоске.

В целом полученные результаты коррелируют с заявленными данными производителем.

Следующая серия экспериментов была проведена в нестандартной для данной конструкции рабочей среде, в которой уже присутствовала вода. Присоска была наполовину погружена в воду. При этом вода также присутствовала в камере вакуумирования присоски, доходя до центра отверстия для подачи вакуума в присоску. В данном эксперименте происходил забор водовоздушной смеси посредством работы эжектора VN-14-H. При подаче давления на вход генератора вакуума на выходе происходил выброс водовоздушной смеси. Динамика происходящих в камере вакуумирования процессов изображена на рис. 6.

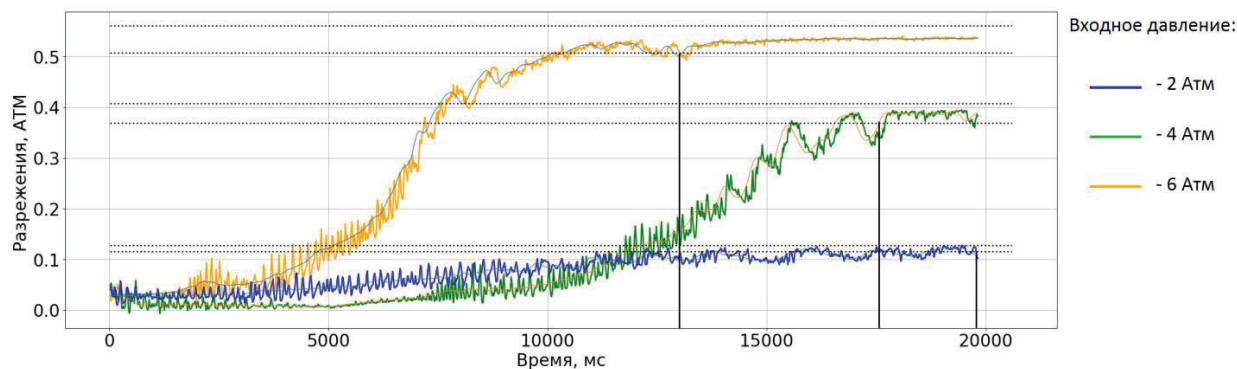


Рис. 6. Результаты серии экспериментов с эжектором VN-14-H на границе сред

В данном эксперименте наблюдался эффект возникновения высокочастотных колебаний. Этот эффект можно объяснить появлением капель воды в выпускном канале эжектора, которые, касаясь стенок канала, прилипают к нему и препятствуют движению основной массы водовоздушной смеси, образуя сужение канала более плотным веществом, чем воздух. При этом основная масса водовоздушной смеси выталкивается скопившиеся на стенках канала капли, очищая тем самым канал. Это происходит периодически, что и сказывается на эффекте колебаний разрежения. Видно, что в данном эксперименте существенно повышено время переходных процессов, что можно объяснить повышением плотности исходящего потока. Можно заметить, что при высоком давлении питания колебания прекращаются при достижении установившегося режима, что можно объяснить просушкой канала. Чем быстрее произойдет экстракция жидкости из вакуумируемой полости, тем быстрее начнется стадия просушки канала и дальнейший переход к установившемуся режиму работы вакуумного захватного устройства.

Необходимо дополнительно отметить, что в установившемся режиме вода еще оставалась в камере вакуумирования, но ее уровень был ниже заборного отверстия канала экстракции, и она не попадала в область смешивания. Отсюда можно сделать вывод, что установившийся режим наступит тем быстрее, чем быстрее

произойдет извлечение необходимого объема жидкости из камеры вакуумирования, чему может способствовать инжектирование воздуха в вакуумную полость перед присасыванием или силовое воздействие с внешней стороны на присоску для создания избыточного давления, способствующего быстрому извлечению необходимого объема жидкости.

Следующая серия экспериментов с генератором вакуума VN-14-H и присоской проводилась полностью в водной среде. В данном случае, в связи с тем, что через экстракционное отверстие в вакуумируемой области выходит только вода, усредненный график переходного процесса выглядит более гладко. Однако на выходе эжектора все равно образуется водовоздушная смесь так как в камере смешения встречаются две фазы: рабочее тело – воздух – и экстрагируемая жидкость. Поэтому также можно наблюдать эффект колебаний уровня вакуума. При этом есть предположение о возникновении эффекта кавитации (вскипание жидкости с выделением из нее растворенного воздуха) вследствие резкого падения давления в камере вакуумирования. Как только получившийся объем воздуха доходит до экстракционного отверстия камеры вакуумирования, происходит резкий выброс воздушной смеси через выпускной канал эжектора. Этот эффект четко прослеживается при высоком уровне давления питания и виден на рис. 7.

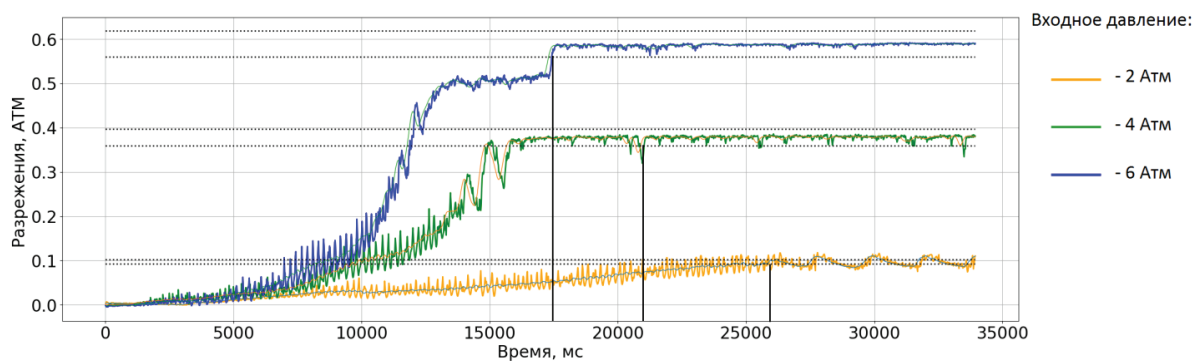


Рис. 7. Результаты серии экспериментов с эжектором VN-14-H в воде

Ввиду увеличения общего объема экстрагируемой жидкости время переходного процесса установления необходимого уровня вакуума также увеличивается. При малом давлении питания в установившемся режиме выходит тот объем воздуха, что питает эжектор. При этом в конце выхлопного канала в воде периодически образуются и схлопываются пузырьки газа, что приводит к колебаниям давления на

выходе. Этот эффект также виден на рис. 7.

Аналогичные серии экспериментов были проведены с генератором вакуума типа VN-14-L (рис. 8). Его особенностью является увеличенный диаметр выходного канала, который позволяет увеличить всасывающую способность эжектора. Однако при этом наблюдается снижение общего уровня разрежения, создаваемого при аналогичных уровнях питающего давления рабочего тела.

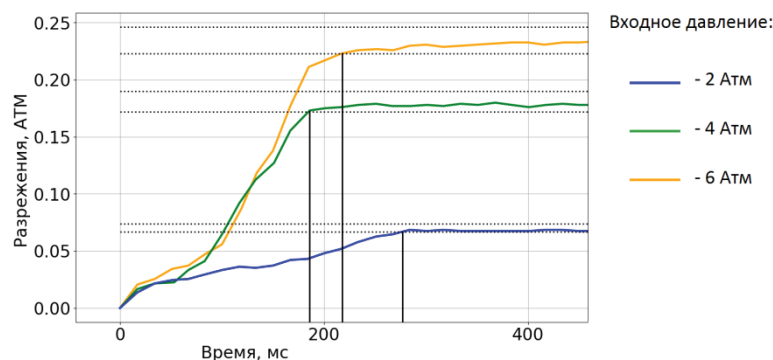


Рис. 8. Результаты первой серии экспериментов с генератором вакуума VN-14-L в воздухе

Данная серия экспериментов также подтверждает заявленные производителем рабочие характеристики генератора вакуума в воздухе. Работа экспериментального стенда в воздухе позволяет получить необходимый уровень ва-

куума при давлении питания в 2, 4 и 6 атмосфер за 287, 186 и 218 мс. Ввиду отсутствия жидкости в каналах системы колебательные эффекты не наблюдаются.

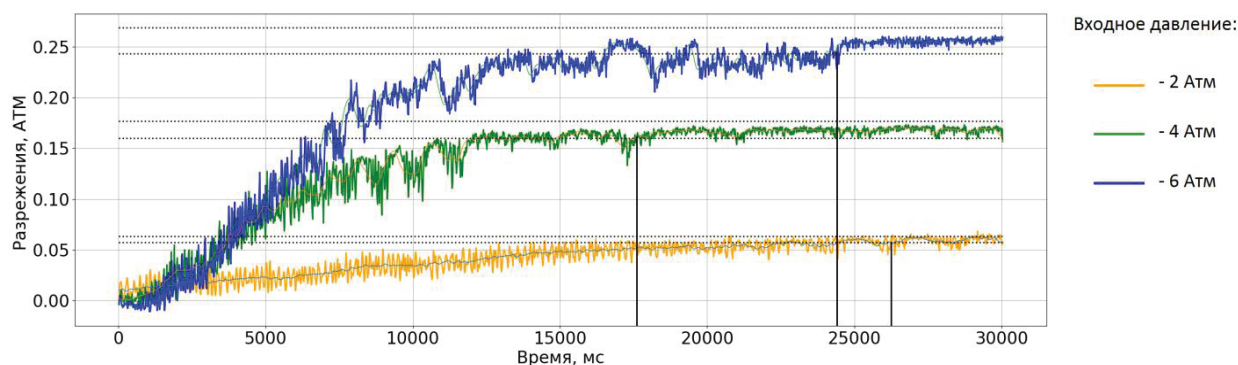


Рис. 9. Результаты серии экспериментов с эжектором VN-14-L на границе сред

Экспериментальные исследования с эжектором VN-14-L на границе сред показали схожую динамику изменения уровня вакуума в камере вакуумирования по сравнению с эжектором VN-14-H с тенденцией к увеличению времени переходных процессов и увеличению

амплитуды колебаний (рис. 9). Это можно связать с увеличением объема жидких фракций в водовоздушной смеси. Для более эффективного протекания процесса можно предложить дополнительно дробить данные фракции на выходе из эжектора с помощью ультразвука.

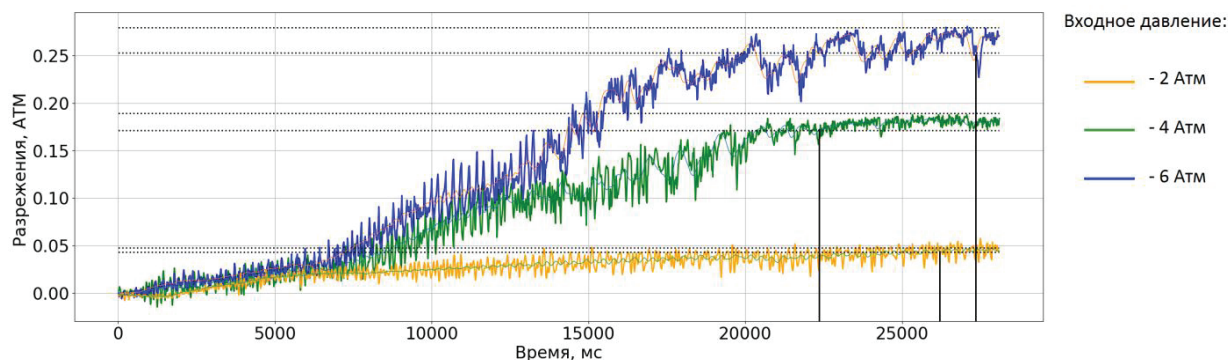


Рис. 10. Результаты серии экспериментов с эжектором VN-14-L в воде

В водной среде эжектор VN-14-L показывает результаты, изображенные на рис. 10. Здесь

видно, что данный тип генератора вакуума работает без существенных скачков в изменении

уровня разрежения благодаря более широкому каналу на выходе. Также можно заметить увеличенное время переходного процесса по сравнению с аналогичным экспериментом, проведенным с эжектором VN-14-Н. Эти эффекты объясняются меньшим уровнем генерируемого разрежения.

Заключение

По результатам анализа полученных переходных характеристик можно сделать следующие выводы. Существующие конструкции промышленно выпускаемых генераторов вакуума эжекторного типа существенно теряют свою производительность в водной среде и на границе сред «воздух – вода». Для повышения эффективности использования подобных генераторов вакуума без конструктивных изменений в водовоздушной и водной средах необходимо дополнительно использовать адаптивные алгоритмы управления. Подобные алгоритмы должны обеспечить вытеснение жидкости из вакуумируемой полости захватного устройства путем инъецирования рабочего тела непосредственно перед контактом захватного устройства с поверхностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адаптивные захватные устройства мобильных роботов с миниатюрными эжекторами / В. Г. Градецкий, М. М. Князьков, Е. А. Семенов, А. Н. Суханов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17. – № 3. – С. 172–177.
2. Управляемое формирование вакуума в устройствах сцепления с поверхностями при движении мобильных роботов с аэродинамическим прижимом / В. Г. Градецкий, М. М. Князьков, Л. Н. Кравчук, А. А. Крюкова, Е. А. Семенов, А. Н. Суханов, В. Г. Чашухин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – Т. 18. – № 7. – С. 447–452.
3. Адаптация технологического оборудования для использования на мобильном робототехническом комплексе вертикального перемещения (МРК), спроектированного для работы на вертикальных и горизонтальных поверхностях нефте- и газохранилищ / И. Л. Ермолов, М. М. Князьков, Е. А. Семенов, А. Н. Суханов // Станкоинструмент. – 2022. – № 3 (28). – С. 58–64.
4. Hydrodynamic design of an underwater hull cleaning robot and its evaluation / Man Hyung Lee, Yu Dark Park, Hyung Gyu Park et. all // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2012, # 4, p.p. 335–352, DOI: 10.3744/JNAOE.2012.4.4.335.
5. Underwater Robotics: Surface Cleaning Technics, Adhesion and Locomotion Systems / Houssam Albitar, Kinan Dandan, Anani Ananiev and Ivan Kalaykov // International Journal of Advanced Robotic Systems, 2016, <https://doi.org/10.5772/62060>.
6. Design and Control of Underwater Wall Ranging Robot for Inspection of Nuclear Reactor / Y. S. Park, G. Y. Park, J. Yoon, B. J. Lee, W. Z. Oh // In: Zelinsky A. (eds) Field and Service Robotics. Springer, London, 1998. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1273-0_38.
7. Динамические процессы в вакуумных контактных устройствах роботов вертикального перемещения в водной среде / В. Г. Градецкий, М. М. Князьков, Е. А. Семенов, А. Н. Суханов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20. – № 7. – С. 417–421.
8. Particularities of Wall Climbing Robot Motion on Underwater Environments / V. G. Gradetsky, M. M. Knyazkov, E. A. Semenov, A. N. Sukhanov, V. G. Chashchukhin // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – Т. 19. – № 9. – С. 608–611.