

## Разработка и исследование магнитной платформы роботизированной системы для диагностики и очистки внутренних стенок резервуаров

*А.Д. Каменских, Д.М.Ласточкин, Д.В. Костромин*

*Поволжский государственный технический университет, Йошкар-Ола*

**Аннотация:** В статье разрабатывается и исследуется мобильная магнитная платформа для автономного движения по вертикальной внутренней поверхности стенки стального резервуара для хранения нефтепродуктов. Разработанная магнитная платформа на базе системы Arduino служит для транспортировки сменного диагностического и очистного технологического оборудования, при имитации работы последнего и проведены экспериментальные исследования. В ходе экспериментальных исследований определена масса максимального статического нагружения платформы при работе очистного оборудования. Проведен регрессионный анализ результатов экспериментальных исследований, который позволил определить связь между массой дополнительного груза от давления в системе пульверизатора. Проведены хронометражные наблюдения движения магнитной платформы с имитацией работы очистного устройства, позволяющие определить среднюю рабочую скорость движения разрабатываемого робототехнического комплекса.

**Ключевые слова:** магнитная платформа, определение устойчивости, диагностика, очистка, резервуары, роботизированная система, хранение нефти

### Введение

Вертикальные стальные резервуары большого объема несмотря на опыт их эксплуатации являются наиболее опасными производственными объектами нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (СА-03-008-08) [1-3]. Поэтому эти сооружения должны находиться в исправном состоянии весь период эксплуатации.

В процессе эксплуатации резервуары подвергаются воздействию как внутренних, так и внешних факторов, в результате которых могут появляться различные дефекты (РД 03-421-01) [3-5]. Дефектом резервуара считается любое отклонение от требований нормативной документации: формы, швов, деталей, элементов, материала [4-5]. Дефекты снижают эксплуатационную надежность резервуаров, поэтому необходимо периодически организовывать их техническое диагностирование, направленное на своевременное выявление дефектов (РД 08-95-95, РД-23.020.00-КТН-271-10).

---

Диагностика резервуара включает комплекс мероприятий по техническому обследованию, дефектоскопии и обработке полученной информации, составлению заключения о техническом состоянии резервуара и выдаче рекомендаций по дальнейшему его использованию [1, 6].

В ходе эксплуатации каждый резервуар должен подвергаться частичной или полной диагностике с учетом его технического состояния, условий и режимов эксплуатации [1, 4].

Частичная диагностика может проводиться без вывода резервуара из эксплуатации.

Для проведения полной диагностики исследуемый резервуар должен быть очищен и дегазирован до санитарных норм. Это ответственный и важный этап, который имеет определенный уровень опасности и требует значительных трудозатрат.

Согласно источникам [4,5] для контроля металла стенки и днища вертикальных резервуаров рекомендуется применение методов:

- при частичной диагностике – акустикоэмиссионный, визуальный, измерительный, ультразвуковой;
- при полной диагностике – визуальный, измерительный, ультразвуковой, магнитный и др.

Наиболее распространенным методом диагностического обследования стенки и днища вертикальных резервуаров является ультразвуковой контроль [6]. Но недостатками ультразвукового метода диагностики являются невозможность контроля 100% поверхности резервуара и необходимость обязательного снятия защитного изоляционного покрытия независимо от его состояния. Это все говорит о том, что ультразвуковым методом проводится контроль только в дискретных точках, а не 100% поверхности.

Разумеется, при этих обстоятельствах высокая вероятность наличия пропущенных дефектов. К тому же существующие объемы работы по

---

диагностированию резервуаров нефти и нефтепродуктов заставляют задуматься о технико-экономической эффективности проведения данных работ.

Данные причины обуславливают необходимость разработки и применения средств и методов для исследования внутренней поверхности стенок и днища резервуара в автономном режиме без непосредственного присутствия человека внутри резервуара. В этом вопросе могут помочь новые средства диагностики с использованием современных роботизированных средств [7-9].

Но если системы для диагностики днища резервуара уже известны и внедряются [10-12], то исследования роботизированных систем для диагностирования внутренней поверхности стенок резервуара требуют более детального изучения.

Для проведения диагностики внутренних стенок вертикального резервуара большого объема предлагается использовать комплекс мобильного роботизированного аппарата и системы удаленного управления.

Предлагаемый мобильный роботизированный аппарат представляет собой взрывобезопасное средство доставки, на котором устанавливается диагностическое оборудование.

Движение по стенкам стального резервуара должно осуществляться за счет использования магнитных сил. Ориентация аппарата внутри резервуара предлагается за счет программного управления и контроля визирным (дистанционным) управлением человеком-оператором.

Доставка робота внутрь исследуемого резервуара осуществляется при помощи тросов.

Преимущества роботизированной системы для диагностирования внутренней поверхности стенок резервуара:

- Безопасность - использование робота исключает вмешательство человека;

- Скорость - режим работы роботизированной установки - 24/7, что значительно сокращает сроки полной диагностики;
- Эффективность - возможность модульной замены технологического оборудования.

### **Разработка конструкции**

Из-за сложности и большого объема работ весь проект по разработке мобильной роботизированной системы для диагностики стенок вертикального резервуара разбит на несколько этапов работы.

В рамках первого этапа прорабатывался вопрос разработки мобильной платформы для надежного перемещения по вертикальным поверхностям стальных резервуаров за счет магнитной силы притяжения.

В качестве основного диагностического оборудования предлагается использовать ультразвуковой сканер.

Но так как технология работы ультразвукового сканера предполагает очистку от загрязнений внутренней поверхности элементов резервуара (РД 08-95-95), подлежащие техническому диагностированию, то помимо диагностического оборудования мобильный роботизированный аппарат должен включать очистное устройство. Качество подготовки поверхностей определяется требованиями применяемого метода контроля.

Из-за малогабаритных параметров разрабатываемого роботизированного аппарата на данном этапе работ диагностическое и очистное оборудования предлагается использовать сменными.

Для разработки магнитной платформы будущей робототехнической системы диагностики стенок вертикального резервуара были обозначены следующие требования:

- простота конструкции и доступность комплектующих;
  - надежное вертикальное перемещение вдоль стальных стенок внутренней поверхности резервуара за счет магнитных сил притяжения;
-

- наличие места на магнитной платформе для установки технологического оборудования;

- возможность удаленного управления через систему Андроид.

Для проверки основных технических требований магнитную роботизированную платформу было решено построить на базе простой, бюджетной и распространенной системы Arduino [13].

Для простоты конструкции мобильная платформа собрана из минимально необходимого числа комплектующих, достаточных для проведения намеченных экспериментальных исследований.

База платформы состоит из пластикового основания - 1, на котором установлены мотор-редукторы - 2 (MTR-GEAR-CH1-48), на концах которых установлены колеса - 3 с прикрепленными по кругу постоянными магнитами. Для управления роботом использовался Контроллер - 4 (Arduino Uno на основе чипа ATmega328). Для управления мотор-редукторами применили модуль драйвера двигателей - 5 (L298N). Электропитание осуществлялось от батареек - 6. Для определения расстояния до объекта использовался ультразвуковой датчик - 7 (HC SR04).

Общий вид прототипа магнитной платформы для диагностики стенок вертикального резервуара представлен на рисунке 1.

### **Экспериментальные исследования**

Целью проведения экспериментальных исследований является определение способностей магнитного удерживания мобильной платформы при работе технологического оборудования на вертикальной металлической поверхности.

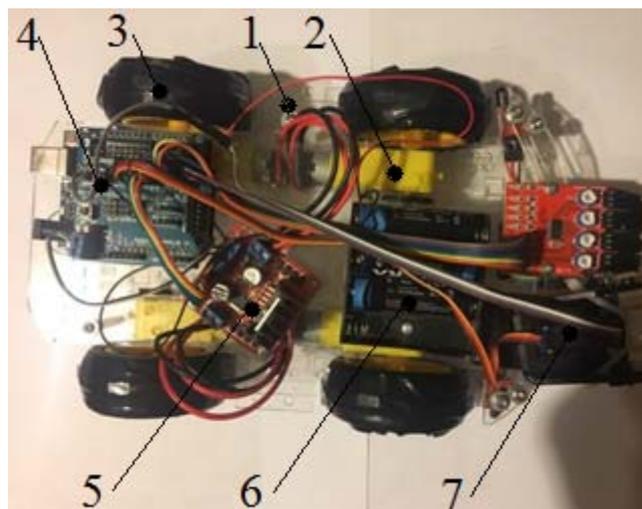


Рис. 1 - Общий вид прототипа мобильной магнитной платформы

Для повторения формы стенок резервуара в качестве испытываемой поверхности был выбран металлический лист размерами 1250 на 1500 мм, толщиной 3 мм и изготовленный из стали 3. Лист устанавливался вертикально ( $90^{\circ}$  к поверхности земли), как показано на рисунке 2.

В рамках эксперимента проводилось три исследования:

1. Определение массы максимального статического нагружения магнитной платформы.
2. Проверка удерживающих свойств платформы и скорости его передвижения при имитации работы очистного оборудования.
3. Определение массы максимального нагружения платформы при работе очистного оборудования.

Суть проведения первого экспериментального исследования заключалась в определении массы груза, при котором произойдет отрыв магнитной платформы от вертикальной поверхности металлического листа.

Масса магнитной платформы без технологического оборудования составила  $M_{пл} = 0,717$  кг.

Проведение эксперимента проводилось по следующей последовательности: установленную в вертикальной плоскости магнитную

платформу постепенно нагружали грузом до тех пор, пока не происходил отрыв платформы от поверхности листа. Первоначальный шаг нагружения грузом был 0,1 кг с последующим уточнением массы до 0,01 кг.

В результате общая масса платформы и максимального статического нагружения составила  $M_{ст} = 1,627$  кг.



Рис. 2 - Магнитная платформа на металлическом листе

В рамках второго экспериментального исследования проводились хронометражные наблюдения передвижения магнитной платформы с имитацией работы очистного технологического оборудования.

Во время имитации работы очистного устройства роботизированную платформу нагружали работой технологического оборудования, в качестве которого использовался пульверизатор марки W-300WB, который крепился на специальный каркас.

Работой пульверизатора имитировался процесс очистки от загрязнений внутренней поверхности резервуара перед проведением диагностики.

Общая масса магнитной платформы с установленным технологическим оборудованием составила  $M_{общ} = 1,345$  кг, что удовлетворяет условиям статического нагружения из первого этапа  $M_{общ} \leq M_{ст}$ .

Во время эксперимента к пульверизатору был подведен шланг с подачей жидкости и воздуха от компрессора. Пульверизатор подавал на поверхность жидкость под заданным давлением  $P=4$  атм.

Магнитная платформа с подключенным пульверизатором показана на рисунке 3.



Рис. 3 - Схема проведения эксперимента

При проведении второго экспериментального исследования измеряли время прохождения магнитной платформы по вертикальной поверхности листа ( $L=1,25$  м) при разных направлениях движения и давлениях в системе технологического оборудования.

В итоге получили значения среднего времени движения платформы: вверх - 16.1 с, вниз - 14.9 с, по горизонтали - 15,3 с.

Итоговая средняя скорость, которую можно взять для предварительного расчета производительности разрабатываемого робототехнического комплекса составляет - 0,0812 м/с

В рамках третьего экспериментального исследования определялась величина массы максимального нагружения платформы при изменяющемся давлении очистного оборудования.

Проведение эксперимента проводилось по методике первого исследования с добавлением нагрузки работы пульверизатора, до тех пор пока не происходил отрыв платформы от поверхности листа. Давление изменяли от 0,5 до 6 атм, с шагом 0,5 атм.

Проведение третьего эксперимента показано на рисунке 4.



Рис. 4 - Проведение эксперимента по нагружению магнитной платформы при работе пульверизатора

В результате обработки данных экспериментальных исследований построили график зависимости давления от массы груза, при котором происходил отрыв платформы от вертикального листа (Рис.5).

По данным, полученным на графике, получили регрессионные уравнения зависимости массы груза от давления в системе пульверизатора:

$$M_{гр} = 0,0003 p^3 - 0.0068 p^2 + 0.0196 p + 02663 (R^2 = 0.99)$$

$p$ - давление жидкости в системе, атм.

Анализ общего вида регрессионного уравнения зависимости массы дополнительного груза от давления в системе пульверизатора показывает, что график имеет монотонно падающий, пологий характер и допустимую

погрешность. Изменение давления пульверизатора создает равномерное снижение удерживающей магнитной силы исследуемой платформы.

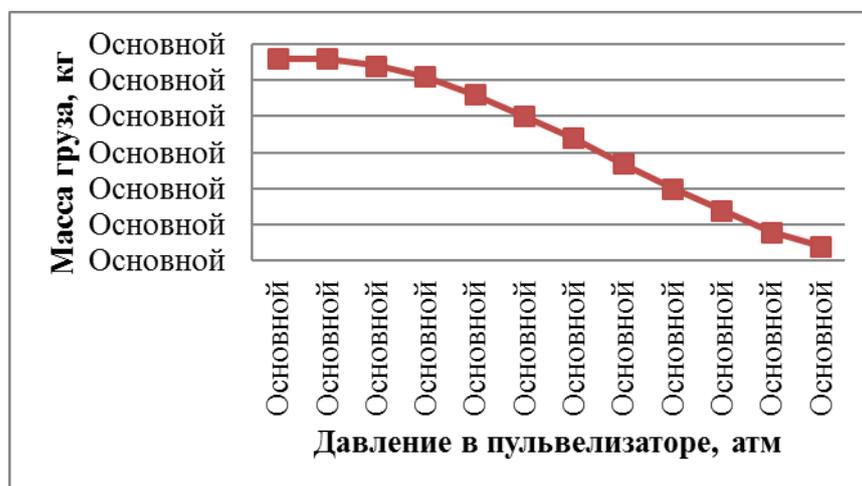


Рис. 5- График зависимости массы груза от давления в системе пульверизатора

### Выводы

1. Проведенные экспериментальные исследования определения массы максимального статического нагружения платформы при статическом нагружении и при работе очистного оборудования позволили получить фактические параметры устойчивости данной магнитной платформы на вертикальной поверхности.

2. В результате регрессионного анализа результатов экспериментальных исследований был установлен коэффициент аппроксимации, определяющий связь между массой дополнительного груза от давления в системе пульверизатора.

3. Хронометражные наблюдения движения магнитной платформы с имитацией работы очистного устройства позволили определить среднюю рабочую скорость движения разрабатываемого робототехнического комплекса.



4. Полученные экспериментальные зависимости можно будет использовать при разработке робототехнических систем для диагностирования внутренней поверхности стенок резервуара.

### Литература

1. Ханухов Х.М., Шайбаков Р.А., Абдрахманов Н.Х., Марков А.Г. Техническое диагностирование и анализ безопасности эксплуатации резервуаров вертикальных стальных для нефти и нефтепродуктов // Нефтегазовое дело. 2013. № 4. С. 243-257.
2. Кондрашова О.Г., Назарова О.М. Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров // Нефтегазовое дело. 2004. № 2. С. 21-29.
3. Митрофанов А.В., Ломанцов В.А. Способ поддержания безотказности и безопасности эксплуатации технологического оборудования // Безопасность труда в промышленности. 2016. № 6. С. 59-64.
4. API Standard 653. Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction. Manufacturing, Distribution and Marketing Department. Second Edition, December 1995. Addendum 1, December 1996. 114 p.
5. Гевлич Д.С., Гевлич С.О. Простая классификация дефектов трубопроводных систем на ОПО // Технадзор. 2012 No3. С.28—29.
6. Могильнер Л.Ю., Семин Е.Е. Оценка технического состояния вертикальных стальных резервуаров // В мире неразрушающего контроля. №1, 2009. С. 14-16.
7. Градецкий В.Г., Князьков М.М. Состояние и перспективы развития роботов вертикального перемещения для экстремальных сред // Extreme Robotics. 2013. Т. 1. № 1. С. 24-38.
8. Peters G., Pagano D., Liu D. K., Waldron K. A prototype climbing robot for inspection of complex ferrous structures In Proceedings of the 13th International Conference on Climbing and Walking Robots, CLAWAR, Nagoya, Japan, pp. 150-156 (2010).
9. Бобров В.Т., Сляднев А.М. Роботизированные системы неразрушающего контроля и технической диагностики промышленных объектов // Контроль. Диагностика. 2018. № 2. С. 16-31.
10. Опыт применения роботизированной установки по зачистке нефтешлама производства ГК "Миррико" // Нефть. Газ. Новации. 2018. № 8. С. 64-66.

11. Семин Е.Е., Тарасенко А.А. Использование программных комплексов при оценке технического состояния и проектирование ремонтов вертикальных стальных резервуаров // Трубопроводный транспорт: теория и практика. М., 2006. № 4. С. 84–87.

12. Сухоруков Д.В., Слесарев Д.А., Абакумов А.А., Поляхов М.Ю. Технология диагностики днищ и стенок стальных вертикальных резервуаров с применением сканирующих магнитных дефектоскопов высокого разрешения // Сфера нефтегаз. СПб., 2010. № 2. С. 162–167.

13. Соммер У. Программирование микроконтроллерных плат Arduino // СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 256 с.

### References

1. KHanukhov K.H.M., SHaybakov R.A., Abdrakhmanov N.KH., Markov A.G. Neftegazovoye delo. 2013. № 4. pp. 243-257.

2. Kondrashova O.G., Nazarova O.M. Neftegazovoye delo. 2004. № 2. pp. 21-29.

3. Mitrofanov A.V., Lomantsov V.A. Bezopasnost' truda v promyshlennosti. 2016. № 6. pp. 59-64.

4. API Standard 653. Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction. Manufacturing, Distribution and Marketing Department. Second Edition, December 1995. Addendum 1. December 1996. 114 p.

5. Gevlich D.S., Gevlich S.O. Tekhnadzor. 2012 No3. pp.28-29.

6. Mogil'ner L.YU, Semin E.E. V mire nerazrushayushchego kontrolya. №1, 2009. pp. 14-16.

7. Gradetskiy V.G., Knyaz'kov M.M. Extreme Robotics. 2013. Т. 1. №1. pp. 24-38.

8. Peters G., Pagano D., Liu D. K., Waldron K. Proceyedings of the 13th International Conference on Climbing and Walking Robots, CLAWAR, Nagoya, Japan, pp. 150-156 (2010).



9. Bobrov V.T., Slyadnev A.M. Kontrol'. Diagnostika. 2018. № 2. pp. 16-31.
10. Neft'. Gaz. Novatsii. 2018. № 8. pp. 64-66.
11. Semin E.E., Tarasenko A.A. Truboprovodnyy transport: teoriya i praktika. M., 2006. № 4. pp. 84–87.
12. Sukhorukov D.V., Slesarev D.A., Abakumov A.A., Polyakhov M.YU. Sfera neftegaz. SPb, 2010. № 2. pp. 162–167.
13. Sommer U. Programirovaniye mikrokontrollernykh plat Arduino [Arduino Microcontroller Board Programming]. SPb.: BKHV-Peterburg, 2012. 256 p.