

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОЧИСТКИ И РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

*Гусев Т.Д., Лакомкин А.А., Колесниченко Д.С., Кузнецов Е.В., Саковцев И.А.
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: гидроабразивная обработка, гидроструйная очистка, гидроабразивное резание, экспериментальный стенд, транспортная инфраструктура, очистка дорог от снега и льда.

Аннотация. В статье приведен анализ применяемых в строительстве, ремонте и содержании улично-дорожной инфраструктуры технологий резки и очистки материалов. Обращено внимание на преимущества и перспективы применения гидроабразивного навесного оборудования в данных сферах. Освещена проблема недостаточной изученности процессов изменения основных параметров оборудования при выполнении очистки и резания материалов, наиболее распространенных в дорожных и строительных конструкциях, несмотря на широкое распространение гидроабразивных технологий в строительстве и машиностроении. Рассмотрена конструкция стенда в целом и его основных узлов, принцип работы и основные регулируемые параметры, определяющие эффективность гидроабразивного воздействия. Обосновано внедрение шагового двигателя и программируемого блока управления для повышения точности и воспроизводимости результатов экспериментов. Приведены теоретически обоснованные формулы для расчета пневмомеханического транспортера, создаваемого для подачи и дозирования абразива. При составлении формул учитывалось влияние сил взаимодействия частиц с окружающей воздушной средой и конструктивными элементами устройства. Рассмотрены преимущества модульной конструкции стенда, обеспечивающие задел для модернизации. Приведены примеры возможных конструктивных решений при модернизации стенда, позволяющих проводить экспериментальные исследования по имитации процессов резания и бурения материалов различной прочности и очистки поверхностей от загрязнений. Предлагаемые технические решения обеспечивают возможность дальнейшего развития стенда для решения смежных задач.

STAND FOR RESEARCH OF HYDROABRASIVE PURIFICATION AND CUTTING OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE MATERIALS

*Gusev T.D., Lakomkin A.A., Kolesnichenko D.S., Kuznetsov E.V., Sakovtsev I.A.
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg*

Keywords: waterjet machining, waterjet cleaning, waterjet cutting, experimental bench, transport infrastructure, road cleaning from snow and ice.

Abstract. The article provides an analysis of cutting and cleaning technologies used in construction, repair and maintenance of road infrastructure. Attention is drawn to the advantages and prospects of using waterjet attachments in these areas. The problem of insufficient knowledge of the processes of changing the basic parameters of equipment during cleaning and cutting of materials most common in road and building structures is highlighted, despite the widespread use of waterjet technologies in construction and mechanical engineering. The design of the stand as a whole and its main components, the principle of operation and the main adjustable parameters determining the effectiveness of the waterjet action are considered. The introduction of a stepper motor and a programmable control unit is justified to improve the accuracy and reproducibility of experimental results. Theoretically justified formulas for calculating the pneumomechanical conveyor created for feeding and dosing the abrasive are given. When drawing up the formulas, the influence of the forces of interaction of particles with the surrounding air environment and the structural elements of the device was taken into account. The advantages of the modular design of the stand, providing a foundation for modernization, are considered. Examples of possible design solutions for the modernization of the stand are given, allowing experimental studies to simulate the processes of cutting and drilling materials of various strengths and cleaning surfaces from contamination. The proposed technical solutions provide an opportunity for further development of the stand to solve related tasks.

Введение

Гидроабразивные и гидроструйные технологии в настоящее время находят применение в промышленности, строительстве и горном деле. Высокоскоростные струи жидкости

позволяют эффективно воздействовать на различные материалы, при этом процесс характеризуется низким термическим воздействием на зону реза, высокой производительностью и экологической безопасностью [1-3]. Однако сейчас гидроабразивное оборудование преимущественно выпускается в виде стационарных станков, содержащих стол, на котором размещаются разрезаемые объекты. Создание навесного оборудования для гидроабразивной резки позволит расширить возможности применения для строительных и коммунальных машин.

При строительстве и ремонте улично-дорожной инфраструктуры для резания таких материалов как асфальтобетон и железобетон применяют установки для фрезерования и алмазной резки. Однако процесс фрезерования асфальтобетона является многофакторным и требует значительных энергозатрат, а его эффективность зависит от правильного подбора характеристик инструмента для фрезерования различных марок асфальтобетона [4].

В жилищно-коммунальном хозяйстве для содержания автомобильных дорог применяются различные типы коммунальных машин на грузовых и специальных шасси, а также ограниченная номенклатура навесного оборудования для тракторов и фронтальных погрузчиков (Рекомендации по технологии уборки проезжей части городских дорог с применением средств комплексной механизации: утв. АКХ им. Памфилова 01.01.1989: ввод в действие с 01.01.1989. – М., 1989. – 36 с.; ОДМ 218.2.018-2012 Методические рекомендации по определению необходимого парка дорожно-эксплуатационной техники для выполнения работ по содержанию автомобильных дорог при разработке проектов содержания автомобильных дорог: Утв. ФДА от 25.04.2012 г. №203-р. – М., 2012. – 83 с.). Однако специализированного оборудования, предназначенного для удаления уплотненных снежно-ледяных отложений, остающихся после воздействия на загрязненную поверхность дороги механическими способами, на данный момент не применяется [5].

Таким образом, создание навесного оборудования для гидроабразивного метода делает возможным более эффективное, по сравнению с существующими методами, воздействие на различные материалы для резания и очистки от загрязнений. Благодаря возможности регулировки параметров в широких диапазонах возможно очищать от загрязнений такие объекты улично-дорожной сети, как: металлические и бетонные ограждения, бордюры, столбы и мачты освещения. Тем же оборудованием после регулирования параметров можно производить резку природного камня, асфальто- и железобетона. Накопленные данные о применении гидроабразивного оборудования в промышленном производстве и строительстве могут быть использованы в рамках обоснования применения данной технологии в жилищно-коммунальном хозяйстве. Однако вопросы разработки и эксплуатации навесного оборудования коммунальных и строительных машин, использующего технологию гидроабразивной резки в сфере строительства, содержания и ремонта объектов транспортной инфраструктуры изучены недостаточно.

Особый интерес представляет исследование изменения основных параметров оборудования при выполнении очистки и резания материалов, наиболее распространенных в дорожных и строительных конструкциях, в контролируемых лабораторных условиях.

Универсальный экспериментальный стенд был спроектирован и построен для исследования параметров резания со следующими целями:

- 1) получения эмпирических коэффициентов математических моделей;
- 2) выявления механизма взаимодействия рабочего инструмента с рабочей средой;
- 3) определения влияния применяемого оборудования на базовое шасси, на котором оно установлено.

Для возможности решения данных задач конструкция стенда предусматривает моделирование применения навесного оборудования строительных и коммунальных машин в различных условиях. Моделирование проводится с помощью изменения основных технологических параметров гидроабразивного воздействия на контролируемые величины, при этом обеспечивается высокая воспроизводимость результатов.

Параметры, влияющие на эффективность гидроабразивной обработки

Процесс гидроабразивной очистки и резания определяется совокупностью параметров, которые оказывают существенное влияние на характер и интенсивность разрушения материала [6]. Разработанный стенд предусматривает возможность регулирования и измерения следующих основных параметров:

- давление воды на входе в рабочий орган, определяющее кинетическую энергию струи;
- геометрические параметры резака, включая диаметр и форму форсунки, размеры камеры смешивания и коллиматора;
- расход абразивного материала, регулируемый в широком диапазоне;
- расстояние от резака до обрабатываемой поверхности;
- скорость перемещения рабочего органа относительно образца;
- угол наклона резака и его азимутальное положение.

Комплексное изменение указанных параметров позволяет исследовать влияние каждого из них на эффективность очистки и глубину резания материалов различной прочности [7].

Конструкция и принцип работы экспериментального стенда

Экспериментальный стенд (рис. 1) состоит из нескольких основных и вспомогательных частей. Основные: рама стенда с рабочим органом (1), насос высокого давления (2), электронного блока управления (3). Вспомогательные: ёмкость с водой (4), климатическая камера (5).

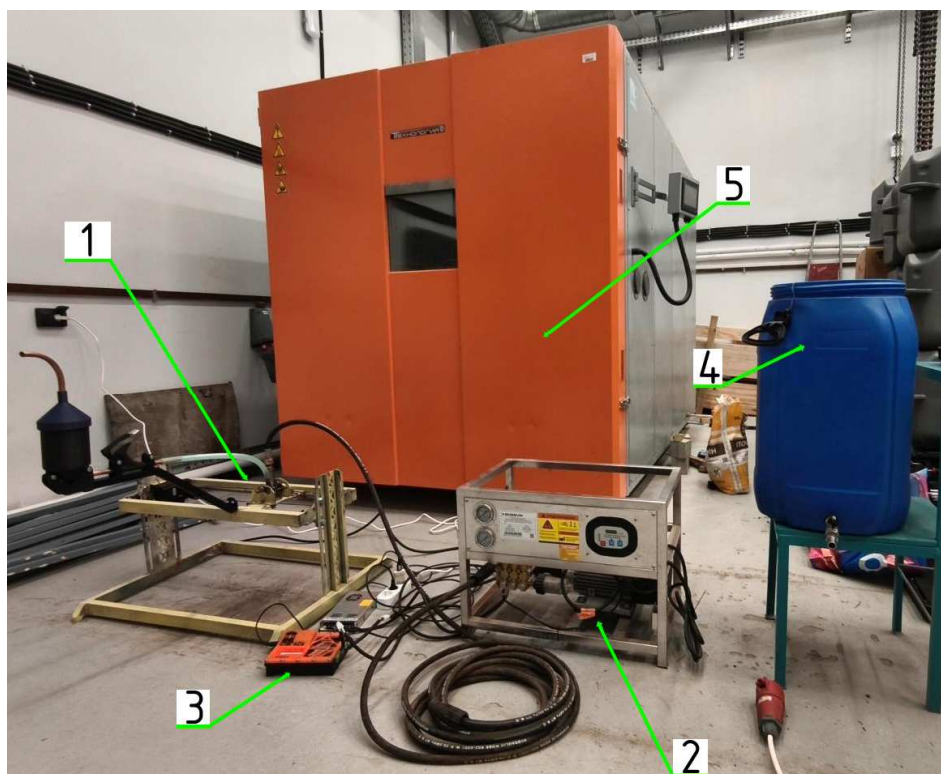


Рис. 1. Конструкция стенда

Рама экспериментального стенда выполнена в виде каркасной конструкции, обеспечивающей жёсткость и устойчивость при проведении опытов. Основными элементами рамы являются подвижная каретка с установленным рабочим органом, система направляющих и привод перемещения.

Подвижная каретка (рис. 2) перемещается по двум направляющим (1). В движение каретка приводится с помощью ремня GT2 (2) через систему шкивов (3) и шагового двигателя NEMA 23 (4), предназначенного для станков с ЧПУ. Блок управления (5) состоит из платы Arduino UNO, блока кнопок с дисплеем TM 1638 и драйвера шагового двигателя DM 542, которые собраны в корпусе, изготовленном при помощи 3D-печати. Движения каретки программируются заранее в среде разработки Arduino. При проведении эксперимента

выбранный режим активируется с блока управления. Данная автоматика необходима для экспериментов, где нет постоянного визуального контроля за движением каретки, или необходимо задать движение с различной скоростью. Также имеется обратная связь посредством отображения информации на дисплее. Базовая программа стенда состоит из 5 скоростей 5-37 мм/с и заданной дистанцией перемещения 140 мм, после завершения движения по которой, на дисплее отображается сообщение, и каретка возвращается на стартовую точку. Усилия на ремне достаточно, чтобы развивать тягу в 16 кг без пропуска шагов двигателя. Этот запас необходим для более точных результатов и исключения ошибок с пропуском шагов и торможением двигателя.

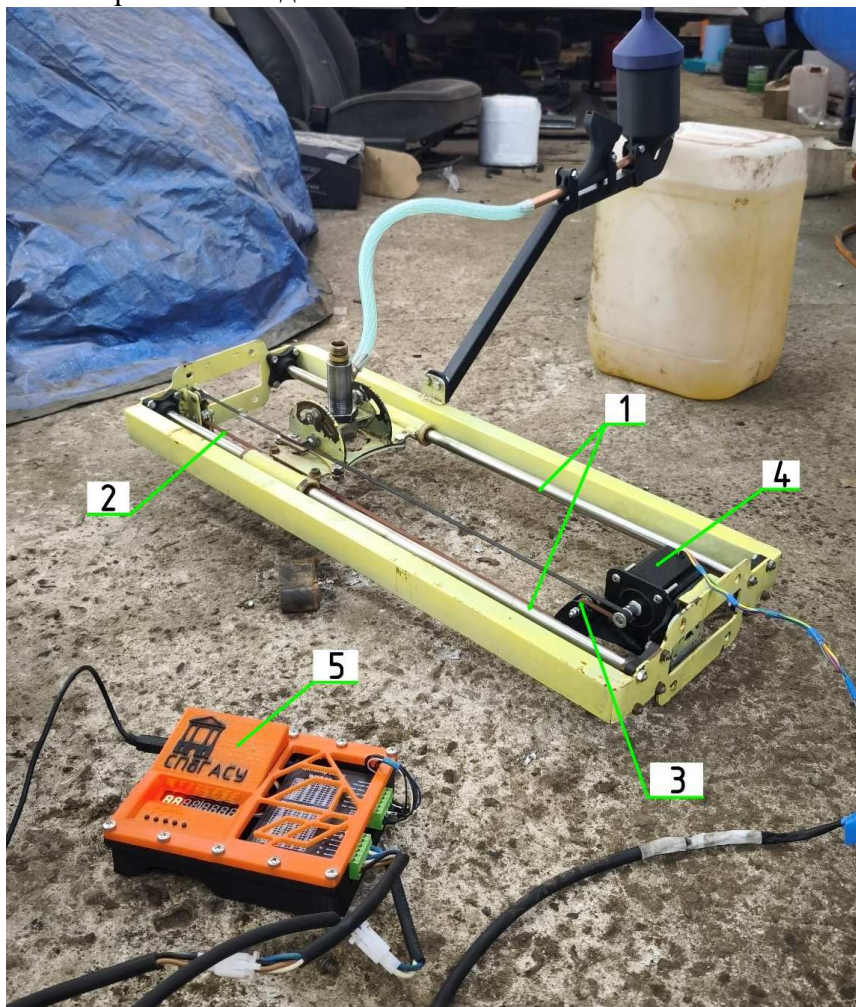


Рис. 2. Конструкция каретки с установленным рабочим органом

Кронштейн (рис. 3), на который устанавливается резак (1), позволяет изменять угол обработки от -50 до $+50$ градусов. Для изменения азимутального угла кронштейн резака установлен на подвижную каретку (2) с помощью болтов (3), установленных на углах квадратного основания (4).

Рабочим органом стенда является гидроструйный или гидроабразивный резак (рис. 4), изготовленный из стали. Он включает в себя корпус 2, в который впаиван штуцер из латуни для подачи абразива, штуцер установлен под углом в 60 градусов. Сверху в корпус устанавливается форсунка 1. Имеется возможность установки форсунок с различными диаметрами канала, что

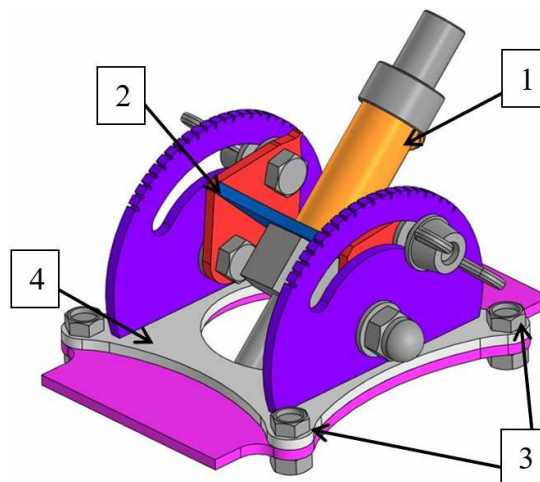


Рис. 3. Кронштейн резака

позволяет работать резаку в разных режимах. В нижнюю часть корпуса устанавливается коллиматор 5. Внутренний диаметр канала коллиматора может варьироваться, аналогично диаметру форсунки [8].

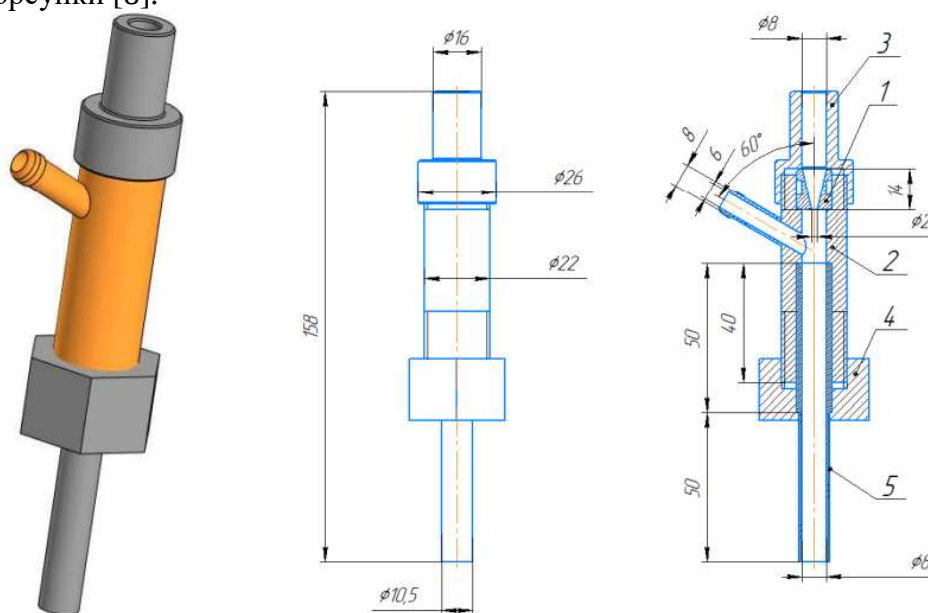


Рис. 4. Гидроабразивный резак: 1 – форсунка; 2 – корпус; 3 – штуцер для подачи воды; 4 – гайка коллиматора; 5 – коллиматор

Для подачи абразивного материала применяется пневмомеханический транспортер, содержащий спиральный гибкий шнек из стальной пружинной проволоки, проходящий через бункер с сыпучей смесью. Один конец шнека прикреплен через соединитель к выходному валу электродвигателя, другой конец помещается в штуцер резака. Гибкий шнек защищен гибкой трубкой.

Конструктивное исполнение пневмомеханического транспортера предусматривает совместную работу двух существующих систем питателей: механического шнека и пневмотранспорта [9-11]. Пневмотранспортирующий поток рассматривается как согласованное движение двух взаимодействующих сред: основной (взвесенесущей) – воздуха, и механической – частиц, которое может быть описано моделью усредненного движения множества абразивных частиц, для каждой из которых справедлива система уравнений:

$$\begin{cases} m \frac{du_1}{dt} = F_1, \\ m \frac{du_2}{dt} = F_2, \end{cases} \quad (1)$$

где u_1 , u_2 – компоненты скорости механических частиц в направлении параллельном и перпендикулярном оси потока соответственно, м/с; F_1 – составляющая внешней силы, действующей на механическую частицу в направлении параллельном оси потока, соответственно, Н; F_2 – составляющая внешней силы, действующей на механическую частицу в направлении перпендикулярном оси потока, соответственно, Н; m – масса механической частицы.

Тогда уравнения системы (1) можно записать следующим образом:

$$F_1 = m \frac{du_1}{dt} = 6\pi\mu_0 a(v_1 - u_1) + mg \sin \varphi; \quad (2)$$

$$F_2 = m \frac{du_2}{dt} = 6\pi\mu_0 a(v_2 - u_2) + k_c(v_1 - u_1) \frac{a\mu_0}{6\pi v_0^{1/2}} \left(\frac{dv_1}{dx_2} \right)^{1/2} - \frac{4}{3} \pi a^3 \frac{\partial P}{\partial x_2} mg \cos \alpha; \quad (3)$$

где v_1 , v_2 – компоненты скорости транспортирующего потока воздуха; P – давление в потоке воздуха, МПа; $k_c = 81,2$ – константа Сэфмэна (безразмерный коэффициент);

a – геометрический размер механической частицы, м; μ_e – динамическая кинематическая вязкость воздуха, Па·с; ν_e – кинематическая вязкость воздуха, м²/с; α – угол наклона образующей стенки транспортного канала к вертикальной оси; φ – угол наклона образующей винтовой поверхности шнека к горизонтальной оси.

Силы, действующие на частицу при взаимодействии со стенкой транспортного канала и шнеком, можно записать следующим образом:

$$m \frac{du_3}{dt} = F_3 = N_3 \sin \alpha + f_3 N_3 \cos \alpha - f_3 G \frac{u_3}{\sqrt{u_4^2 + u_3^2}}; \quad (4)$$

$$m \frac{du_4}{dt} = F_4 = N_4 \sin \alpha - f_4 N_4 \cos \varphi - f_4 G \frac{u_4}{\sqrt{u_4^2 + u_3^2}}; \quad (4)$$

где u_3, u_4 – компоненты скорости частицы абразива вдоль и перпендикулярно оси шнека, м/с; F_3 – составляющая силы со стороны винтовой поверхности шнека транспортного канала, Н; F_4 – составляющая силы со стороны винтовой поверхности стенок транспортного канала, Н; f_3 – коэффициент трения частицы о поверхность шнека; f_4 – коэффициент трения частицы о стенку транспортного канала.

Объединяя уравнения перемещения механических частиц в воздушном потоке и под действием винтовой поверхности шнека, а также, добавив эмпирические коэффициенты, учитывающие конструктивное исполнение шнека и канала транспортирования, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} F_1 = m \frac{du_1}{dt} = 6\pi\mu_e a(v_1 - u_1) + mg \sin \varphi; \\ F_2 = m \frac{du_2}{dt} = 6\pi\mu_e a(v_2 - u_2) + k_c(v_1 - u_1) \frac{a\mu_e}{6\pi\nu_e^{1/2}} \left(\frac{dv_1}{dx_2} \right)^{1/2} - \frac{4}{3}\pi a^3 \frac{\partial P}{\partial x_2} mg \cos \alpha; \\ F_3 = m \frac{du_3}{dt} = N_3 \sin \alpha + f_3 N_3 \cos \alpha - K_o K_r f_3 G \frac{u_3}{\sqrt{u_4^2 + u_3^2}}; \\ F_4 = m \frac{du_4}{dt} = N_4 \sin \alpha - f_4 N_4 \cos \varphi - K_o K_r f_4 G \frac{u_4}{\sqrt{u_4^2 + u_3^2}}, \end{cases} \quad (6)$$

где K_o и K_r – эмпирические коэффициенты сил осевой и радиальной соответственно [12].

Применение стенда в рамках моделирования работы навесного оборудования для гидроабразивного резания материалов

Разработанный стенд предназначен для использования в экспериментальных исследованиях взаимодействия навесного оборудования коммунальных и строительных машин с поверхностью различных конструкционных материалов, широко применяемых в объектах транспортной инфраструктуры, а также грязевых и снежно-ледяных отложений. Созданная экспериментальная установка позволяет изучать процессы разрушения материалов различной прочности, включая низкопрочные, среднепрочные и высокопрочные образцы.

Конструкция стенда и диапазоны регулируемых параметров обеспечивают возможность проведения планируемых экспериментальных исследований с варьированием давления струи, скорости перемещения резака, расхода абразива, а также расположения обрабатываемой поверхности. Получаемые экспериментальные данные могут быть использованы для установления функциональных зависимостей между технологическими параметрами и глубиной резания, а также для обоснования рациональных режимов обработки.

Возможность оснащения стенда дополнительным измерительным оборудованием, таким как токоизмерительные клещи, позволяет оценивать и обосновывать применение гидроабразивного оборудования на коммунальных машинах, с гибридными и электрическими силовыми установками. Токоизмерительные клещи закрепляются на раме насоса высокого давления и позволяют измерять изменение силы тока на фазах кабеля

питания, что позволяет обосновать зависимость давления, развиваемого стендом, от потребляемой 3-х фазным асинхронным мотором электрической мощности [13]. Также клещи могут быть размещены на электроприводе шнека в пневмомеханическом транспортере.

Перспективы развития стенда

Модульная архитектура экспериментального стенда позволяет рассматривать его как исследовательскую платформу с разнообразными сценариями использования.

– Замена струйного рабочего органа на альтернативные исполнительные модули расширяет область применения стенда, а установка дополнительного измерительного оборудования, такого как: токоизмерительные клещи, расходомеры и термометры, позволяет проводить различные многофакторные эксперименты.

– Конструкция стенда позволяет как горизонтальное, так и вертикальное размещение для моделирования очистки, резания и бурения расположенных вертикально конструкций.

– Раму с направляющими, подвижной кареткой и податчиком абразива возможно расположить на подвижной тележке, прицепе или бортовом автомобиле, имитирующем движения коммунальных машин для проведения испытаний вне помещения в условиях полигона при различных скоростях движения.

– Установка гидравлического исполнительного органа ударного или вибрационного действия позволит проводить исследования процессов локального уплотнения оснований через технологические окна в покрытии в рамках исследований процессов восстановления эксплуатационных характеристик дорожных конструкций.

Заключение

Применение навесного оборудования для гидроабразивной резки, установленного на строительные и коммунальные машины, позволит выполнять операции резания, бурения и очистки эффективнее, чем ряд используемого на данный момент навесного оборудования. Исследование изменения основных параметров оборудования при выполнении гидроабразивной резки является важной задачей, позволяющей установить функциональные зависимости при работе оборудования со средой. Разработанный универсальный экспериментальный стенд позволяет проводить комплексные исследования процессов гидроабразивной очистки и резания материалов транспортной инфраструктуры в контролируемых лабораторных условиях. При этом выполняются цели получения эмпирических коэффициентов математических моделей, выявления механизма взаимодействия рабочего инструмента с рабочей средой и определения влияния применяемого оборудования на базовое шасси. Конструкция установки обеспечивает широкие возможности регулирования технологических параметров и получения воспроизводимых экспериментальных данных. Модульный принцип конструкции стенда обеспечивает задел для дальнейшей модернизации, позволяющей проводить эксперименты с различными объектами рабочей среды в условиях полигона. Также задел позволяет адаптировать стенд для решения смежных научно-технических задач, связанных с эксплуатацией и ремонтом объектов транспортной и строительной инфраструктуры.

Список литературы

1. Коржов Е.Г. Некоторые особенности водоструйной обработки материалов waterjet-технология // Горный информационно-технический бюллетень. – 2006. – №3. – С. 373-387.
2. Латыпов Р.Р., Тергулов Н.Г., Харлов А.И. Некоторые сведения о гидрорезании материалов. – Уфа: Изд-во РИК УГАТУ, 1999. – 215 с.
3. Степанова Е.Ю., Кожус О.Г., Барсуков Г.В. Инновационные технологии резания сверхзвуковой струей жидкости: экономика, рынок, состояние и перспективы развития // Транспортное машиностроение. – 2017. – №1(54). – С. 243-253.
4. Фурманов Д.В., Лысаков Н.Э., Шамахов Л.М. Экспериментально-аналитическое обоснование процесса резания асфальтобетонных рабочих оборудованием дорожной фрезы // Вестник СибАДИ. – 2022. – №2(84). – С. 170-182.
5. Репин С.В., Пушкарев А.Е., Воронцов И.И., Виноградова Т.В., Абросимова А.А., Коротчук Д.О. Разработка новой машины для очистки дорог от снежно-ледяных образований // Строительные и дорожные машины. – 2022. – №4. – С. 33-37.

6. Тарасов В.А., Полухин А.Н. Оценка геометрических параметров формируемой поверхности при гидроабразивной обработке // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2012. – №1. – С. 107-116.
7. Очнев Э.Н., Вязовов С.А., Лазарев С.И. К вопросу организации многофакторного эксперимента // Вестник российских университетов. Математика. – 2004. – №2. – С. 292-293.
8. Боницкая Ольга Владимировна, Дудина Юлия Валерьевна Математическая модель определения параметров гидроабразивного резания // Эксперт: теория и практика. – 2021. – №4(13). – С. 37-41.
9. Родионов Г.А., Бухмиров В.В. Система пневмотранспорта как объект исследования // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2013. – №1(54). – С. 20-22.
10. Исаев Ю.М., Губейдуллин Х.Х., Семашкин Н.М., Гришин О.П. К вопросу о вертикальном перемещении сыпучего материала // Вестник Ульяновской ГСХА. – 2012. – №4(20). – С. 122-126.
11. Лялин Е.А., Трутнев М.А. Расчет рабочего объема спирально-винтового дозатора // Пермский аграрный вестник. – 2016. – №3. – С. 86-93.
12. Пушкарев А.Е., Саковцев И.А. Математическая модель движения механических частиц сыпучего материала в пневмомеханическом транспортере // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – №7. – С. 32-37.
13. Афанасьев А.Ю., Макаров В.Г. Математическая модель трехфазного асинхронного двигателя с учетом нелинейности магнитопровода и потерь в стали // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2011. – №9-10. – С. 118-129.

References

1. Korzhov E. G. Some features of waterjet processing of waterjet-technology materials // Mining information and technical bulletin. 2006, no. 3, pp. 373-387.
2. Latypov R.R., Teregulov N.G., Kharlov A.I. Some information about hydraulic cutting of materials. – Ufa: Publ. house of RIK UGATU, 1999. – 215 p.
3. Stepanova E. Yu., Kozhus O. G., Barsukov G. V. Innovative cutting technologies by supersonic liquid jet: economy, market, state and development prospects // Transport engineering. 2017, no. 1(54), pp. 243-253.
4. Furmanov D.V., Lysakov N.E., Shamakhov L.M. Experimental and analytical substantiation of the asphalt concrete cutting process by the working equipment of a road milling cutter // Bulletin of SibADI. 2022, no. 2(84), pp. 170-182.
5. Repin S.V., Pushkarev A.E., Vorontsov I.I., Vinogradova T.V., Abrosimova A.A., Korotchuk D.O. Development of a new machine for cleaning roads from snow and ice formations // Construction and road vehicles. 2022, no. 4, pp. 33-37.
6. Tarasov V. A., Polukhin A. N. Evaluation of the geometric parameters of the formed surface during waterjet treatment // Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser.: Mechanical Engineering. 2012, no. 1, pp. 107-116.
7. Ochnev E.N., Vyazov S.A., Lazarev S.I. On the organization of a multifactorial experiment // Bulletin of Russian Universities. Mathematics. 2004, no. 2, pp. 292-293.
8. Bonitskaya Olga Vladimirovna, Dudina Julia Valeryevna Mathematical model for determining the parameters of waterjet cutting // Expert: theory and practice. 2021, no. 4(13), pp. 37-41.
9. Rodionov G.A., Bukhmirov V.V. The pneumatic transport system as an object of research // Bulletin of Cherepovets State University. 2013, no. 1(54), pp. 20-22.
10. Isaev Yu.M., Gubeidullin Kh.K., Semashkin N.M., Grishin O.P. On the issue of vertical movement of bulk material // Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2012, no. 4(20), pp. 122-126.
11. Lyalin E.A., Trutnev M.A. Calculation of the working volume of a spiral-screw dispenser // Perm Agrarian Bulletin. 2016, no. 3, pp. 86-93.
12. Pushkarev A.E., Sakovtsev I.A. Mathematical model of motion of mechanical particles of bulk material in a pneumomechanical conveyor // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. 2025, no. 7, pp. 32-37.
13. Afanasyev A.Yu., Makarov V.G. Mathematical model of a three-phase asynchronous motor taking into account the nonlinearity of the magnetic circuit and losses in steel // News of the universities. Energy problems. 2011, no. 9-10, pp. 118-129.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Гусев Тимофей Дмитриевич – аспирант	Gusev Timofey Dmitrievich – postgraduate student
Лакомкин Андрей Анатольевич – аспирант	Lakomkin Andrey Anatolyevich – postgraduate student
Колесниченко Даниил Станиславович – аспирант	Kolesnichenko Daniil Stanislavovich – postgraduate student
Кузнецов Евгений Владимирович – аспирант	Kuznetsov Evgeny Vladimirovich – postgraduate student
Саковцев Иван Алексеевич – аспирант	Sakovtsev Ivan Alekseevich – postgraduate student
daniilkolessnichenko@yandex.ru	

Получена 11.02.2026