

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТ СНЕЖНО-ЛЕДЯНЫХ И ГРЯЗЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Лакомкин А.А., Колесниченко Д.С., Немиров В.А., Саковцев И.А., Жуковская Т.О.
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург

Ключевые слова: гидроабразивная обработка, гидроабразивное разрушение, абразив, снежно-ледяные отложения, форсунка, коллиматор, гидроабразивный резак.

Аннотация. Особенности климата отражаются на эксплуатационных свойствах дорожного полотна – снежно-ледяные отложения, снежный накат, лёд. Для разрушения снежно-ледяных отложений предлагается применять способ гидроабразивного разрушения материалов. Гидроструйное разрушение материалов основывается на совместном воздействии на поверхность непрерывных высокоскоростных струй воды и абразивных частиц, находящихся внутри этих струй. Данный метод позволит эффективно разрушить и удалить ледяную корку с поверхности дороги, рабочей поверхности машин и механизмов, а также очистить ржавчину или удалить лакокрасочное покрытие. В статье сформулированы параметры и методы их регулирования, влияющие на эффективность гидроабразивной обработки. Описана конструкция и принцип работы стенда, позволяющего проводить эксперимент с гидроабразивным разрушением материала. Предлагаемая конструкция разработана с целью оценки эффективности гидроструйного разрушения для различных климатических условий, материалов и способов применения.

STAND FOR RESEARCH OF HYDROABRASIVE CLEANING OF SURFACES FROM SNOW-ICE AND MUD DEPOSITS

Lakomkin A.A., Kolesnichenko D.S., Nemirov V.A., Sakovtsev I.A., Zhukovskaya T.O.
Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg

Keywords: water blasting, waterjet destruction, abrasive, snow and ice deposits, nozzle, collimator, waterjet cutter.

Abstract. Climate peculiarities are reflected in the operational properties of the roadbed - snow and ice deposits, snow accumulation, ice. To destroy snow and ice deposits it is proposed to use the method of hydro-jet destruction of materials. Hydro-jet destruction of materials is based on the joint impact on the surface of continuous high-speed water jets and abrasive particles inside these jets. This method will effectively destroy and remove ice crust from the surface of the road, the working surface of machines and mechanisms, as well as clean rust or remove paint coating. The article formulates the parameters and methods of their regulation affecting the efficiency of waterjet processing. The design and principle of operation of the stand, which allows to conduct an experiment with hydro-abrasive destruction of material, are described. The proposed design is developed to evaluate the efficiency of waterjet destruction for different climatic conditions, materials and methods of application.

Введение

Гидроабразивная обработка – широко применяемая технология на сегодняшний день. Высокоскоростные струи нашли применение в различных областях промышленности и строительства, являются универсальным инструментом и могут применяться для разрушения практически любого материала. Гидроструйное разрушение материалов основывается на совместном воздействии на материал непрерывных высокоскоростных струй воды и абразивных частиц, находящихся внутри этих струй [1].

Рабочий орган гидроабразивных систем – резак, представляющий из себя распылитель, включающий в себя форсунку и коллиматор, формирующий гидроабразивную струю. Между форсункой и коллиматором имеется канал для подачи абразива, движущая сила для которого – воздушный поток, формируемый разницей давлений. Таким образом, абразив, попадая в зону разряжения, увлекается струей и подаётся на обрабатываемую поверхность.

Преимущество данного метода заключается в отсутствии термического воздействия на материал, высокой скорости выполнения операций, отсутствие газовой выделений, что делает процесс экологически чистым [1]. Кроме того, гидроструйный способ очистки может

применяться с использованием жидкостей с поверхностно-активными веществами, что расширяет возможности метода.

Предмет анализа и параметры, влияющие на гидроабразивную обработку

Гидроабразивная обработка включает в себя широкий ряд параметров, которые влияют на конечный результат, а также изменяются в зависимости от поставленной задачи. Проектируемый стенд должен предусматривать возможность регулирования и точного измерения параметров для построения зависимостей, отражающих результаты эксперимента.

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований [2-5], а также существующих моделей и оборудования для очистки площадок в зимнее время [6-8] позволил сформулировать параметры, влияющие на эффективность гидроабразивной обработки.

1. Давление воды на входе в резак – основополагающий параметр, оказывающий воздействие на кинетическую энергию струи, разрушающей обрабатываемый слой, чем выше давление – тем выше кинематическая энергия. Давление в стенде зависит от диаметра форсунки, параметров насоса – производительности и максимально допустимого давления. Стенд предусматривает регулирование давления на входе в резак, так как подключен к насосу высокого давления с регулируемым перепускным клапаном. Для определения давления воды на входе резак установлен манометр.

2. Диаметр и форма форсунки – параметр, влияющий на форму струи, давление и кинетическую энергию. Стенд предполагает использование форсунок различного диаметра, что позволяет расширить диапазон исследования.

3. Диаметр коллиматора – формирует струю из песко-водо-воздушной смеси. Известно, что если коллиматор в 2-3 раза больше диаметра форсунки, то это позволяет сделать завлечение абразива максимально эффективным [1]. Стенд позволяет сменять коллиматор для подбора и установки оптимального.

4. Регулировка подачи абразива – параметр, влияющий на эффективность обработки материала, а также кинетическую энергию струи. Обработка различных поверхностей предполагает разный расход абразива, стенд позволяет варьировать подачу абразивной смеси от 0 до 100% с помощью регулятора. Для контроля расхода абразива используются весы, замер емкости с песком производится до и после включения стенда.

5. Расстояние до обрабатываемой поверхности - параметр, влияющий на ширину струи, эффективность очистки, глубину резания. Форма струи зависит от отдаления от резака [9]. Стенд предусматривает возможность его изменения расстояния до обрабатываемой поверхности. Резак установлен на пластине, которая крепится к двум штангам с резьбой, таким образом можно изменять расстояние в пределах: 0-350 мм.

6. Скорость обработки – влияет на эффективность обработки, чем выше скорость, тем эффективнее обработка [10]. Тележка может быть неподвижна или двигаться с определённой скоростью. Скорость движения тележки определяется скоростью вращения электродвигателя постоянного тока, который подключён к ШИМ-регулятору.

Описание конструкции и принцип работы стенда

Стенд (рис. 1-3) представляет собой каркас из металлического профиля квадратного сечения 1, в нижней части которого расположены направляющие для движения тележки 2 с закрепленным обрабатываемым изделием. Движение тележки осуществляется за счет привода мотора 3, соединенного с тележкой с помощью троса. В центральной части стенда расположен рабочий орган – гидроабразивный резак 6. Он установлен на резьбовых штангах, что обеспечивает возможность регулировки

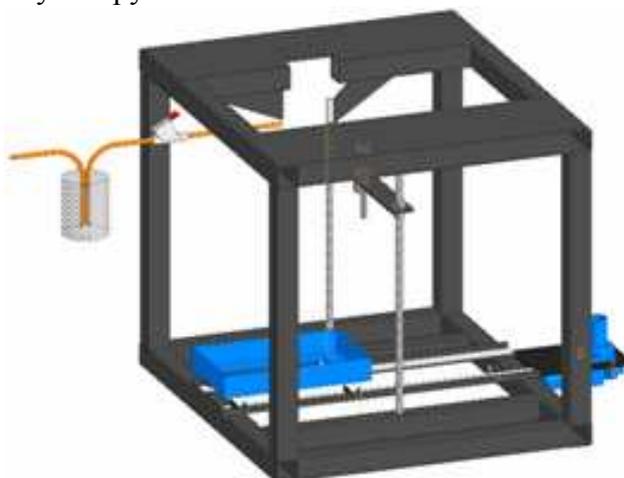


Рис. 1. Общий вид стенда

по высоте. В верхней части расположен податчик 4 – дозатор абразива, который позволяет подавать необходимое количество песка. Силовая установка станда представлена электродвигателем насоса мойки высокого давления. Давление можно регулировать с помощью перепускного клапана в насосе.

Экспериментальный стенд приводится в действие от автомобильного аккумулятора. После выставления заданных параметров, в тележку помещается лед, включается мотор привода тележки и она начинает движение в направлении к струе, распыляемой форсункой. Лед, попадая под струю, режется после прохождения тележки под струей гидроабразива, отключается подача воды и песка, лед снимается с тележки. После этого оценивается глубина резки и другие параметры, делаются выводы о результатах эксперимента.

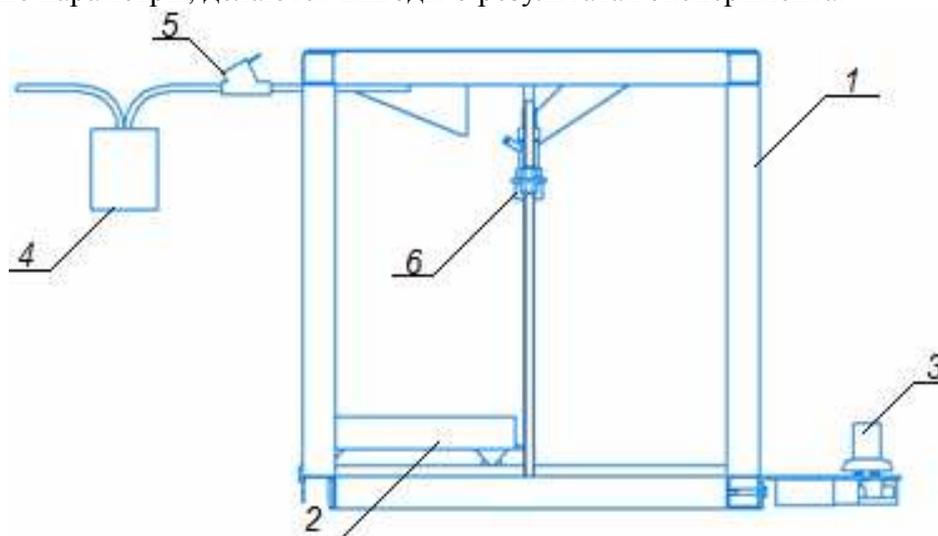


Рис. 2. Схема станда: 1 – каркас рамы; 2 – тележка; 3 – привод тележки; 4 – питатель; 5 – регулятор подачи; 6 – гидроабразивный резак



Рис. 3. Стенд в сборке

Гидроабразивный резак

Гидроабразивный резак (рис. 4) изготовлен из стали. Он включает в себя корпус 2, в который впаян 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: 1, 2, 3 мм, что позволяет работать резаку в

разных режимах. В нижнюю часть корпуса устанавливается коллиматор 5. Внутренний диаметр канала коллиматора может варьироваться, аналогично диаметру форсунки. Имеются коллиматоры с внутренним диаметром: 3, 4, 5, 6, 8, 10 мм.

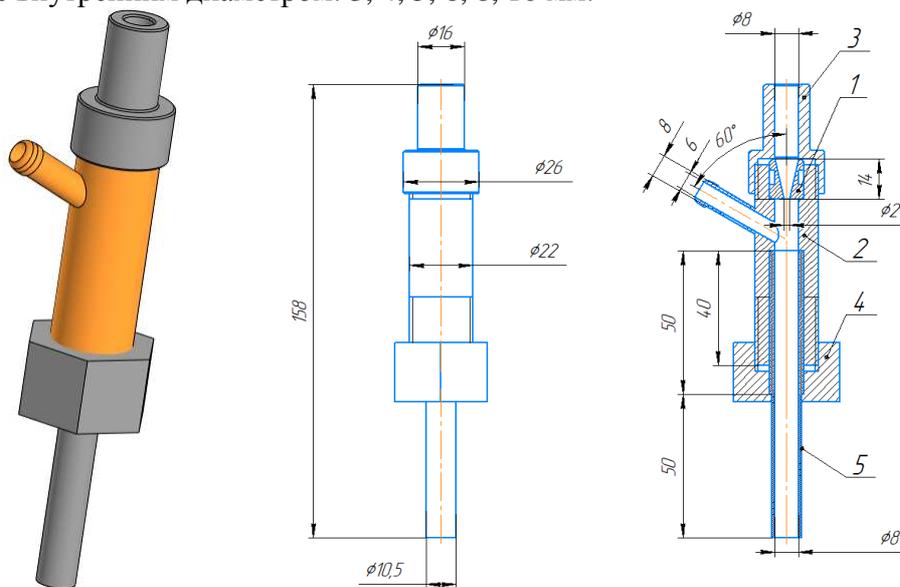


Рис. 4. Гидроабразивный резак: 1 – форсунка; 2 – корпус резака; 3 – штуцер для подачи воды; 4 – гайка коллиматора; 5 – коллиматор

Резак работает по следующему принципу: через штуцер 3 подаётся вода под высоким давлением, форсунка 1 формирует струю, которая создаёт разрежение в зоне, куда подходит канал бокового штуцера. Таким образом, через штуцер всасывается абразив. В коллиматоре формируется струя из водо-песко-воздушной смеси, которая подаётся на обрабатываемую поверхность (рис. 5).

Питатель и регулятор подачи

Питатель (рис. 6) необходим для подачи абразива к резаку. На резаке установлен штуцер, в котором создаётся разрежение. В свою очередь, штуцер на резаке соединён гибким шлангом с трубкой 6. Трубка 2 выходит в атмосферу. Тем самым создаётся поток воздуха, начинающийся во входе в трубку 2 и выходящий из трубки 6 в гибкий шланг. Поток проходит через ёмкость с абразивом 1, где происходит увлечение абразива потоком воздуха. Между трубками 3 и 6 установлен регулятор подачи 4, который с помощью заслонки 5 регулирует дополнительный поток воздуха, таким образом, выдвигая заслонку 5, поток воздуха, входящий в регулятор увеличивается, тем самым уменьшая поток через трубки 2 и 3, что приводит к уменьшению расхода абразива. При закрытой заслонке весь поток идёт через трубки 2 и 3, тем самым расход песка максимален. Также на расход абразива влияет скорость потока воздуха, которая изменяется в зависимости от разрежения в



Рис. 5. Гидроабразивный резак в действии

штуцере, на которое влияют параметры струи, определяемые соотношением диаметров форсунки и коллиматора. Регулятор сделан таким образом, чтобы обеспечить необходимый расход абразива при различных форсунках и коллиматорах, что позволяет производить гидроабразивную обработку с различным количеством абразива.

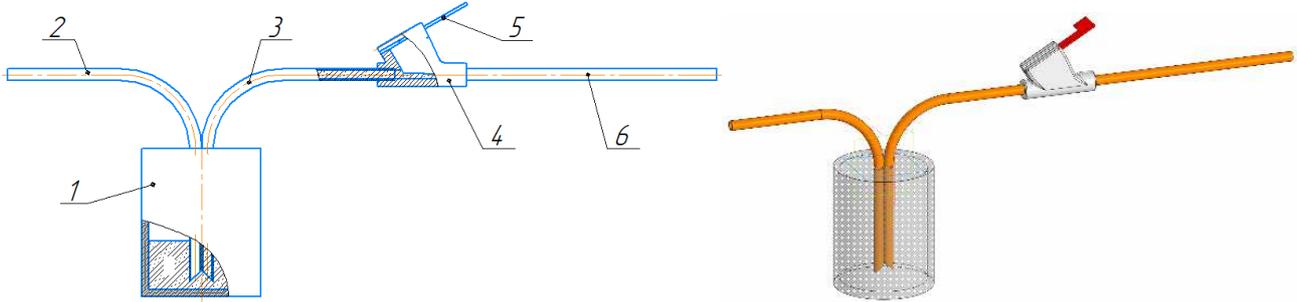


Рис. 6. Питатель с регулятором подачи: 1 – ёмкость с абразивом; 2, 3, 6 – трубки для подачи; 4 – регулятор подачи; 5 – заслонка

Методика расчета

Для численного моделирования процессов движения жидкости в канале сопловой насадки и последующего взаимодействия струи с частицами абразива был выбран совместный подход, объединяющий методы Эйлера и Лагранжа. При этом движение жидкости анализируется на Эйлеровой сетке, а частицы абразива вычисляются через переменные Лагранжа. В условиях симметрии все параметры движения и состояния среды рассматриваются как функции времени t и двух координат x и y . В таком случае система уравнений, описывающая двумерное осесимметричное течение, принимает классическую форму:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}, \quad (2)$$

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}, \quad (3)$$

$$\rho \frac{de}{dt} = \sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + \tau_{xy} \dot{\epsilon}_{xy}, \quad (4)$$

$$\rho = f(x, y);$$

$$\dot{\epsilon}_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}; \dot{\epsilon}_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}; \dot{\epsilon}_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad (5)$$

где t – текущее время; ρ – плотность; e – удельная внутренняя энергия; x, y – осевая и радиальная координаты; u, v – компоненты вектора скорости; p – давление; σ_{xx}, σ_{yy} – нормальные напряжения в радиальном, осевом и тангенциальном направлениях; τ_{xy} – касательное напряжение; $\dot{\epsilon}_{xx}, \dot{\epsilon}_{yy}, \dot{\epsilon}_{xy}$ – скорость деформации соответственно в осевом, радиальном и тангенциальном направлениях.

В приведенной системе уравнений в порядке следования представлены законы сохранения массы (1), импульса (2), (3), энергии (4) и кинематические соотношения (5).

Форма форсунки имеет значительное влияние на увеличение скорости струи жидкости: чем больше разница между начальным и конечным диаметром форсунки, тем быстрее достигается конечная скорость [1]. Промежуточные диаметры в форсунке излишни, так как они замедляют темп набора скорости и существенно увеличивают радиальную составляющую скорости струи.

Заключение. Созданный стенд для исследования гидроабразивной обработки различных поверхностей позволяет рассмотреть принцип и характер работы инструмента, измерить основные параметры и установить зависимости, отражающие эффективность

обработки широкого списка обрабатываемых поверхностей. Точный подбор параметров для выбранной поверхности и материала позволяет установить оптимальный режим работы в выбранных условиях.

Список литературы

1. Бреннер В.А., Жабин А.Б., Пушкарев А.Е., Щеголевский М.М. Гидроабразивное резание горных пород. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2003. – 279 с.
2. Жабин А.Б., Аверин Е.А., Поляков А.В., Щеголевский М.М. Анализ и доработка аналитического метода расчета гидроабразивной эрозии горных пород // Горное оборудование и электромеханика. – 2018. – № 2. – С. 17-25.
3. Жабин А.Б., Лавит И.М., Аверин Е.А. Математическая модель процесса эрозии горных пород гидроабразивной струей // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – №11, ч. 2. – С. 302-312.
4. Пушкарев А.Е. Обоснование и выбор параметров гидроабразивного инструмента исполнительных органов горных машин с разработкой модулей высоконапорного оборудования: дисс. ... канд. техн. наук. – Тула: Тульский государственный университет, 1999. – 347 с.
5. Обоснование конструктивных параметров и режимов работы гидроабразивной установки для удаления льда с рабочих поверхностей объектов транспортной инфраструктуры в Арктических регионах: отчет о НИР / СПбГАСУ; исполн. А.Е. Пушкарев, нормоконтр. Н.С. Феофанова. – Санкт-Петербург, 2022. – 37 с.
6. Кухарь И.В., Мартыновская С.Н. Машины и оборудования для очистки дорог и площадок в зимнее время // Эпоха науки. – 2019. – № 17. Технические науки. – С. 66-70.
7. Пушкарев А.Е., Репин С.В., Воронцов И.И., Виноградова Т.В. Разработка новой машины для очистки дорог от снежно-ледяных образований // Строительные и дорожные машины. – 2022. – №4. – С. 33-37.
8. Кустарев Г.В., Данилов Р.Г., Андриухов Н.М. Поливомоечные и комбинированные дорожные машины: устройство, основы расчета // Под общ. ред. к.т.н., проф. Г.В. Кустарева. – М.: МАДИ, 2023. – 226 с.
9. Шутенко А.В., Хорт Д.О. Определение геометрических параметров струи воды в зависимости от вида форсунки и режима работы струи // Инженерные технологии и системы. – 2024. – №1. – С. 88-100.
10. Головин К.А., Пушкарев А.Е., Говорова Е.В. К вопросу о разработке современного гидроабразивного инструмента // Известия ТулГУ. Науки о земле. – 2011. – №2. – С. 227-231.

References

1. Brenner V.A., Zhabin A.B., Pushkarev A.E., Shchegolevsky M.M. Hydroabrasive cutting of rocks. – M.: Moscow State Mining University Publishing House, 2003. – 279 p.
2. Zhabin A.B., Averin E.A., Polyakov A.V., Schegolevsky M.M. Analysis and refinement of the analytical method of calculation of hydro-abrasive erosion of rocks // Mining equipment and electromechanics. 2018, no. 2, pp. 17-25.
3. Zhabin A. B., Lavit I.M., Averin E. A. Mathematical model of the process of rock erosion by waterjet // News of TulSU. Technical Sciences. 2014, no. 11, part 2, pp. 302-312.
4. Pushkarev A.E. Justification and selection of parameters of the hydroabrasive tool of the executive bodies of mining machines with the development of high-pressure equipment modules: diss. ... cand. of tech. sc. – Tula: Tula State University, 1999. – 347 p.
5. Justification of the design parameters and operation modes of the water-jet installation for the ice removal from the working surfaces of the transport infrastructure objects in the Arctic regions: research report / SPbGASU; executed by A.E. Pushkarev, Normokont. N.S. Feofanova. – St. Petersburg, 2022. – 37 p.
6. Kukhar I.V., Martynovskaya S.N. Machines and equipment for cleaning roads and sites in winter // Epoch of Science. 2019, no. 17, Technical sciences, pp. 66-70.
7. Pushkarev, A.E.; Repin, S.V.; Vorontsov, I.I.; Vinogradova, T.V. Development of a new machine for cleaning roads from snow and ice formations // Construction and road machines. 2022, no. 4, pp. 33-37.
8. Kustarev G.V., Danilov R.G., Andryukhov N.M. Water-washing and combined road machines: device, basics of calculation // Under general ed. by cand. of tech. sc., prof. G.V. Kustarev. – M.: MADI, 2023. – 226 p.
9. Shutenko A.V., Hort D.O. Determination of the geometrical parameters of a water jet depending on a nozzle type and a jet operation mode // Engineering technologies and systems. 2024, no. 1, pp. 88-100.
10. Golovin, K.A.; Pushkarev, A.E.; Govorova, E.V. To the question of the modern waterjet tool development // News of TulSU. Earth Science. 2011, no. 2, pp. 227-231.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Лакомкин Андрей Анатольевич – аспирант	Lakomkin Andrei Anatolevich – postgraduate student
Колесниченко Даниил Станиславович – аспирант	Kolesnichenko Daniil Stanislavovich – postgraduate student
Немиров Владимир Александрович – аспирант	Nemirov Vladimir Aleksandrovich – postgraduate student
Саковцев Иван Алексеевич – аспирант	Sakovtsev Ivan Alekseevich – postgraduate student
Жуковская Татьяна Олеговна – аспирант	Zhukovskaya Tatiana Olegovna – postgraduate student
zhukovskayato@mail.ru	

Получена 16.05.2024