

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

УДК 632.2:532.528

Ю.А.ЖУЛАЙ, канд. техн. наук, ст. научн. сотр., ИТСТ НАНУ (Украина)

Н.А.ДЗОЗ, д-р техн. наук, профессор, Европейская НПК «HiAColor»

В.А.ЗАДОНЦЕВ, д-р техн. наук, профессор, ЗАО «ВЕСТА-Днепр»

С.В.БУРЫЛОВ, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр., ИТСТ НАНУ (Украина)

В.Ф.НОВИКОВ, мл. научн. сотр., ИТСТ НАНУ (Украина)

ВОЗМОЖНОСТЬ ОЧИСТКИ ПУТЕВОЙ СТРУКТУРЫ ПУЛЬСИРУЮЩИМИ И КАВИТИРУЮЩИМИ СТРУЯМИ ВОДЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Представлені результати дослідження гідродинамічного очищення поверхонь пульсуючими і кавітуючими струменями, одержаними в пристрої, що включає локальний гідравлічний опір – трубку Вентурі спеціальною геометрією. Використання технологій для очищення рейкової колії повинна значно знизити витрати в порівнянні з існуючою технологією подачі піску під ведучі колеса локомотива.

Представлены результаты исследования гидродинамической очистки поверхностей пульсирующими и кавитирующими струями, полученными в устройстве, включающем локальное гидравлическое сопротивление – трубку Вентури специальной геометрии. Использование технологий для очистки рельсового пути должна значительно снизить затраты по сравнению с существующей технологией пескоподачи под ведущие колеса локомотива.

The paper gives the results of studies on hydrodynamic cleaning surfaces with pulsating and cavitating sprays, obtained in a device including local flow resistance — Venturi tube of special geometry. The use of the above technologies to clean the rail track should decrease considerably the expenses as compared to the current cleaning technology by blasting sand under locomotive leading wheels.

При експлуатації подвижного залізничного складу однією з важливих проблем підвищення його ефективності і безпеки руху є очищення рейкової структури від забруднень з метою покращення сцеплення бандажів колес і рейсів. Наявність на них нальоту пилу різного походження, масляних плям і інших забруднень значно погіршує сцеплення колес з рейсами. Практика показала [1], що при сильному дощі, коли бандажі і рейси добре промиті, сцеплення не зменшується; при слідванні в час морозного дощу коефіцієнт сцеплення зменшується. Тому при русі поїзда в несприятливих умовах, а також на ділянках шляху, де погіршується сцеплення колес з рейсами, машиніст вводить в дію піщаники. Використання піску, особливо кварцевого, сухого, без домішок помітно підвищує коефіцієнт сцеплення.

Піщані пристрої на електровозах представляють собою складну пневмомеханічну систему, що складається з бункера для піску (об'ємом 2,5 м³ на електровозі ВЛ82), форсунок і труб, що проводять пісок, і пневмострої для

транспортування піску під колеса електровоза. Оптимальна кількість піску, що відповідає найкращим умовам сцеплення, становить витрати 0,55 кг на 1 км шляху. В залежності від метеорологічних умов оптимальне значення може збільшуватися на 20...30%. Вимоги до піску, який використовується для підвищення сцеплення колес з рейсами досить жорсткі. Він повинен містити кварца не менше 75...90% з зерном не більше 2 мм, пылевидні частинки розміром менше 0,1 мм — не більше 4%, глиниста складова не повинна перевищувати 3%, вологість піску не повинна перевищувати 0,5%. Підготовка і обробка піску, що подається на електровоз, представляє собою досить громоздке господарство. Пристрої піщаного забезпечення включають в себе сховища сирого і сухого піску, піщосушилки, сеялки і піщаноподаючі пристрої. В той же час накопичення значної кількості піску на рейсах призводить до підвищення опору руху і забрудненню балластного шару. В зв'язі з вищезазначеним і з урахуванням величезних витрат на підготовку, сортування, обробку і подачу піску на електровоз пошуком альтер-

нативных способов очистки рельсов от загрязнений представляет собою актуальную задачу.

Одним из перспективных способов решения этой задачи, на взгляд авторов настоящей работы, может быть использование технологий, основанных на использовании водяных струй повышенной разрушительной способности, применяемых для очистки и бурения [2]. Первое направление решения этой задачи связано с использованием технологии по созданию прерывистой струи с помощью кавитации. Прерывистость достигается за счет соответствующей геометрии и конструкции без использования каких-либо движущихся частей или дополнительных источников мощности. Второе направление связано с использованием разрушительной силы кавитации при взрывчатом росте и схлопывании микроскопических полостей внутри жидкости на очищаемой поверхности.

Работоспособность вышеприведенных технологий подтверждена многолетними теоретическим и экспериментальными работами, проводимыми в Украине (Институте технической механики НАНУ) [2] и в США (гидродинамической лаборатории компании DYNAFLOW) [3].

Так, в работе [2] приведены результаты исследования развитого кавитационного течения в гидродинамической системе, включающей в себя локальное гидравлическое сопротивление типа трубки Вентури, с периодически срывным режимом кавитационного течения.

Для этого режима характерна периодически срывная кавитация с частотами 50...10000 Гц. Колебания имеют неакустическую природу, так как их частота не зависит от длины трубопровода за трубкой Вентури с углом раскрытия $\beta > 10^\circ$ и существенно выше первой собственной частоты колебаний жидкости в трубопроводе, расположенном за ней. Трубка Вентури специальной геометрии, генерирующая высокочастотные автоколебания, получила название кавитационного генератора [4]. Природа этих частот аналогична частотам срыва вихрей при отрывном обтекании цилиндра в нормальном к его оси направлении, которые получили название струхалевых частот колебаний жидкости и для гидравлической системы с трубкой Вентури определяются следующим образом [2]:

$$f = Sh_m \sqrt{\frac{2(P_0 - P_s)}{\rho}} \times \frac{\operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}{r_{\text{кр}} \left(\sqrt{\frac{\mu}{1 - \sqrt{1 - \tau}}} - 1 \right)}, \quad (1)$$

где Sh_m – модифицированное число Струхалея; P_0 и P_s – давление на входе в трубку Вентури и в кавитационной плоскости соответственно; $r_{\text{кр}}$, μ – радиус критического сечения и коэффициент расхода трубки Вентури соответственно; τ – параметр кавитации, определяемый как отношение давлений на выходе P_1 к давлению на входе P_0 в трубку Вентури.

Формула для определения зависимости максимальных значений амплитуд кавитационных колебаний от параметра кавитации τ для различных режимов работы (различных давлений на входе в генератор) получена в работе [4] и имеет вид

$$A = \frac{J_d}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2 J_d^2 F_T^2}{c^2}}} \cdot \frac{\delta \bar{V}_k}{\ell_k^2}, \quad (2)$$

где J_d – коэффициент инерционного сопротивления участка диффузора генератора колебаний, расположенного между новой оседлой каверной и выходом из диффузора; $\delta \bar{V}_k$ – текущее значение объема оторвавшейся части кавитационной каверны; ω – круговая частота колебаний; F_T – площадь проходного сечения трубопровода; c – скорость звука в жидкости, находящейся в трубопроводе; ℓ_k – длина кавитационной каверны.

Результаты расчета [2] частот автоколебаний, проведенного по формуле (1), дали удовлетворительное согласование с экспериментальными данными, что подтвердило неакустическую природу этих колебаний.

На рис. 1 представлены данные экспериментального исследования [2]: кинограмма процесса (слева) в кавитационном генераторе колебаний и соответствующая ей осциллограмма давлений (справа) на входе в генератор P_0 и в трубопроводе за ним P_1 , при соотношении $\bar{P}_1 / \bar{P}_0 = 0,2$, где \bar{P}_1 и \bar{P}_0 – средние значения давлений.

Как видно из кинограммы процесса, оседлая, кавитационная полость начинается на входе в цилиндрический участок трубки Вентури и выходит в её диффузорную часть. Далее она растет до максимальных размеров, после чего диффузорная часть каверны отрывается и начинается рост новой каверны. Оторвавшаяся часть каверны сносится по потоку в зону повышенного давления и схлопывается, что приводит к значительному повышению давления в трубопроводе за кавитационным генератором. При этом максимальное значение двойной ам-

плитуды колебаний давления может в 2...4 раза превышать давление на входе в кавитационный генератор, что позволяет интенсифицировать технологические процессы при гидравлической очистке поверхностей.

Эффективность применения технологий с использованием пульсирующих и кавитирующих струй доказана в рамках проведения научно-исследовательской работы между Институтом технической механики НАН Украины и Одесским судоремонтным заводом в 1984-1986 г.г. [5]. Задача заключалась в том, чтобы создать на базе существующих гидродинамических устройств установку для очистки корпусов судов, существенно превосходящую применяющиеся в данное время в судоремонте по эффективности и качеству очистки. При эксплуатации подводная часть корпусов кораблей обрастает толстым слоем (до 20...40 см), состоящим в основном из отложений солей, водорослей и ракушек, что приводит к снижению грузоподъемности судов и увеличению сопротивления их движению в воде, вызывающих снижение скоростей судов и увеличение расхода топлива (до 10...15%).

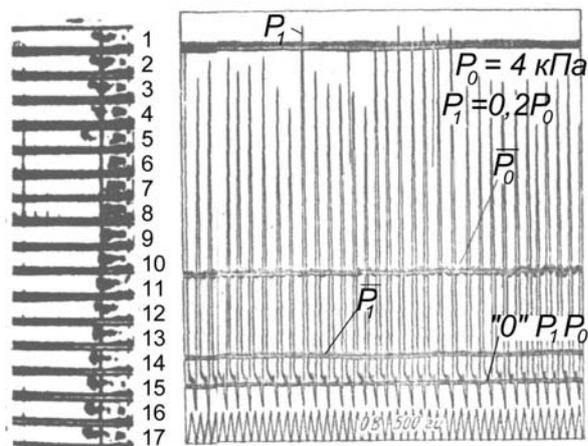


Рис. 1. Кинограмма и осциллограмма давлений на входе в генератор и в трубопроводе за ним

По оценкам специалистов одним из перспективных способов очистки, повышающих производительность работ, является гидродинамический [6]. Одно из самых перспективных направлений – применение устройств, создающих пульсирующие или кавитирующие струи.

При проведении сравнительных экспериментальных исследований в качестве базовой использовалась установка для ручной гидродинамической очистки «WOMA-ATUMAT». Установка включает в себя трехплунжерный насос высокого давления, соединенный шлангом высокого давления с гидравлическим сопловым

пистолетом. Гидропистолет содержит ручку-держатель с запорным клапаном и предохранителем его открывания, в которую вворачивается выходной трубопровод с установленным на конце соплом.

При работе установки струя воды, истекая из сопла под большим давлением, удаляет с очищаемой поверхности ржавчину и загрязнения. При этом на гидропистолет действует сильная реактивная сила, приводящая к быстрому утомлению оператора. Чтобы этого не происходило, необходимо либо снижать давление, либо уменьшать расход воды, устанавливая сопло с меньшим диаметром выходного отверстия. В первом случае это ухудшает степень очистки поверхности, во втором – снижает производительность.

Данное техническое противоречие можно устранить известным путем – созданием пульсирующих струй с высокой кинетической энергией. Это позволит получить высокую степень очистки без увеличения давления. Следует отметить, что создание пульсирующей струи при помощи механических пульсаторов имеет ряд недостатков [6]. Используя кавитационный генератор, создающий кавитационные автоколебания перед соплом гидропистолета, можно получить пульсирующие струи с высокой кинетической энергией в устройстве, лишенном недостатков, присущих механическим пульсаторам.

Для этого было разработано устройство (рис. 2), включающее в себя гидропистолет 1 от установки «WOMA-ATUMAT», удлиненный трубопровод 2, кавитационный генератор 3 импульсов давления жидкости, выходной трубопровод 4 с сопловым насадком 5, в котором устанавливается сопло 6.

При этом на трубопроводе гидропистолета были предусмотрены места для установки манометров для измерения статических давлений на входе и выходе из кавитационного генератора и датчиков для замера «двойной амплитуды» колебаний жидкости за генератором. Под двойной амплитудой вследствие негармонической формы колебаний понимается величина $\Delta P_1 = P_{1\max} - P_{1\min}$, где $P_{1\max}$ и $P_{1\min}$ максимальное и минимальное значения давлений в процессе колебаний.

При проведении исследований было установлено, что в диапазоне $\tau = 0,10...0,35$ в трубопроводе гидропистолета за трубкой Вентури генерируются колебания жидкости импульсного характера с широким частотным спектром. В качестве примера на рис. 3 приведена зависи-

мость $\Delta P_1(f)$ для генератора с диаметром критического сечения $d_{кр} = 2,2$ мм с различными давлениями на входе в генератор.

Максимумы амплитуды наблюдаются на частотах 1800 и 4100 Гц и не смещаются при изменении давления на входе в кавитационный генератор, причем частота, на которой наблю-

дается второй максимум, приблизительно в два раза больше, чем частота первого максимума. Это напоминает эффект резонанса, а наличие двух максимумов амплитуд с кратными частотами говорит о наличии первой и второй гармоник.

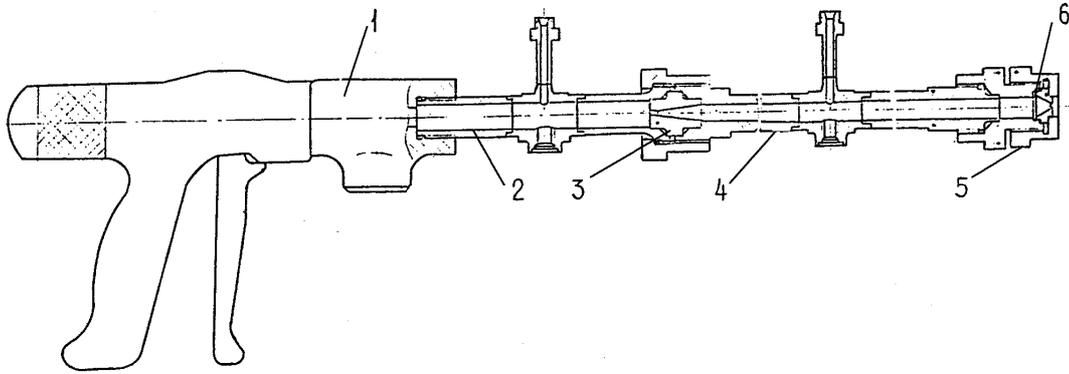


Рис. 2. Гидропистолет для очистки от старой краски, ржавчины и загрязнений

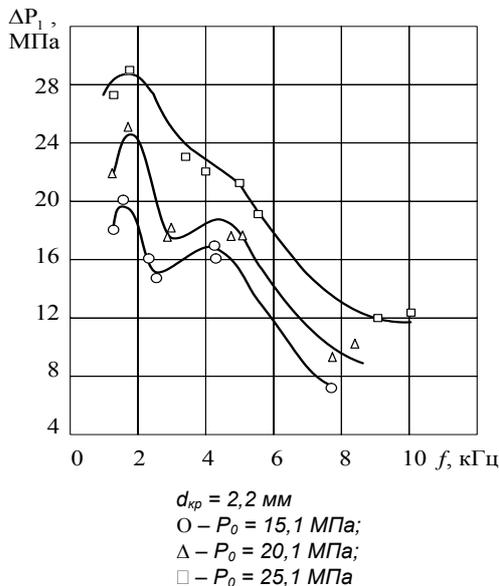


Рис. 3. Зависимость $\Delta P_1(f)$ для генератора импульсов давления

Результаты исследования гидроочистки поверхности судов пульсирующими струями, полученными с помощью кавитационного генератора, показали высокую его эффективность. Так, при исследовании работы устройства с генератором и коническим соплом $d_c = 2,2$ мм при входном давлении $P_0 = 10$ МПа струя очищала наросты ракушки с расстояния 1500 мм. При повышении давления на входе P_0 до 15 МПа частота импульсов повысилась, эффективность очистки возросла. С расстояния до 50 мм струя очищала поверхность до чистого металла. При испытании без генератора струя

очищала ракушки с расстояния 1500 мм при входном давлении $P_0 = 30$ МПа.

Отдельным этапом испытаний было исследование работы устройства без сопла. Струя из такого устройства имела больший диаметр поперечного сечения, но меньший диаметр распыла и дальность полета ее была больше.

Более эффективная работа устройства с кавитационным генератором без сопла объясняется взрывообразным ростом микроскопических каверн в струе жидкости. Эти каверны в последующем резко схлопываются на поверхности, которая подлежит очистке. При этом максимальные давления в зоне схлопывания микроскопических каверн достигают по различным источникам [7, 8] 220...25000 КПа. Поскольку энергия схлопывания каждого пузырька сконцентрирована на микроскопической площади, во время схлопывания возникают чрезвычайно высокие и очень локализованные механические напряжения. Это локальное увеличение давления дает кавитирующей струе большое преимущество по сравнению со стационарной струей, работающей при том же самом давлении и расходе жидкости через насос.

На рис. 4 приведена зависимость расстояния, на котором обеспечивалась полная очистка поверхности до блестящего металла, от давления на входе в устройство с генератором диаметром критического сечения $d_{кр} = 2,6$ мм. При входном давлении $P_0 = 35$ МПа струя очищала поверхность до металла с расстояния до 700 мм, а при $P_0 = 10$ МПа тот же эффект достигался с расстояния 20 мм.

Для применения технологии очистки рельсового пути от загрязнений на локомотиве взамен существующей пескоподдачи необходимо установить гидросистему, включающую в себя насосную подачу воды с приводом от электродвигателя, запорную электроарматуру, кавитационный генератор и сопла. В качестве емкости для воды можно использовать имеющуюся на локомотиве емкость для песка, заправка которой производится на основных и промежуточных станциях по мере необходимости.

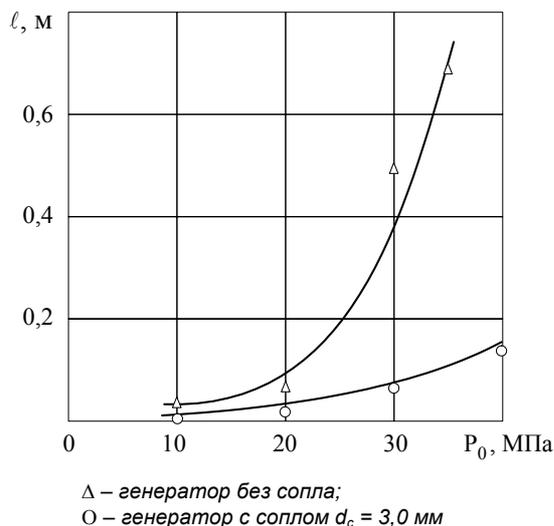


Рис. 4. Зависимость расстояния от выхода из кавитирующего устройства до очищаемой поверхности от давления на входе в генератор, на котором струя жидкости снимает удаляемый слой до металла

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Очистка поверхности пульсирующей струей имеет большую производительность, чем стационарной струей при одном и том же давлении на входе в устройстве и том же сопле. Пульсирующая струя имеет больший диаметр, чем стационарная, ядро которой сохраняется на меньшем расстоянии от сопла (около двух метров). Пульсирующая струя имеет больший распыл и ее ядро сохраняется на большем (около пяти метров) расстоянии от сопла. Это говорит о том, что энергия порций жидкости, вылетающих из сопла, и всей пульсирующей струи больше, чем стационарной. Кроме того, больший распыл струи означает больший захват обрабатываемой поверхности. Следовательно, производительность очистки пульсирующей

струей выше, чем стационарной.

2. Установлено, что эффективность и производительность очистки струей, истекающей из генератора без сопла, выше, чем струей, истекающей из генератора с соплом. Это объясняется тем, что кавитационные каверны схлопываются на поверхности, которая подлежит разрушению.

3. Применение технологий по очистке рельсового пути от загрязнений с использованием пульсирующих или кавитирующих струй должны привести к значительному снижению затрат на пескоподготовку и очистку балласта от песка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Осипов С.И., Миронов К.А., Ревич В.И. Основы локомотивной тяги. – М.: Транспорт, 1979. – 440 с.
- V.V.Pilipenko, I.K.Man'ko, V.A.Zadontsev. CAVITATION SELF-OSCILLATIONS INTENSIFY TECHNOLOGICAL PROCESSES. High Speed Body Motion in Water. Report AGARD-R-827 is a compilation of the proceedings of a Fluid Dynamics Panel Workshop held at the National Academy of Sciences in Kiev, Ukraine, 1-3 Sept. 1997. Publ. February 1998. – P.321-324.
- DYNAFLOW, Inc. JET STUDIES AND CAPABILITIES CONNECTED TO THE HYDRO-VIBRATOR PROPOSAL. Prepared for Brookhaven National Laboratories. November 2000. – 11 p.
- Пилипенко В.В. К определению амплитуд колебаний давления, создаваемых кавитационным генератором // Математические модели рабочих процессов в гидромневмосистемах. – Киев: Наукова думка, 1981. – С. 18-24.
- Исследование возможности повышения эффективности гидродинамического способа очистки корпусов судов при использовании кавитационных автоколебаний давления жидкости: Отчет о НИР. СКТБ ИТМ НАН Украины. Отв. исп. Дзоз.Н.А. – Днепропетровск, 1985. – 134 с.
- Молдавский М.С., Пугач К.А., Хейфен В.Я. Применение гидродинамической очистки в судоремонте. – М.: ЦБНТИ, 1975. – 31 с.
- Trilling L. The Collapse and Rebound of a Gas Bubble, Jr. Appl. Phys., 23, 14–17 (1952).
- Hickling R., Plesset M. S. Collapse and Rebound of a Spherical Bubble in Water, Physics of Fluids, 7, 7–14 (1964).