

Ю. А. ЖУЛАЙ, А. С. ВОРОШИЛОВ (Институт транспортных систем и технологий НАН Украины «Трансмаг»)

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ КАВИТАЦИЯ В ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Наведено приклади використання гідродинамічної кавітації в промислових технологічних процесах, що дозволяє значно знизити питомі енергетичні витрати. Для автоматизованої установки очищення візків вагонів наведено результати визначення енергії удару рідини, що впливає на очищення поверхонь, стаціонарного й пульсуючого струменів. Показано, що використання пульсуючих струменів підвищеної руйнівної здатності, отриманих за кавітаційним генератором, може в кілька разів підвищити ефективність установки.

Приведены примеры использования гидродинамической кавитации в промышленных технологических процессах, что позволяет значительно снизить удельные энергетические затраты. Для автоматизированной установки очистки тележек вагонов представлены результаты определения энергии удара жидкости, воздействующей на очищаемую поверхность, стационарной и пульсирующей струй. Показано, что использование пульсирующих струй повышенной разрушительной способности, полученных за кавитационным генератором, может в несколько раз повысить эффективность установки.

Applications of hydrodynamic cavitation in industrial engineering processes which enables to attain a considerable decrease in specific loss of power are exemplified. The results of finding the power of the liquid impact action upon the surface being cleaned by steady-state and pulsating jets for an automated unit are represented. It has been shown that the use of pulsating jets of increased destructive power obtained from a cavitation generator is capable of increasing the unit efficiency several times as compared with traditional methods.

Постановка проблемы и ее связь с научно-техническими задачами

Повышение энергоэффективности любого предприятия является одной из важных задач его производственно-хозяйственной деятельности. Особенно остро эта проблема встала перед руководителями хозяйствующего субъекта в условиях роста цен на энергоносители и приближения их к мировым. В связи с этим реализация энергосберегающих технологий в производстве, в том числе и на железнодорожном транспорте, является актуальной задачей.

Для снижения потребления энергоресурсов и планирования внедрения энергосберегающих технологий каждое предприятие должно располагать средствами для их реализации и информацией об:

- основных потерях энергии и их причинах;
- энергоэффективных технологиях и оборудовании;
- сроках окупаемости и технико-экономическом обосновании конкретных энергосберегающих мероприятий.

Анализ последних исследований и публикаций по использованию гидродинамической кавитации в промышленных технологиях

В работе [1] описаны примеры практического использования гидродинамической кавитации для получения позитивных результатов по интенсификации различных технологических процессов:

- в металлургии – для удаления вторичной окалины пульсирующими струями повышенной разрушительной способности при горячей прокатке колес железнодорожных вагонов;
- в химической промышленности – для эмульгирования жидкостей и диспергирования с использованием режимов периодически-срывной кавитации в потоке суспензии;
- в горнодобывающей отрасли – для интенсификации процессов бурения наложением вибронгрузки на породоразрушающий инструмент.

В качестве примера в табл. 1 приведены технические характеристики кавитационной установки и традиционных технологических процессов производства водоэмульсионных красок (бисерные и шаровые мельницы). Из этих данных видно, что использование гидродинамической кавитации позволило снизить удельные энергозатраты в 10 и 20 раз по сравнению с шаровыми и бисерными мельницами (соответственно).

Решение этих задач связано с получением дискретно-импульсной энергии большой мощности в потоке жидкости при помощи кавитационного генератора [2], создающего высокоамплитудные колебания в диапазоне звуковых частот. Генератор преобразует стационарное течение жидкости в пульсирующее. Оно достигается только за счет соответствующей геометрии специального гидравлического канала, а не за счет использования каких-либо движущихся частей или дополнительных источников энергии.

Технические характеристики кавитационной установки и традиционного оборудования для технологических процессов производства вододисперсионных красок

Показатели	Кавитационная установка	Бисерные мельницы	Шаровые мельницы
1. Стоимость бисера за 1 т, руб.	–	870,000	–
2. Стоимость бисера в год, руб.	–	19140,000	–
3. Расход бисера в год, т	–	22,000	–
4. Стоимость шаров за 1 т, руб.	–	–	594,40
5. Стоимость шаров в год, руб.	–	–	7250,00
6. Расход шаров в год, т	–	–	12,20
7. Годовой объем производства краски, т	167200,0	22050,000	15750,00
8. Стоимость оборудования, руб.	4500,0	173042,000	38760,00
9. Производительность оборудования, т/ч	24,0	3,815	2,49
10. Энергоемкость оборудования, кВт·ч/т	2,5	56,800	24,80

Гидравлический канал представляет собой трубку Вентури специальной геометрии [2], в которой при определенном диапазоне соотношений давления на выходе P_2 к давлению на входе P_1 (равном $\approx 0,01...0,8$) реализуется периодически срывное кавитационное течение. При этом наблюдается периодический рост оседлой кавитационной каверны в критической и диффузорной части трубки Вентури до определенных максимальных размеров, затем ее отрыв и схлопывание в зоне повышенного давления в диффузоре, либо в трубопроводе за генератором. Отличительной особенностью такого течения является стабильность частоты отрыва каверн большого объема и их схлопывание в потоке, а не на стенке канала.

Исследованию условий повышения эффективности генерации высокоамплитудных кавитационных автоколебаний давления жидкости посвящен ряд работ [3–7], выполненных в Институте технической механики НАН Украины, в которых установлено, что для обеспечения больших амплитуд колебаний давления жидкости в трубопроводе за кавитационным генератором, выполненном в виде трубки Вентури, необходимо чтобы угол раскрытия диффузора составлял 20 и более градусов, и отношение диаметра выходного сечения диффузора D к диаметру критического сечения критики $d_{кр}$ равнялось ≈ 4 . В этом случае максимальные значения импульсов давления жидкости за генератором превышают среднее значение давления на входе в него в $\approx 1,5...3$ раза.

В работе [8] рассмотрен пример использования гидродинамической кавитации в технологическом процессе очистки морских судов от обрастаний (характерный линейный размер 20–40 см), состоящих из отложения солей, водорослей и ракушек, старой краски и ржавчины. В этом случае на используемой стандартной гидравлической установке «WOMA-ATUMAT» в гидропистолет был вмонтирован кавитационный генератор колебаний жидкости. В результате проведения натурных испытаний были сделаны выводы: при одном и том же давлении на входе в гидропистолет и том же подпорном сопле очистка поверхности пульсирующей струей имеет большую (2...3 раза) производительность, чем стационарной струей.

Пульсирующая струя (рис. 1) имеет больший диаметр и распыл, чем стационарная, ее ядро сохраняется на расстоянии от подпорного сопла до 5 м (для стационарной – два метра). Это говорит о том, что энергия порций жидкости, вылетающей из сопла, и всей пульсирующей струи, больше чем стационарной струи. Кроме того, больший распыл струи означает больший захват обрабатываемой поверхности, а следовательно, производительность очистки выше.

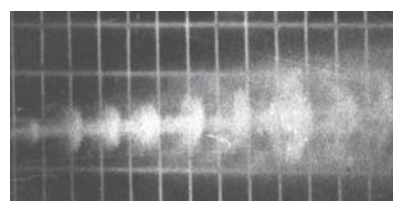


Рис. 1. Фрагмент киносъемки пульсирующего потока жидкости

В работах [8; 9] предложено использовать гидродинамическую кавитацию для очистки поверхностей бандажей колес и рельс железнодорожного транспорта от загрязнений с целью улучшения их сцепления. Схема такого способа очистки приведена в работе [9].

Несмотря на некоторую «экзотичность» предложенного технического решения, особенно с использованием этого устройства в зимний период, на взгляд авторов, его применение значительно понизило бы затраты на операции, связанные с заготовкой, сортировкой, подготовкой и подачей песка на электровозы. В то же время, использование песка современным подвижным составом приводит к повышению сопротивления движения, засорению балластного слоя, а также к возможной потере контакта колес локомотива с рельсами, что чрезвычайно опасно.

Технологии, основанные на использовании пульсирующих струй жидкости повышенной разрушительной способности, могут применяться для очистки конструктивных элементов вагонов и локомотивов, их колесных пар, рам тележек, корпусов букс, наружных и внутренних поверхностей котлов цистерн и т. д. от отложений, загрязнений, старой краски и ржавчины при плановом ремонте и модернизации.

Устройства для создания таких струй просты в изготовлении и эксплуатации и имеют срок службы от 2000 до 5000 часов. Они могут быть созданы путем доработки существующих гидроустановок, поскольку не имеют подвижных частей и не требуют дополнительных источников энергии.

В связи с вышеизложенным несомненный интерес представляет определение сравнительных оценочных характеристик стационарных и импульсных струй и их удельных энергетических характеристик (энергия импульса) при проведении работ по очистке различных поверхностей железнодорожных вагонов и локомотивов при выполнении ремонтных работ и модернизации.

Сравнительная оценка энергетических характеристик стационарной и пульсирующей струй. Для определения и сравнительного анализа энергетических характеристик стационарных и пульсирующих струй в качестве объекта исследования использовалась автоматизированная установка производства станкостроительного завода «В. ХЕГЕНШЕЙДТ КГ» (Германия) для очистки тележек вагонов (рис. 2) со следующими техническими характеристиками:

- ширина тележки – макс. 3 150 мм;
- высота тележки – макс. 1 100 мм;
- длина тележки – любая;
- давление воды – около 4,0 МПа;
- производительность насоса высокого давления – около 30 м³/ч;
- мощность приводного двигателя насоса – около 55 кВт;
- производительность установки (при длине тележки в 5 м) около 25 тележек за 8 часов;
- общий вес установки – около 8 500 кг.

Установка очищает железнодорожные тележки с колесными парами и без них, с полным проходом очищаемых тележек. Тележки очищаются холодной (в случае необходимости подогретой водой) без химических добавок от пыли, масла и поврежденной краски.

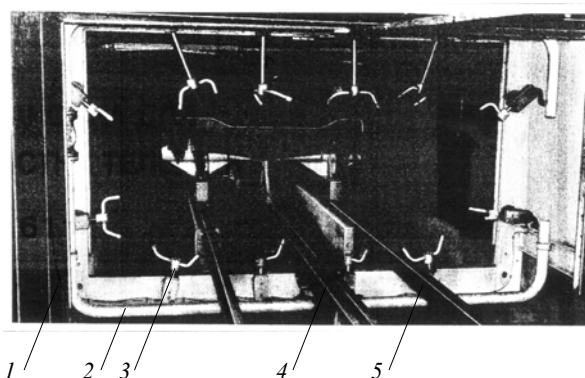


Рис. 2. Установка для очистки тележек:
1 – кабина; 2 – трубчатая рама; 3 – вращающаяся головка со струйными соплами; 4 – транспортная цепь; 5 – рельсовый путь

Установка состоит из кабины 1, обшитой оцинкованным металлом, с эластичными прозрачными воротами, изготовленными из прочной на истирание пластмассы. Обмывочная камера, находящаяся в середине кабины, снабжена жестко смонтированной трубчатой рамой 2, через которую вода подводится к вращающимся головкам со струйными соплами 3. Головки со струйными соплами приводятся в действие смонтированными вне кабины электродвигателями посредством необслуживаемой цепной передачи. Насосный агрегат, подающий воду к струйным соплам, расположен вне кабины и может питаться как от системы водоснабжения, так и от очистительной установки оборотного водоснабжения. Тележки передвигаются как вперед, так и назад с помощью транспортной цепи 4, находящейся посередине рельсов 5.

Доработку установки для создания пульсирующих струй повышенной разрушительной способности, можно осуществить путем установки кавитационного генератора колебаний жидкости на входе в трубчатую раму.

Исходными данными для расчета генератора является давление подачи воды $P_1 = 4,0$ МПа и расход $Q = 30$ м³/ч.

Площадь критического сечения кавитационного генератора определяется по формуле

$$F_{кр} = \frac{G_{\Gamma}}{\mu_{\Gamma} \sqrt{2g\gamma(P_1 - P_{\kappa})}}, \quad (1)$$

где G_{Γ} – секундный весовой расход жидкости (равный 8,33 кг/с); μ_{Γ} – коэффициент расхода генератора (принимается равным 0,96); $g = 981$ см/с² – ускорение свободного падения; $\gamma = 0,001$ кг/см³ – удельный вес воды; P_{κ} – давление в кавитационной камере принимается равным давлению насыщенных паров воды – 0,0024 МПа.

Площадь проходного сечения генератора, определенная по формуле (1), составляет 0,97 см², а диаметр критического сечения $d_{кр} = 11,0$ мм.

Остальные геометрические параметры генератора выбираются в соответствии с [2] и приведены на рис. 3.

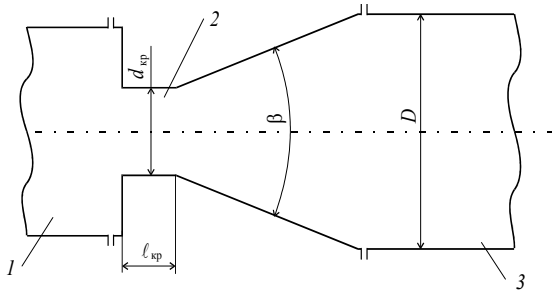


Рис. 3. Кавитационный генератор:

1 – входной трубопровод; 2 – генератор $d_{кр} = 11$ мм; $\beta = 20^\circ$; $D = 4d_{кр}$; $\ell = 0,6 \dots 2d_{кр}$; 3 – выходной трубопровод

На рис. 4 приведены расчетные зависимости [1] ожидаемых размахов и частоты колебаний жидкости, создаваемых генератором, который предлагается установить при доработке установки для очистки тележек.

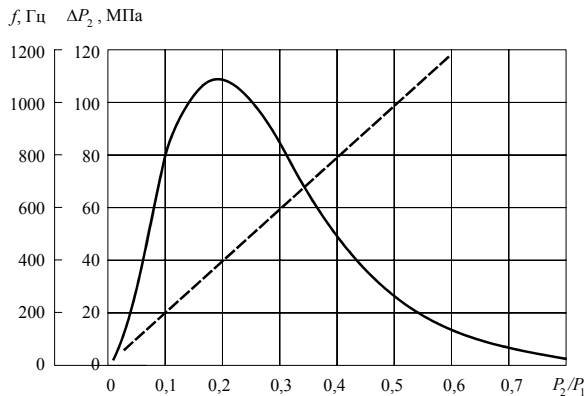


Рис. 4. Расчетные зависимости ожидаемых размахов и частоты колебаний жидкости на выходе из генератора: (—) – ΔP_2 ; (----) – f

Из представленных результатов видно, что при правильном подборе суммарной проходной площади сопел, обеспечивающих значения подпора в диапазоне $P_2 = (0,15 \dots 0,25)P_1$, давление на выходе из сопел в импульсе в среднем превышает давление, создаваемое насосом, в 2,5...2,7 раза.

Формулу, связывающую параметры генератора колебаний и коллектора с соплами, можно получить, приравняв расходы через генератор колебаний и через все сопла [10].

Расход через генератор колебаний равен

$$G_{\Gamma} = \mu_{\Gamma} \cdot F_{кр} \sqrt{2g \cdot \gamma \cdot \Delta P_{\Gamma}}, \quad (2)$$

где ΔP_{Γ} – перепад давления на генераторе колебаний.

Суммарный расход через сопла коллектора

$$G_{\Sigma\phi} = n \cdot G_{\phi} = n \cdot \mu_{\phi} \cdot F_{\phi} \sqrt{2g \cdot \gamma \cdot \Delta P_{\phi}}, \quad (3)$$

где n – количество сопел в коллекторе; μ_{ϕ} , F_{ϕ} – коэффициент расхода и площадь проходного сечения сопла; ΔP_{ϕ} – перепад давления на сопле.

Приравнявая (2) и (3), получили

$$\mu_{\Gamma} \cdot F_{кр} \cdot \sqrt{\Delta P_{\Gamma}} = n \cdot \mu_{\phi} \cdot F_{\phi} \sqrt{\Delta P_{\phi}}. \quad (4)$$

Принимая во внимание, что

$$\Delta P_{\Gamma} = P_1 - P_{\kappa}, \quad \Delta P_{\phi} = P_2 - P_a,$$

где P_a – атмосферное давление.

С учетом того, что $P_{\kappa} \ll P_0$ и $P_a \ll P_0$ приближенно можно записать, что

$$\Delta P_{\Gamma} \approx P_1, \quad \Delta P_{\phi} \approx P_2 \approx P_0 \tau,$$

где $\tau = \frac{P_2}{P_1}$ – параметр кавитации.

С учетом сделанных допущений выражение (4) приводится к виду

$$\begin{aligned} \mu_{\Gamma} F_{кр} \sqrt{P_0} &= n \mu_{\phi} F_{\phi} \sqrt{P_0} \sqrt{\tau}, \\ \mu_{\Gamma} F_{кр} &= n \mu_{\phi} F_{\phi} \sqrt{\tau} \end{aligned}$$

или

$$\frac{n F_{\phi}}{F_{кр}} = \frac{\mu_{\Gamma}}{\mu_{\phi} \sqrt{\tau}}. \quad (5)$$

Выражение (5) весьма полезно для анализа системы «генератор-коллектор», сравнения расчетных и экспериментальных данных и т. п.

Из выражения (5) проходная площадь одного сопла трубчатого коллектора определяется как

$$F_{\phi} = \frac{\mu_r}{n \cdot \mu_{\phi}} \cdot \frac{F_{кр}}{\sqrt{\tau}}. \quad (6)$$

Коэффициенты расхода генератора и сопел желательнее определять проливками экспериментальных образцов, и по данным проливок уточняются проходные сечения генератора и сопел.

В табл. 2 приведены характеристики источника энергии и технологические характеристики: для стационарной струи – определенные по параметрам установки для очистки тележек; для пульсирующей струи – рассчитанные по формулам (1) и (6). Скорость истечения пульсирующей струи определялась по среднеинтегральному значению пульсации давления, а энергия удара за время действия импульса, $\Delta t = 1/3T$ (который определялся экспериментально и для $\tau = 0,2$ составлял $\approx 1/3$ периода колебания).

Таблица 2

Сравнительные оценочные характеристики стационарной и пульсирующей струй жидкости установки для очистки тележек вагонов

Показатели	Стационарная струя	Пульсирующая струя
Характеристики источника энергии		
давление подачи	4,0 МПа	4,0 МПа
производительность насоса	30 м ³ /ч	30 м ³ /ч
мощность приводного двигателя	55 кВт	55 кВт
Технологические характеристики		
критическое сечение генератора	–	$11 \cdot 10^{-3}$ м
максимальное давление в трубопроводном коллекторе	4,0 МПа	10,8 МПа (в импульсе)
проходное сечение сопла	$0,122 \cdot 10^{-4}$ м	$0,191 \cdot 10^{-4}$ м
длительность импульса	–	$8,3 \cdot 10^{-4}$ с
расход через сопло	0,694 кг/с	1,26 кг/с
скорость струи	56,9 м/с	66,0 м/с
энергия удара	1,86 Дж	4,56 Дж

Основным параметром воздействия жидкости на очищаемую поверхность является энергия удара. Для пульсирующей струи энергия удара составляет 4,56 Дж, а для стационарной – 1,86 Дж, т. е. энергия удара пульсирующей струи в 2,5 раза выше, чем энергия удара при стационарном истечении жидкости.

В работе [8] указывалось, что очистка поверхности пульсирующими струями повышенной разрушительной способности имеют большую производительность при одних и тех же характеристиках источника энергии. Также установлено, что ядро пульсирующей струи сохраняется на расстоянии в $\approx 2,5$ раза больше по сравнению со стационарной струей. Следует также отметить, что воздействие импульсной нагрузки приводит к уменьшению внутреннего трения и росту скорости деформации разрушаемого слоя, а следовательно, и к росту темпов очистки при прочих равных условиях.

Таким образом, использование генератора кавитационных колебаний понизит удельные энергозатраты в 2,5 и более раз за счет комплексного воздействия: увеличения энергии импульса, скорости деформации и уменьшения внутреннего трения при циклическом нагружении разрушаемого слоя.

Выводы

Приведенные доводы обосновывают целесообразность и перспективность использования гидродинамической кавитации в технологических процессах по чистке различных поверхностей при ремонте и модернизации элементов подвижного состава железной дороги.

Показано, что применение пульсирующих струй повышенной разрушительной способности позволит снизить удельные энергозатраты в 2,5 и более раз за счет комплексного воздействия – увеличения энергии импульса и уменьшению

сопротивляемости разрушаемого слоя при циклическом нагружении с высокими частотами.

Устройства для создания таких струй просты в изготовлении и эксплуатации. Они могут быть созданы путем простой доработки существующих гидроустановок, поскольку не имеют подвижных частей и не требуют дополнительных источников энергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pilipenko V. V. Cavitation self-oscillations intensify technological processes / V. V. Pilipenko, I. K. Man'ko, V. A. Zadontsev // Proceedings of a Fluid Dynamics Panel Workshop. – К.: Ukraine. Report 827, 1998, – P. 32 (1)–32 (4).
2. А. с. 1232299 (СССР) «Генератор колебаний давления жидкости». Пилипенко В. В., Задонцев В. А., Манько И. К., Жулай Ю. А. и Дзоз Н. А. Зарегистрировано 22.01.1986 г.
3. Пилипенко В. В. Исследование высокочастотных кавитационных автоколебаний в гидравлической системе с трубкой Вентури / В. В. Пилипенко, В. А. Задонцев, И. К. Манько и др. // Кавитационные автоколебания в насосных системах, ч. 2. – К.: Наук. думка, 1976. – С. 103–113.
4. Манько И. К. Визуальные исследования кавитационных автоколебаний в гидравлической системе с прозрачной трубкой Вентури // Кавитационные автоколебания в насосных системах. ч. 2. – К.: Наук. думка, 1976. – С. 113–118.
5. Манько И. К. Влияние угла диффузора трубки Вентури на частоту и уровень максимальных значений давления высокочастотных кавитационных автоколебаний // Кавитационные автоколебания и динамика гидравлических систем. – К.: Наук. думка. 1977. – С. 34–38.
6. Бурьлов С. В. Условия повышения эффективности генерации высокоамплитудных кавитационных автоколебаний давления жидкости / С. В. Бурьлов, Ю. А. Жулай // Зимняя школа по механике сплошных сред: Тез. докладов. – Пермь. 2003. – № 13. – С. 63.
7. Жулай Ю. А. Некоторые результаты исследований тонкой пульсирующей струи / Ю. А. Жулай, И. К. Манько, Л. И. Уварова // Кавитационные колебания и динамика двухфазных систем: Сб. науч. тр. – К.: Наук. думка, 1985. – С. 97–102.
8. Ю. А. Жулай. Возможность очистки путевой структуры пульсирующими кавитирующими струями воды при движении подвижного состава / Ю. А. Жулай, Н. А. Дзоз, В. А. Задонцев, и др. // Вестник Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – Д., 2005. – Вып. 8. – С. 151–155.
9. Жулай Ю. А. Об использовании гидродинамической кавитации в технологических процессах / Ю. А. Жулай, В. А. Задонцев, Ю. В. Демин // Залізничний транспорт України, – 2005. – № 3. (50), – С. 44–48.
10. Пилипенко В. В. Кавитационные автоколебания. – К.: Наук. думка, 1989. – 316 с.

Поступила в редколлегию 20.06.2006.