

Таким образом, в работе решена задача описания кольцевого вращающегося потока с осевой составляющей внутри цилиндрической ситовой поверхности. Для вращающегося потока принято приближение идеальной жидкости, а для истечения через щели тонкоячеистого сита – приближение вязкого ползучего течения. При этом параметры истечения через щели сита определяются давлением, создаваемым вращающимся потоком с толщиной, убывающей вдоль осевой координаты. Толщина кольцевого потока, в свою очередь, зависит от параметров истечения через щели сита. При решении задачи принята гипотеза об автомодельности осевой составляющей скорости. В результате решения задачи гидродинамики получены зависимости тангенциальной и радиальной составляющих скорости вдоль радиальной координаты, аксиальной составляющей вдоль оси движения, распределение давления по радиальной координате и уравнение свободной (внутрикольцевой) поверхности потока.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бевзенко Б.Ф. О необходимости ситовой классификации питания флотации на углеобогатительных фабриках // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. - 2005. - Вип. 23(64). - С. 69-73.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. - М.: Наука, 1987. - 840с.
3. Сансиев В.Г. Течение жидкости через щель колосникового сита тонкого грохочения// Обогащение полезных ископаемых: Наук.-техн. зб. - 2004. - Вып. 20(61). - С. 88-94.

**УДК 532.528:534-14:621:622:660:669**

Канд. техн. наук Ю.А. Жулай  
(ИТСТ НАН Украины)

### **ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ КАВИТАЦИИ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ**

У статті представлені результати дослідження гідродинамічного очищення поверхонь пульсуючими і кавітуючими струменями, одержаними в пристрої, що включає локальний гідравлічний опір, – трубку Вентурі спеціальної геометрії. Природа високочастотних коливань, одержаних в такому пристрої, носить неакустичний характер і пов'язана з періодичним відривом кавітаційної каверни в зоні за критичним перетином трубки Вентурі, віднесенням каверни вниз за течією і її схлопуванням в зоні підвищеного тиску.

### **HYDRODYNAMIC TO CAVITATION IN INDUSTRIAL TECHNOLOGIES**

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 nature of high-frequency oscillations obtained in such a device has a nonultrasonic character and related to a periodic detachment of a cavitation cavity in the area behind the Venturi tube critical section, a downstream cavity entrainment and a cavity collapse in the area of the increased pressure.

Одним из основных фундаментальных свойств жидкости является её способность выдерживать действия больших растягивающих напряжений. Это приводит к потере сплошности и образованию каверн, заполненных внутри паром и газом, когда абсолютное давление в какой-то области капельной жидкости по-

низится ниже некоторого критического значения давления  $P_{кр}$ .

Кавитацию называют гидродинамической, если снижение давления, при котором получают разрывы сплошности, происходит вследствие больших местных скоростей в потоке капельной жидкости.

Это явление приводит к возникновению шумов и вибраций, а также к эрозионному разрушению материала, увеличению гидравлического сопротивления элементов трубопроводов и систем в целом, что неблагоприятно отражается на работе оборудования. Исследованию количественных показателей кавитационного шума и эрозии и борьбы с ними посвящено большое количество работ, из которых отметим [1, 2].

В то же время накоплен опыт по использованию гидродинамической кавитации для интенсификации технологических процессов: в машиностроении – по очистке различных поверхностей от загрязнений и ржавчины; в металлургии – по удалению вторичной окислы при горячей прокатке; в химической промышленности – по эмульгированию жидкостей и диспергации; в горнодобывающей отрасли – для бурения скважин [3].

Первое направление решения этих задач связано с новым способом получения дискретно-импульсной энергии большой мощности в потоке жидкости с использованием кавитационного генератора высокоамплитудных колебаний жидкости в диапазоне звуковых частот.

Другое направление связано с использованием разрушительной силы кавитации. Для этого используются насадки специальной геометрии, способные вызвать взрывчатый рост микроскопических полостей внутри жидкости и их схлопывание на поверхности, подлежащей разрушению. Поскольку энергия схлопывания концентрируется на микроскопической площади, в процессе разрушения такой полости возникают исключительно высокие и очень сконцентрированные напряжения.

Для получения водяных струй повышенной разрушительной способности используются различные средства, в том числе преднамеренное возбуждение кавитации. Это достигается, как и в случае использования генератора, за счет соответствующей геометрии конструкции без использования каких-либо движущихся частей и дополнительных источников энергии.

Так, при экспериментальном исследовании кавитационного течения в гидравлическом канале типа трубки Вентури было установлено, что в зависимости от её геометрических параметров (при постоянных давлениях на входе  $\bar{P}_1$  и выходе из нее  $\bar{P}_2$ ) в ней может реализоваться периодически-срывное течение, при котором оседлая каверна растет до максимальных размеров, а потом происходит отрыв всей ее диффузорной части [4]. Отличительной особенностью такого кавитационного течения, как показали проведенные ранее исследования, являются стабильность частоты отрыва и схлопывания (в потоке, а не на стенке) кавитационной каверны большого объема, расположенной в диффузоре. Для реализации течения, при котором возникают высокие амплитуды колебаний давления в трубопроводе за трубкой Вентури, необходимо,

чтобы угол раскрытия диффузора был  $\beta > 15^\circ$ , и отношение диаметра выходного сечения диффузора к диаметру критического сечения было  $\approx 4,0$  [5]. При таких геометрических соотношениях, в зависимости от угла раскрытия диффузора, режим периодически-срывной кавитации может реализоваться при отношении давления на выходе из трубки к давлению на входе в нее в диапазоне значений 0,02-0,80.

В качестве примера на рис. 1 (справа) приведена копия участка осциллограммы с записью параметров кавитационных автоколебаний, реализовавшихся в гидравлической системе, включающей трубку Вентури специальной геометрии (генератор колебаний давления жидкости [5]). Здесь же (слева) представлена копия участка кинограммы с кавитационным течением в генераторе и трубопроводе за ним.

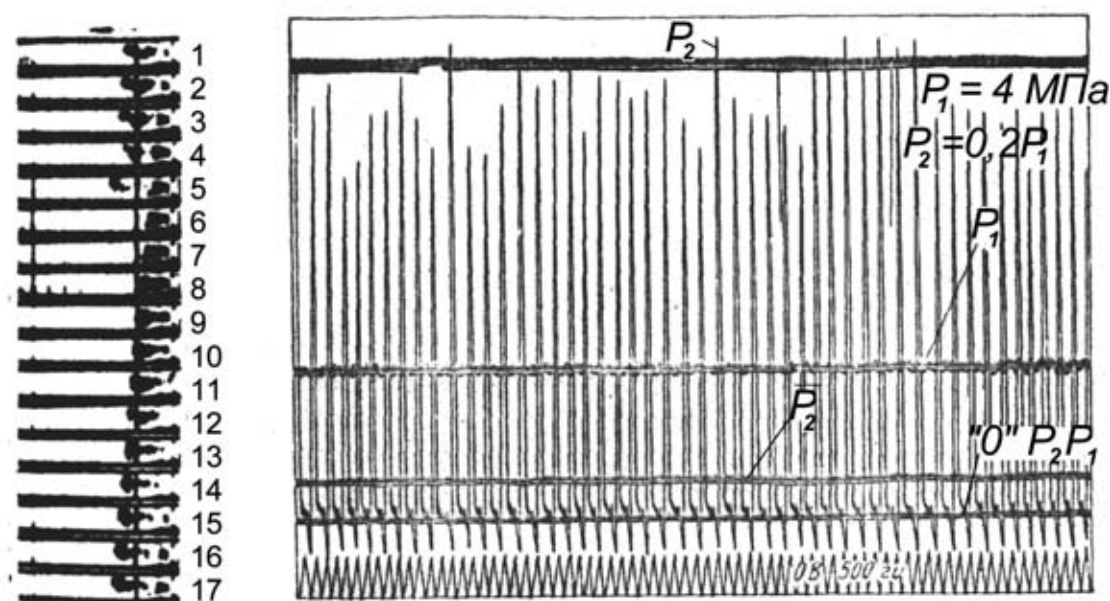


Рис. 1 – Копии участков осциллограммы и кинограммы кавитационных автоколебаний и течения в генераторе и трубопроводе за ним

Экспериментально были установлены характерные особенности течения в системе «кавитирующее местное сопротивление – выходной трубопровод». К этим особенностям относится, прежде всего, отсутствие зависимости частоты колебаний от длины выходного трубопровода за местным сужением, которое указывает на неакустическую природу высокочастотных кавитационных колебаний. Последнее обстоятельство наиболее интересно и важно, поскольку при изменении длины выходного трубопровода акустическая частота колебания при прочих равных условиях изменяется согласно зависимости  $f_1 / f_2 = l_1 / l_2$ . Частота и «двойная амплитуда» высокочастотных кавитационных колебаний определяются формой, геометрическими и режимными параметрами местного сужения. Под «двойной амплитудой», вследствие негармонической формы колебаний, понимается величина  $\Delta P_2 = P_{2max} - P_{2min}$ , где  $P_{2max}$  – макси-

мальное значение давления в импульсе за трубкой Вентури;  $P_{2min}$  – минимальное значение давления в импульсе.

Визуальные исследования физической картины кавитационного течения в трехмерных трубках Вентури с применением скоростной киносъемки [6] показали, что при возникновении кавитации каверна появляется на входе в цилиндрический участок с  $d = d_{кр}$ . При уменьшении отношения давлений  $\bar{P}_2/\bar{P}_1$  длина кавитационной каверны увеличивается, она распространяется на всю длину канала с  $d = d_{кр}$ , а потом выходит в диффузор. При фиксированном значении давления  $\bar{P}_2$  на выходе из трубки происходит рост каверны до максимальной длины, которая отвечает этому отношению давлений, а потом вся каверна отрывается, сносится вниз по потоку и в зоне повышенного давления захлопывается.

Процесс отрыва и схлопывания части каверны, находящейся в диффузоре, на определенном режиме происходит строго периодически, то есть со стабильной частотой в несколько сотен Гц.

Частота колебаний давления в гидравлической системе, определенная по осциллограммам записи давлений, и частота отрыва части каверны, которая находится в диффузоре, определенная по меткам времени на киноплёнках скоростной киносъемки, полученным на испытаниях трубки Вентури при разных значениях отношения  $\bar{P}_2/\bar{P}_1$ , удовлетворительно согласуются, что позволяет сделать вывод о том, что аномально высокие периодические импульсы давления в жидкости при кавитации в местных сужениях типа трубки Вентури обусловлены режимом периодически-срывной кавитации, при котором формируются, а потом отрываются, сносятся по потоку и захлопываются в центре потока жидкости большие объемы каверны.

При схлопывании каверн большого объема в потоке жидкости возникают высокие давления. Волна давления от центра схлопывания распространяется по потоку на довольно большие расстояния, практически не затухая (в экспериментах до 2,0 метров). Волна давления, которая распространяется против потока, демпфируется выросшей к этому моменту новой каверной, о чем свидетельствует отсутствие колебаний на входе в трубку Вентури (см. рис. 1). Она принимает участие в формировании обратных течений и создает условия для отрыва следующей каверны. Таким образом, устанавливается процесс отрыва и схлопывания каверн, который самосинхронизируется.

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 [4]:

$$f = Sh_m \sqrt{\frac{2(P_1 - P_s)}{\rho}} \times \frac{tg \frac{\beta}{2}}{r_{кр} \left( \sqrt{\frac{\mu}{1 - \sqrt{1 - \tau}}} - 1 \right)}, \quad (1)$$

где  $Sh_m$  – модифицированное число Струхаля;  $P_1$  и  $P_S$  – давление на входе в трубку Вентури и в кавитационной плоскости соответственно;  $r_{кр}$ ,  $\mu$  – радиус критического сечения и коэффициент расхода трубки Вентури соответственно;  $\tau$  – параметр кавитации, определяемый как отношение давлений на выходе  $P_2$  к давлению на входе  $P_1$  в трубку Вентури,  $\beta$  – угол раскрытия диффузора.

Результаты расчета [4] частот автоколебаний, проведенные по формуле (1), дали удовлетворительное согласование с экспериментальными данными, что подтвердило неакустическую природу этих колебаний.

Эффективность применения технологий с использованием пульсирующих и кавитирующих струй доказана в рамках проведения научно-исследовательской работы на Одесском судоремонтном заводе в 1984-1986 гг. [7].

Задача заключалась в том, чтобы создать на базе существующих гидродинамических устройств установку для очистки корпусов судов, существенно превосходящую применяющиеся в указанное 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%).

При проведении сравнительных экспериментальных исследований в качестве базовой использовалась установка для ручной гидродинамической очистки «WOMA-ATUMAT».

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.

Следует отметить, что создание пульсирующей струи при помощи механических пульсаторов имеет ряд недостатков [7]. Используя кавитационный генератор, создающий кавитационные автоколебания перед соплом гидропистолета, можно получить пульсирующие струи с высокой кинетической энергией в устройстве, лишенном недостатков, присущих механическим пульсаторам. Это позволит получить высокую степень очистки без увеличения давления.

Для этого было разработано устройство, включающее в себя гидропистолет от установки «WOMA-ATUMAT», в удлиненный трубопровод которого был установлен кавитационный генератор импульсов давления жидкости на определенном расстоянии от соплового насадка.

При проведении исследований было установлено, что в диапазоне  $\tau = 0,10 \div 0,85$  в трубопроводе гидропистолета за трубкой Вентури генерируются колебания жидкости импульсного характера с широким частотным спектром. В качестве примера на рис. 2 приведена зависимость  $\Delta P_2(f)$  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 наблюдается 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.

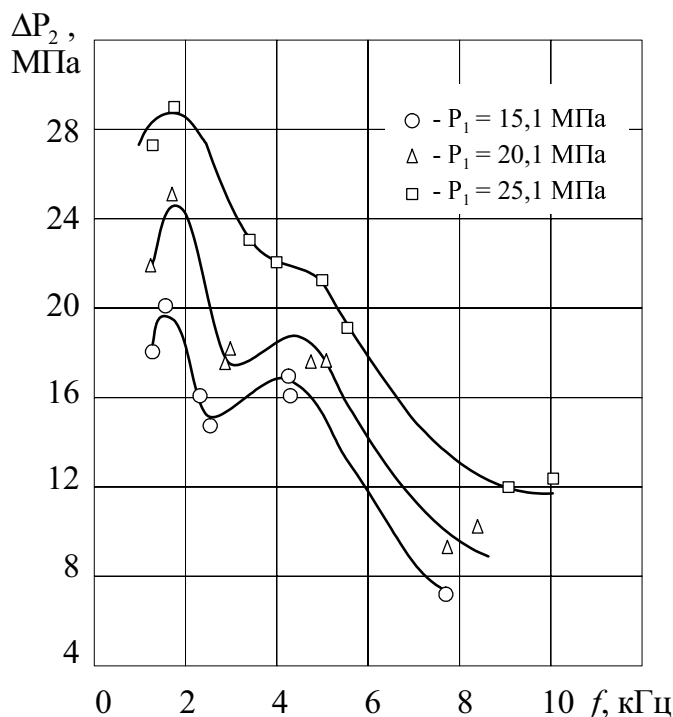


Рис. 2 – Зависимость  $\Delta P_2(f)$  для генератора импульсов давления

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 при входном давлении  $P_1 = 10$  МПа струя очищала наросты ракушки с расстояния 1500 мм. При повышении давления на входе  $P_1$  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  $P_1 = 30$  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, вызывая мест-

ное повышение давления на поверхности, которая подлежит очистке.

В [2] приведена формула для значения давления в месте схлопывания каверны без учета сжимаемости жидкости, содержимого каверны, рассеивания энергии в виде волн сжатия и других эффектов, которые наблюдаются при схлопывании

$$P' = \rho C \Delta u,$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $C$  – скорость звука в стенке кавитационного пузырька;  $u$  – скорость движения стенки пузырька.

Эта формула совпадает с формулой Жуковского для прямого гидравлического удара.

Для большинства жидкостей скорость звука не превосходит значения 1656 м/с. При дозвуковых скоростях схлопывания, расчетные значения давления в месте схлопывания достигают величины  $3 \cdot 10^5$  МПа. В этой же книге приведены результаты экспериментального определения величины давления в жидкости при схлопывании кавитационной каверны, выполненные Хэррисоном. Он пришел к выводу, что в центре схлопывания давление достигает 400 МПа.

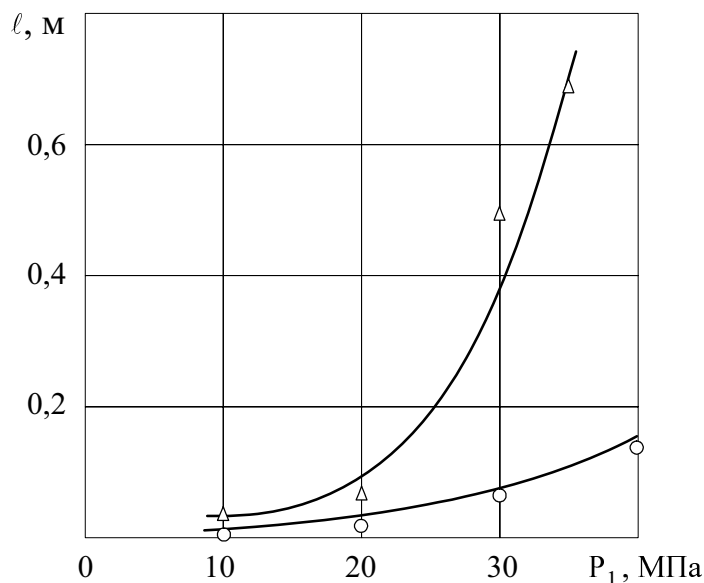
Поскольку энергия схлопывания каждого пузырька сконцентрирована на микроскопической площади, во время схлопывания возникают чрезвычайно высокие и очень локализованные механические напряжения. Это локальное увеличение давления дает кавитирующей струе большое преимущество по сравнению со стационарной струей, работающей при том же самом давлении и расходах жидкости через насос.

На рис. 3 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  $P_1 = 35$  МПа струя очищала поверхность до металла с расстояния до 700 мм, а при  $P_1 = 10$  МПа тот же эффект достигался с расстояния 20 мм.

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 устройство 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.



$\Delta$  – генератор без сопла;  $\circ$  – генератор с соплом  $d_c = 3,0$  мм

Рис. 3 – 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

Эффективность промышленных технологий с использованием гидродинамической кавитации также подтверждена разработками способов и устройств по интенсификации: гидросбива окалины при прокатном производстве металла (Орско-Халиловский меткомбинат); процессов бурения за счет создания на буровом инструменте виброускорений (ПГО «Степьгеология», ПО «Севзапгеология», СКБ НПО «Геотехника»), а также в технологических процессах приготовления буровых и цементных растворов, эмульсий, производства красок, диспергирования двуокиси титана, раскольматации водных и серных скважин.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. З.С. Арзуманов. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. М., Энергия, 1978. 303 с.
2. Р. Кнэпп. Дж. Дейли, Ф. Хеммит. Кавитация. М., "Мир", 1974.
3. V.V. Pilipenko, I.K. Man'ko, V.A. Zadontsev. Cavitation self-oscillations intensify technological processes. Proceedings of a Fluid Dynamics Panel Workshop. Kiev, Ukraine. Report 827, 1998, – P.32-1–32-4.
4. В.В. Пилипенко, В.А. Задонцев, И.К. Манько, Н.И. Довготько. Исследование высокочастотных кавитационных автоколебаний в гидравлической системе с трубкой Вентури. – В кн. "Кавитационные автоколебания в насосных системах", ч.2. Киев, Наукова думка, 1976. – С. 103-113.
5. 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.
6. Манько И.К. Визуальные исследования кавитационных автоколебаний в гидравлической системе с прозрачной трубкой Вентури. – В кн.: Кавитационные автоколебания в насосных системах. ч.2. Киев, Наукова думка, 1976. – С.113-118.
7. 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.