

УДК 622.831.322:532.538

Ю. А. ЖУЛАЙ

Институт транспортных систем и технологий НАН Украины

## О ПАРАДОКСЕ ВЛИЯНИЯ ОБЪЕМНОГО РАСХОДА ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ КАВИТАЦИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР НА РАЗМАХ КОЛЕБАНИЙ

В работе установлено, что увеличение объемного расхода жидкости через генератор приводит к росту объема оторвавшейся части кавитационной каверны. Схлопывание большего объема каверны не сопровождается увеличением колебательной составляющей давления, что представляет собой парадокс. С физической точки зрения и с позиции линейной математической модели генератора дано объяснение существующему парадоксу. Он обусловлен тем, что при постоянных соотношениях геометрических параметров генератора величина размаха кавитационных автоколебаний определяется не объемом каверны, а скоростью движения ее стенки.

**Ключевые слова:** гидродинамическая кавитация, генератор колебаний давления жидкости, размах колебаний давления, скорость движения стенки каверны.

### Постановка проблемы и её связь с научно-техническими задачами

Одним из перспективных направлений снижения удельного энергопотребления в различных отраслях промышленности является использование эффектов гидродинамической кавитации. Известны работы [1, 2], в которых приведены примеры практического использования кавитационного генератора колебаний давления жидкости [3] (далее генератор). Он представляет собою трубку Вентури, используемую в системе регулирования топлива ракетного двигателя, но со специальной геометрией. Установлено, что при углах раскрытия диффузора  $\beta > 16^\circ$  (в регуляторах расхода  $\beta < 9^\circ$ ) такое устройство, преобразующее стационарное течение жидкости в кавитационный дискретно-импульсный поток, генерирует высокочастотные колебания давления в диапазоне частот от 100 до 15000 Гц. При определенном значении давления подпора  $P_n$  создаются импульсы давления жидкости, в несколько раз превышающие по величине давление на входе в генератор  $P_n$ .

Схема такого генератора, с условным изображением кавитационного течения в нем, представлена на рисунке 1. Он обладает простотой изготовления, отсутствием подвижных частей, не требует дополнительных источников энергии и органично вписывается в существующее оборудование. Указанный генератор прошел комплекс теоретических и экспериментальных автономных исследований не только на гидравлических стендах [4, 5], но и в промышленных условиях [1, 2], и подтвердил свою эффективность. Использование генератора в этих слу-

чаях позволяет снизить удельное энергопотребление до 50%.

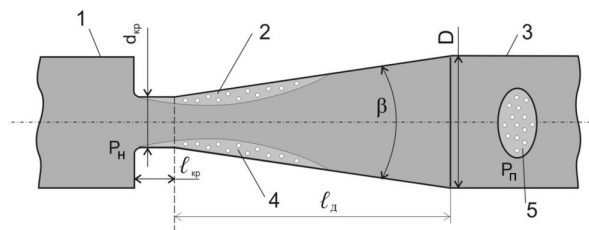


Рис. 1. Схема кавитационного генератора:

1 – входной трубопровод; 2 – генератор; 3 – выходной трубопровод; 4 – кавитационная зона; 5 – оторвавшаяся часть каверны;  $d_{кр}$  – диаметр критического сечения;  $l_{кр}$  – длина цилиндрического участка критики;  $l_d$  – длина диффузора,  $D$  – выходной диаметр диффузора

Однако исследование влияния объемного расхода жидкости через генератор на колебательную составляющую давления, реализуемую им, по-прежнему остается **актуальной научно-технической задачей**. Это связано с тем, что при разработке нового оборудования или его модернизации с использованием генератора именно колебательная составляющая давления наряду с колебаниями объемного расхода позволяет выполнить оценку энергетических характеристик дискретно-импульсного воздействия технологической жидкости и определить его преимущества по сравнению со статическим нагнетанием.

## 1. Анализ последних исследований и определение влияния объемного расхода жидкости на колебания давления

В работах [1, 2, 4, 5] приведены экспериментальные данные исследований кавитационных колебаний, реализуемых генераторами с диаметрами критического сечения  $d_{кр}$  в диапазоне от 2,5 до 14 мм. Их анализ позволяет сформулировать предположение, что уровень этих колебаний определяется давлением нагнетания жидкости  $P_n$  и параметром кавитации  $\tau$  и не зависят от значения объемного расхода жидкости.

Параметр кавитации определяется как отношение давления подпора  $P_n$  к давлению нагнетания  $P_H$ , т.е.

$$\tau = \frac{P_n}{P_H}.$$

Вследствие негармонической формы колебаний при экспериментальных исследованиях использовалась величина размаха  $\Delta P = P_{max} - P_{min} = 2\delta P$ , где  $P_{max}$  и  $P_{min}$  – максимальное и минимальное значения давления в импульсе за генератором, а  $\delta P$  – теоретическое значение амплитуды колебаний.

Объектом исследования в данной работе являются колебательные составляющие давления жидкости, реализуемые генераторами с геометрическими и режимными параметрами, приведенными в таблице 1.

Таблица 1  
Геометрические и режимные параметры генераторов

Геометрические параметры			
$d_{кр}$ , мм	2,5	4,0	6,0
$\beta^\circ$	20	20	20
$\ell_{кр}$ , мм	3,4	5,4	8,2
$D$ , мм	10	17	24
$\ell_d$ , мм	21,2	36,9	51,0
Режимные параметры			
$P_n$ , МПа	$Q \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$		
1	0,204	0,52	1,18
10	0,646	1,65	3,73
20	0,912	2,33	5,27
30	1,12	2,85	6,46

Для этих генераторов по результатам расчетов по линейной математической модели [4, 6] и экспериментального исследования построены совмещенные теоретические и экспериментальные зависимости размахов колебаний  $\Delta P$  от параметра кавитации  $\tau$ . Эти зависимости представлены на рисунке 2. Их анализ наглядно подтверждает, что размах давления

$\Delta P$  определяется давлением нагнетания жидкости  $P_n$  и параметром кавитации  $\tau$ . Влияние объемного расхода жидкости на значения размахов колебаний  $\Delta P$  отсутствует.

Так, например, при  $P_n=30$  МПа и при изменении  $d_{кр}$  от 2,5 до 6,0 мм значение объемного расхода жидкости выросло пропорционально росту проходного сечения генератора в 5,76 раза (от 1,12 до 6,46 л/с, см. табл. 1), а уровень размаха  $\Delta P$  не изменился.

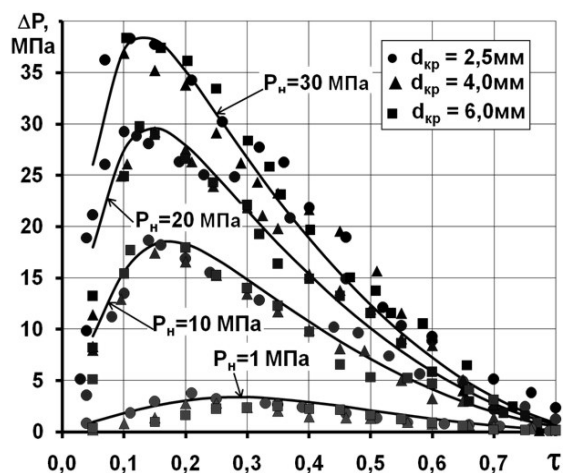


Рис. 2. Совмещенные теоретические и экспериментальные зависимости размахов колебаний  $\Delta P$  от параметра кавитации  $\tau$

Таким образом, установлен парадокс, что при фиксированных значениях давления нагнетания и параметра кавитации объемный расход жидкости через генератор не оказывает влияния на значения размахов колебательной величины давления  $\Delta P$ .

Целью предлагаемой работы является объяснение парадокса влияния объемного расхода жидкости через генератор на размах колебаний

## 2. Теоретическое определение амплитуды колебаний объема каверны

На первый взгляд этот парадокс связан с тем, что увеличение объемного расхода жидкости через генератор  $Q$  приводит к росту значения объема оторвавшейся части кавитационной каверны. Это зафиксировано визуальными исследованиями [5] и теоретическим определением амплитуды колебаний объема  $\delta V_k$ .

С учетом того, что объем оторвавшейся части каверны равен максимальному объему оседлой кавитационной каверны в момент отрыва и  $\ell_k \leq \ell_d$  (где  $\ell_k$  – осевая длина оседлой кавитационной каверны),  $\delta V_k$  определяется по выражению [4]

$$|\delta \bar{V}_k| = \frac{\pi \ell_k}{2} \left[ 3r_{кр}^2 (1 - \mu) + 3r_{кр} \ell_k \left( \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} - \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) + \ell_k^2 \left( \operatorname{tg}^2 \frac{\beta}{2} - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \right) \right], \quad \ell_k \leq \ell_d, \quad (1)$$

где  $r_{кр}$  – радиус критического сечения генератора;  
 $\mu$  – коэффициент расхода генератора;  
 $\alpha$  – угол расширения струи жидкости.

На режимах, когда захлопывание оторвавшейся части кавитационной каверны происходит в конце диффузора, ее длина определяется по формуле, приведенной в уточненной линейной математической модели генератора [6]

$$\ell_k = \frac{r_{кр}}{\operatorname{tg} \frac{\beta}{2}} \cdot \left( \sqrt{\frac{\mu}{1 - \sqrt{0,88 - \tau}}} - 1 \right). \quad (2)$$

Как видно из выражений (1) и (2), амплитуда колебаний объема  $\delta V_k$  при фиксированном значении угла раскрытия диффузора  $\beta$  определяется радиусом критического сечения генератора и режимом кавитационного течения жидкости, характеризующегося параметром кавитации  $\tau$ , и не зависит от давления нагнетания. Согласно (1) и (2), увеличение объемного расхода жидкости через генератор  $Q$  за счет роста значения  $r_{кр}$  приведет к увеличению значения амплитуды колебаний объема  $\delta V_k$ .

Это подтверждается зависимостями амплитуды колебаний объема оторвавшейся части кавитационной каверны от параметра кавитации  $\tau$ , приведенными на рисунке 3.

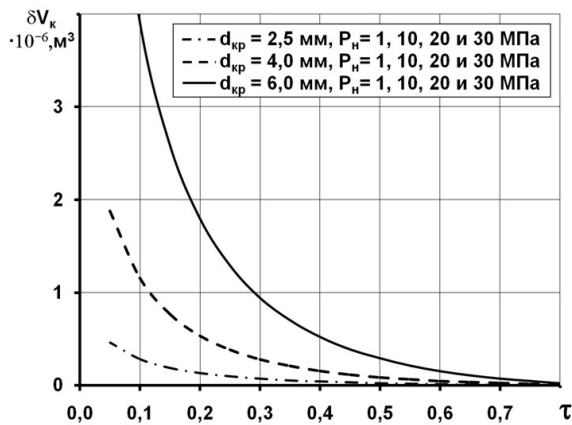


Рис. 3. Зависимость амплитуды колебаний объема кавитационной каверны  $\delta V_k$  от параметра кавитации  $\tau$

Расчеты были выполнены для генераторов с диаметрами критического сечения  $d_{кр} = 2,5, 4,0$  и  $6,0$  мм, геометрические параметры которых приведены в

таблице 1 при давлениях нагнетания  $P_n = 1, 10, 20$  и  $30$  МПа. Значения объемных расходов жидкости  $Q$  через эти генераторы при указанных  $P_n$  также приведены в этой таблице.

Из представленного рисунка следует, что при фиксированном значении параметра кавитации  $\tau$  увеличение  $d_{кр}$  (а, следовательно, и объемного расхода через него) приводит к росту значения  $\delta V_k$ .

В то же время при фиксированном значении  $d_{кр}$  изменение давления нагнетания в диапазоне от 1 до 30 МПа не оказывает влияния на значения амплитуды колебаний объема  $\delta V_k$ .

Казалось бы, схлопывание большего объема каверны при увеличении проходного сечения генератора должно привести к увеличению размаха колебаний  $\Delta P$ . Однако, как следует из рисунка 2, этого не происходит. Размах колебаний  $\Delta P$  определяется давлением нагнетания жидкости  $P_n$  и параметром кавитации  $\tau$  и не зависит от проходного сечения генератора, а, следовательно, и от объемного расхода жидкости через него. Другими словами, существует парадокс влияния объемного расхода жидкости через кавитационный генератор на колебательную составляющую давления на выходе из него.

### 3. Парадокс с физической точки зрения

Обобщая теоретические и экспериментальные исследования кавитации по величине давления, которое возникает при схлопывании кавитационных каверн, авторы работы [7] приводят формулу его определения

$$P' = \rho c \Delta u, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;

$c$  – скорость звука в жидкости;

$u$  – скорость движения стенки каверны.

Приведенная формула (3) определения величины давления в месте схлопывания каверны совпадает с формулой Жуковского для прямого гидравлического удара.

Скорость движения стенки каверны определяется как

$$u = \sqrt{2(P_n - P_k) / \rho_k}, \quad (4)$$

где  $\rho_k$  – плотность парогазовой смеси в каверне;

$P_k$  – давление в каверне.

Предполагая, что кавитационный пузырь в основном заполнен насыщенными парами жидкости, изменением плотности содержимого каверны можно пренебречь. Тогда скорость движения стенки пузыря, а, следовательно, и величина давления при его схлопывании зависят лишь от перепада давлений подпора  $P_n$  и в каверне  $P_k$ . При значениях  $P_n = 4$  МПа

и  $P_k = 0,0024$  МПа скорость движения стенки каверны, определенная по формуле (4), составляет 680 м/с. Тогда, давление в центре каверны при ее схлопывании, определенное в соответствии с (3) при  $c = 1200$  м/с и  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, равно 816 МПа.

Приведенное значение давления в центре схлопывания каверны соответствует диапазону значений, указанных в работе [7] и полученному рядом исследователей.

Однако такой метод расчета не учитывает сжимаемости жидкости, поверхностного натяжения и содержимого каверны, рассеивания энергии в виде волн сжатия–растяжения и других эффектов, наблюдаемых при схлопывании каверны. Следует также отметить, что экспериментальное определение размаха автоколебаний производилось путём измерения его значения на стенке выходного трубопровода. В [7] установлено, что в данном случае давление на стенке, в зависимости от диаметра трубопровода, уменьшается более чем на порядок по сравнению с давлением в центре схлопывания каверны.

Скорость движения стенки каверны можно определить по экспериментальным данным, которые учитывают все эффекты при ее схлопывании, в том числе и рассеивание энергии при достижении стенки выходного трубопровода.

В предположении, что каверна на выходе из диффузора генератора приобретает сферическую форму, скорость движения ее стенки по частоте колебаний определяется по формуле

$$u = \frac{r_{kv}}{T} = r_{kv} \cdot f, \quad (5)$$

где  $r_{kv}$  – радиус кавитационной каверны;

$T$  и  $f$  – период и частота колебаний.

При давлении на входе в генератор  $P_n = 20$  МПа и параметре кавитации  $\tau = 0,2$  радиус кавитационной каверны  $r_{kv}$  и частота ее схлопывания  $f$  [8] для генератора с  $d_{кр} = 2,5$  мм составляют 3,14 мм и 2622 Гц, а при  $d_{кр} = 6,0$  мм –  $r_{kv} = 7,53$  мм и  $f = 1245$  Гц соответственно. Скорость движения стенки каверны, определенная по (5), при указанных значениях  $P_n$  и  $\tau$  составляет  $u = 8,23$  м/с для  $d_{кр} = 2,5$  мм и  $u = 9,37$  м/с для  $d_{кр} = 6,0$  мм. Значения давлений, которые возникают на стенке выходного трубопровода при схлопывании каверн для указанных генераторов, рассчитанные по формуле (3) при  $c = 1200$  м/с и  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, составляют 9,88 МПа и 11,24 МПа. Однако, эти значения существенно отличаются от теоретических значений и экспериментальных данных по размаху колебаний  $\Delta P$ , приведенных на рис. 2. Так, при давлении  $P_n = 20$  МПа и  $\tau = 0,2$  для генераторов с  $d_{кр} = 2,5$  и 6,0 мм значения размахов колеба-

ний  $\Delta P$  составляют 27,8 МПа, что существенно превышает значения давлений, полученные по формуле (3).

Обстоятельства, которые вызывают расхождение в расчетных значениях размаха  $\Delta P$  по уточненной модели [6] (удовлетворительно согласующихся с экспериментальными данными) и по формуле (3), были изучены при анализе характера колебательного процесса на выходе из диффузора генератора по результатам их автономных испытаний.

Анализ результатов этих испытаний показал, что время схлопывания каверны не соответствует периоду кавитационных колебаний. Это наглядно видно из фрагмента осциллограммы колебаний давления жидкости и из поясняющего графического изображения к ней, представленных на рисунке 4.

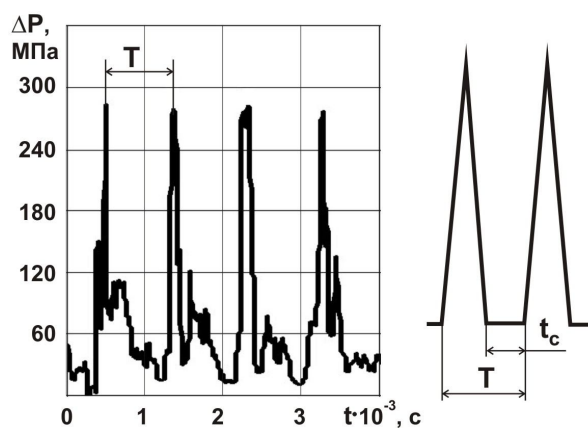


Рис. 4. Фрагмент осциллограммы записи давления  $\Delta P$  на выходе из генератора с  $d_{кр} = 6,0$  мм при  $P_n = 20$  МПа

Как видно из осциллограммы, характер колебательного процесса указывает, что в проточной части генератора реализуется режим периодически срывающегося кавитационного течения и возникают колебания давления и расхода жидкости, обусловленные схлопыванием кавитационных каверн. Размах автоколебаний  $\Delta P$  носит ударный характер с явно выраженной скважностью. Графическое изображение такого процесса показывает, что время схлопывания каверны на выходе из диффузора генератора определяется как

$$t_{cx} = T - t_c, \quad (6)$$

где  $t_c$  – длительность скважности, которая изменяется по неизвестному нам закону от давления подпора.

Теоретическое определение времени схлопывания каверны связано с большим объемом работ по численному интегрированию системы дифференциальных уравнений, описывающих нестационарное движение жидкости на участке диффузора генератора, где схлопывается каверна, и в выходном тру-

бопроводе. Следует также принять к сведению, что такое определение  $t_{cx}$  тоже не учитывает сжимаемости жидкости, содержимого каверны и других эффектов, наблюдаемых при схлопывании каверны.

Учитывая вышеизложенное, определение  $t_{cx}$  при  $P_n=20$  МПа и  $\tau=0,2$  было выполнено по осциллограммам путем их “растяжек” по временной оси. Было установлено, что при указанных режимных параметрах время схлопывания каверны примерно равно  $134 \cdot 10^{-6}$  с и  $325 \cdot 10^{-6}$  с для генератора с  $d_{кр}=2,5$  и 6 мм соответственно. Тогда скорость движения стенки каверны, определенная как

$$u = \frac{r_{kv}}{t_{cx}} \quad (7)$$

для указанных значений  $d_{кр}$  генератора, одинакова и составляет 23,3 м/с. Соответственно и величины давления, рассчитанные по (3), равны для обоих случаев и составляют примерно 28 МПа. Приведенное значение давления соответствует значению, определенному по уточненной линейной математической модели генератора [6] и экспериментальным данным, представленным на рисунке 2.

Таким образом, с физической точки зрения установлено, что величина импульса давления на стенке выходного трубопровода, обусловленная схлопыванием кавитационной каверны, не зависит от ее размера, а определяется скоростью движения стенки каверны.

#### 4. Парадокс с позиции линейной математической модели генератора

Для понимания отсутствия влияния объемного расхода жидкости на размах колебаний с позиции существующей линейной математической модели дополнительно рассмотрим структуру формулы по определению амплитуды, записав ее в виде [4]

$$|\delta P_1| = \rho \cdot v_{кр}^2 (2\pi)^2 Sh_M^2 A, \quad (8)$$

где скорость жидкости в критическом сечении генератора определяется по известной формуле

$$v_{с.кр} = \sqrt{2(P_n - P_k)/\rho}, \quad (9)$$

а безразмерный коэффициент

$$A = \frac{I_d}{\sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 \cdot v_{кр}^2 \cdot I_d^2 \cdot F_2^2}{\ell_k^2 \cdot c^2}}} \cdot \frac{|\delta V_k|}{\ell_k^2}, \quad (10)$$

где  $F_2$  – площадь выходного сечения диффузора генератора;

$I_d$  – коэффициент инерционного сопротивления участка диффузора генератора колебаний, расположенного между новой оседлой каверной и выходом из диффузора, и определяется по формуле [4]

$$I_d = \frac{1}{\pi \cdot \lg \frac{\beta}{2}} \cdot \left[ \frac{1}{r_{кр} + \ell_k \cdot \lg \frac{\beta}{2}} - \frac{1}{r_{кр} + \ell_d \cdot \lg \frac{\beta}{2}} \right]. \quad (11)$$

$Sh_M$  – число Струхала, которое с учетом степени развития кавитации, вычисляется как [6]

$$Sh_M = \sqrt{1 - \sqrt{0,88 - \tau}} - \frac{1}{\sqrt{\mu}} (1 - \sqrt{0,88 - \tau}). \quad (12)$$

Входящие в выражение (10) амплитуда колебаний объема  $\delta V_k$  и осевая длина каверны  $\ell_k$  определяются формулами (1) и (2).

На рисунке 5 представлены расчетные зависимости значений коэффициента  $A$  от параметра кавитации  $\tau$  для генераторов с диаметрами критического сечения  $d_{кр}=2,5; 4,0$  и  $6,0$  мм при давлениях на входе  $P_n=30, 20, 10$  и  $1,0$  МПа. Расчеты были проведены при угле расширения струи  $\alpha = 1,35^\circ$ , скорости звука в жидкости  $c = 1200$  м/с, коэффициенте расхода жидкости  $\mu = 0,95$  и давлении насыщенных паров  $P_k = 0,0024$  МПа.

Характер зависимостей нелинейный, с ярко выраженным максимумом.

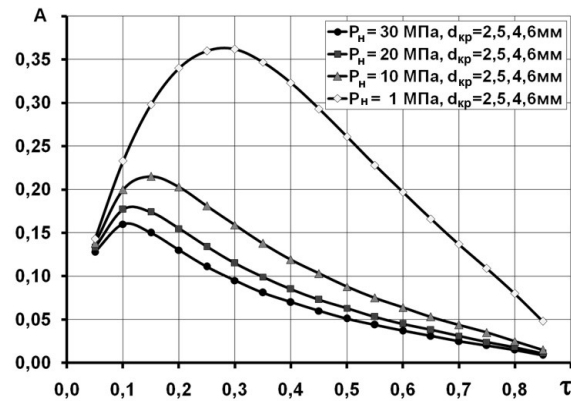


Рис. 5. Зависимость расчетных значений коэффициента  $A$  от параметра кавитации  $\tau$

Расчеты коэффициента  $A$  показали, что при фиксированных значениях давления нагнетания и параметра кавитации его значения не зависят от диаметра критического сечения генератора, а, следовательно, и объемного расхода жидкости через него.

Это объясняется тем, что при угле раскрытия диффузора  $\beta = 20^\circ$  соотношения геометрических па-

раметров генераторов  $\ell_{кр}/d_{кр}$ ,  $D/d_{кр}$  и  $\ell_d/d_{кр}$  постоянны и примерно равны 1,36, 4,0, и 8,5 соответственно. Эти соотношения выбираются в соответствии с рекомендациями работ [1÷3] с целью реализации максимальных амплитуд колебаний  $\Delta P_{max}$  в гидравлической системе за генератором. При давлениях нагнетания жидкости  $P_n = 1, 10, 20$  и  $30$  МПа максимальные значения коэффициента  $A$  лежат вблизи значений параметра кавитации  $\tau = 0,28, 0,16, 0,13$ , и  $0,11$ . Это соответствует результатам  $\Delta P_{max}$ , приведенным на рисунке 2.

Анализ входящих в выражение (8) скорости жидкости в критическом сечении генератора (9) и числа Струхала (12) показывает, что  $v_{с.кр}$  определяется давлением нагнетания жидкости  $P_n$  при постоянных значениях  $P_k$  и  $\rho$ , а  $Sh_m$  – параметром кавитации  $\tau$ .

Таким образом, установлено, что при постоянных соотношениях геометрических параметров генераторов  $\ell_{кр}/d_{кр}$ ,  $D/d_{кр}$  и  $\ell_d/d_{кр}$ , его проходное сечение, а, следовательно, и объемный расход жидкости через него не оказывают влияния на величину размаха кавитационных автоколебаний. Он определяется давлением нагнетания жидкости на входе в генератор  $P_n$  и режимом периодически срывного кавитационного течения жидкости, т.е. параметром кавитации  $\tau$ .

### Заключение

По результатам выполненного исследования можно сформулировать следующие выводы:

1. Увеличение объемного расхода жидкости через генератор (за счет его проходного сечения) приводит к росту значения объема оторвавшейся части кавитационной каверны. Схлопывание большего объема каверны не сопровождается увеличением размаха колебаний давления, что представляет собой парадокс, требующий своего объяснения.

2. С физической точки зрения и с позиции существующей линейной математической модели генератора существующий парадокс, обусловлен тем, что:

- величина давления, которое возникает при схлопывании каверны, не зависит от ее размера, а определяется скоростью движения стенки каверны;

- при постоянных соотношениях геометрических параметров генератора величина размаха кавитационных автоколебаний определяется давлением нагнетания жидкости на входе и режимом периодически срывного кавитационного течения жидкости, т.е. параметром кавитации.

Следует отметить, что энергетику дискретно-импульсного воздействия жидкости в любом технологическом процессе определяет не только размах колебаний давления, а и колебательная составляющая объемного расхода. В связи с этим, предполагается выполнить исследования по оценке влияния объемного расхода жидкости генератора на его колебательную составляющую и на энергетические характеристики дискретно-импульсного воздействия технологической жидкости.

### Литература

1. Pilipenko, V. V. Cavitation self-oscillations intensify technological processes [Текст] / V. V. Pilipenko, I. K. Man'ko, V. A. Zadontsev // *Proceedings of a Fluid Dynamics Panel Workshop*. – Kiev, Ukraine. Report 827, 1998. – P. 32-1–32-4.

2. Кавитация как средство интенсификации технологических процессов. Опыт применения и перспективы (Обзор) [Текст] / Ю. А. Жулай, В. Ю. Скосарь // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – Вып. 8(105). – С. 7–15.

3. А.с. 504444 СССР, МКИ В 06 В 1/18. Генератор колебаний давления воды [Текст] / В. В. Пилипенко, В. А. Задонцев, И. К. Манько, Н. И. Довгого, В. А. Дрозд (СССР). – №1782997; заявл. 06.05.72; опубл. 05.02.76, Бюл. № 9.

4. Пилипенко, В. В. Кавитационные автоколебания [Текст] : моногр. / В. В. Пилипенко. – К. : Наукова думка, 1989. – 316 с.

5. Манько, И. К. Визуальные исследования кавитационных автоколебаний в гидравлической системе с прозрачной трубкой Вентури [Текст] / И. К. Манько // *Кавитационные автоколебания в насосных системах : сб. науч. тр. Наукова думка*. – К., 1976. – Ч. 2. – С. 113 - 118.

6. Уточнение линейной математической модели кавитационного генератора колебаний давления жидкости [Текст] / Ю. А. Жулай // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 7/114. – С. 21-26

7. Кнэпп, Р. Кавитация [Текст] : моногр. / Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хеммит. – М. : Мир, 1974. – 687 с.

8. Жулай, Ю. А. Разработка расчетно-экспериментального метода определения частот кавитационных колебаний [Текст] / Ю. А. Жулай, А. С. Ворошилов, С. В. Комаров // *Зб. наук. пр. НГУ України*. – Дніпро, 2015. – № 48. – С. 140-146.

### References

1. Pilipenko, V. V., Man'ko, I. K., Zadontsev, V. A. Cavitation self-oscillations intensify technological processes. *Proceedings of a Fluid Dynamics Panel Workshop*, Kiev, Ukraine. Report, no. 827, 1998, pp. 32-1–32-4.

2. Zhulaj, Ju. A., Skosar', V. Ju. Kavitacija kak sredstvo intensifikacii tehnologicheskikh processov. Opyt primeneniya i perspektivy (Obzor) [Cavitation as a mean of manufacturing process. Experience and prospects (Overview)], *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*, 2013, vol. 8(105), pp. 7–15.

3. Pilipenko, V. V., Zadoncev, V. A., Man'ko, I. K., Dovgot'ko, N. I., Drozd, V. A. *Generator kolebanij davlenija vody* [Water pressure fluctuations generator], USSR Author's certificate, no. 504444 SSSR, MKI V 06 1/18. Applied 06.05.1972, published 05.02.76, bulletin no 9.

4. Pilipenko, V. V. *Kavitacionnye avtokolebanija* [Cavitational oscillations]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1989. 316 p.

5. Man'ko, I. K. Vizual'nye issledovanija kavitacionnyh avtokolebanij v gidravlicheskoj sisteme s prozrachnoj trubkoj Venturi [Visual observations of cavitational self-oscillations in hydraulic system with

transparent Venturi tube]. *Kavitacionnye avtokolebanija v nasosnyh sistemah* : Zb. nauch. Tr – *Cavitation self-oscillations in pump systems: Collected papers*, Kiev, Naukova dumka Publ., 1976, part 2, pp. 113 - 118.

6. Zhulaj, Ju. A. Utochnenie linejnoy matematicheskoj modeli kavitacionnogo generatora kolebanij davlenija zhidkosti [Refining of linear mathematical model of fluid pressure cavitation generator]. *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*. 2014. vol. 7/114, pp. 21-26.7.

7. Knepp, R., Dejli, Dzh., Hemmit, F. *Kavitacija* [Cavitation]. Moscow, Mir Publ., 1974, 687 p.

8. Zhulaj, Ju. A., Voroshilov, A. S., Komarov, S. V. Razrabotka raschetno-jeksperimental'nogo metoda opredelenija chastot kavitacionnyh kolebanij [Development of calculation-experimental methods of definition of cavitation oscillations frequencies] *Zb. nauk. pr. NGU Ukraïni Dnipro*, 2015, no. 48, pp. 140-146.

*Поступила в редакцию 31.01.2017, рассмотрена на редколлегии 15.02.2017*

#### ПРО ПАРАДОКС ВПЛИВУ ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ РІДИНИ ЧЕРЕЗ КАВІТАЦІЙНИЙ ГЕНЕРАТОР НА РОЗМАХ КОЛИВАНЬ

*Ю. О. Жулай*

У роботі встановлено, що збільшення об'ємної витрати рідини через генератор призводить до зростання об'єму частини кавітаційної каверни, що відірвалася. Згортання більшого об'єму каверни не супроводжується збільшенням коливальної складової тиску, що представляє собою парадокс. З фізичної точки зору і з позиції лінійної математичної моделі генератора дано пояснення існуючому парадоксу. Він обумовлений тим, що при постійних співвідношеннях геометричних параметрів генератора величина розмаху кавітаційних автоколивань визначається не об'ємом каверни, а швидкістю руху її стінки.

**Ключові слова:** гідродинамічна кавітація, генератор коливань тиску рідини, розмах коливань тиску, швидкість руху стінки каверни.

#### ON A PARADOX OF INFLUENCE OF VOLUMETRIC FLUID DISCHARGE THROUGH THE CAVITY GENERATOR ON OSCILLATION AMPLITUDE RANGE

*Ju. A. Zhulay*

In the paper it was established that increase of volumetric fluid discharge through the generator leads to the increase of volume of separated part of the cavity. Collapse of large volume cavity is not accompanied by the oscillatory component of pressure that is a paradox. This paradox is explained from the physical point of view and from standpoint of existing linear mathematical model of the generator. This is due to the fact that at constant ratio of geometrical parameters of the generator the amplitude range of cavitation self-oscillations is defined by velocity of its wall and not by the cavern size.

**Keywords:** hydrodynamic cavitation, fluid pressure fluctuation generator, range of pressure fluctuations, velocity of cavern wall.

**Жулай Юрий Алексеевич** – канд. техн. наук, вед. науч. сотр., Институт транспортных систем и технологий НАНУ, Днепр, Украина, e-mail: zhulay@westa-inter.com.

**Zhulay Yuriy Alekseevich** – Doctor of Philosophy (tech. Sciences), leading researcher of the «Transmag» Institute of Transport System and Technologies of NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine, e-mail: zhulay@westa-inter.com.