

УДК 622.831.322:532.538

Ю. А. ЖУЛАЙ¹, Н. А. ДЗОЗ²¹ *Институт транспортных систем и технологий НАН Украины*² *Завод новых технологий, Днепр, Украина*

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАТОРА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСКРЕТНО-ИМПУЛЬСНОГО ПОТОКА ЖИДКОСТИ

Определено влияние параметров кавитационного генератора на колебательные составляющие давления и объемного расхода, а также на его энергетические характеристики. Показано, что колебательная составляющая давления не зависит от диаметра критического сечения генератора и определяется давлением нагнетания, а колебательная составляющая объемного расхода зависит как от диаметра критического сечения генератора, так и давления нагнетания. Установлено, что как увеличение объемного расхода жидкости через генератор, так и давления нагнетания приводит к росту значений потока энергии, обусловленного режимом периодически срывного кавитационного течения в гидравлическом канале генератора. При одинаковой энергетике жидкости, подаваемой на вход генератора, увеличение значения объемного расхода жидкости через него более эффективно по сравнению с ростом давления нагнетания на его вход.

Ключевые слова: гидродинамическая кавитация, кавитационный генератор колебаний давления жидкости, колебательные составляющие давления и объемного расхода, поток энергии.

Постановка проблемы и её связь с научно-техническими задачами

Одним из эффектов, сопровождающих гидродинамическую кавитацию, является механическое воздействие на материалы. Установлено три механизма разрушения материалов при таком воздействии:

- в результате взаимодействия с поверхностью ударных волн, расходящихся от центра схлопывания маленького пузырька [1];
- в результате образования микроструек жидкости с высокой кинетической энергией в процессе схлопывания каверны [1];
- вследствие организации аномально высоких амплитуд колебания давления жидкости в диапазоне звуковых частот при реализации в проточном канале гидравлического сопротивления специальной геометрии режима периодически срывного кавитационного течения [2].

В работах [2, 3] приведены примеры практической реализации третьего механизма при разработке энергосберегающих технологий с использованием генератора колебаний давления жидкости (в дальнейшем генератор) [4]. Указанный генератор прошел комплекс теоретических и экспериментальных исследований на гидравлических стендах и в промышленных условиях и подтвердил свою эффективность. Использование генератора в этих случаях позволяет снизить удельное энергопотребление до

50 %. Он представляет собою трубку Вентури, используемую в системе регулирования топлива ракетного двигателя. Установлено, что при углах раскрытия диффузора $\beta > 16^\circ$ (в регуляторах расхода $\beta < 9^\circ$) такое устройство реализует в своем проточном канале режим периодически срывного кавитационного течения. В результате этого возникают высокочастотные колебания давления в диапазоне частот от 100 до 15000 Гц и создаются импульсы давления жидкости (при определенном значении подпора P_n), в несколько раз превышающие по величине давление на выходе насосной установки P_n .

Схема такого генератора с условным изображением кавитационного течения в нем представлена на рис. 1.

Он обладает простотой изготовления, отсутствием подвижных частей, не требует дополнительных источников энергии и органично вписывается в существующее оборудование.

Однако исследование влияния параметров генератора на его энергетические характеристики по-прежнему остается **актуальной научно-технической задачей**. Это связано с тем, что именно энергетические характеристики дискретно-импульсного воздействия технологической жидкости определяют его преимущества по сравнению со статическим нагнетанием. Следует отметить, что на выбор параметров генератора, в зависимости от технологического процесса, где он применяется, могут накладываться определенные ограничения по давлению.

нию на входе или объемному расходу жидкости. Это связано с прочностными характеристиками материала или как, например, при импульсном гидрорыхлении угольного пласта, с глубиной залегания шахтного поля H и водопроницаемостью [3].

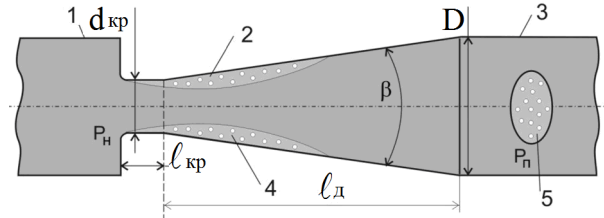


Рис. 1. Схема кавитационного генератора:
 1 – входной трубопровод; 2 – генератор;
 3 – выходной трубопровод; 4 – кавитационная зона;
 5 – оторвавшаяся часть каверны; $d_{кр}$ – диаметр критического сечения; $l_{кр}$ – длина цилиндрического участка критики; $l_{д}$ – длина диффузора;
 D – выходной диаметр диффузора

В этом случае как повышение объемного расхода через генератор выше гидравлической проницаемости пласта, так и давления нагнетания больше $0,75\gamma_p H$ ($\gamma=2,5\text{т/м}^3$ – удельный вес горных пород) может привести к его гидроотжиму с провоцированием выброса угля и газа и к катастрофическим последствиям.

1. Анализ последних публикаций. Объект исследования

Исследование энергетических характеристик дискретно-импульсного потока жидкости, реализуемого генератором, выполнено в ряде работ. Так в [5] представлена оценка энергетических характеристик стационарного и пульсирующего воздействия жидкости. В ней по Раушенбаху были рассчитаны потоки энергии и определен КПД генератора, входящего в состав устройства гидроимпульсного воздействия на угольный пласт (УГИВ). Установлено, что КПД генератора при режимах работы, обусловленных процессами периодически срывной кавитации, превышает КПД статического воздействия. Оценка эффективности генератора выполнена на примере его работы в составе УГИВ при проведении горно-экспериментальных работ по рыхлению выбросоопасных угольных пластов. Показано, что импульсное воздействие (при прочих равных условиях по давлению нагнетания и подпора) значительно эффективнее по сравнению со статическим нагнетанием и приводит к снижению энергозатрат.

Однако анализ литературных источников показывает, что в работах [2, 3, 5 и др.] исследовались конкретные устройства с фиксированными значениями диаметра критического сечения генератора, давления на входе и объемного расхода жидкости через него.

Целью исследования настоящей работы является оценка влияния параметров генератора на энергетические характеристики реализуемого дискретно-импульсного потока.

Под параметрами генератора подразумеваются:

- геометрические параметры (см. рис. 1) $d_{кр}$ – диаметр критического сечения, $l_{кр}$ – длина цилиндрического участка критики, $l_{д}$ – длина диффузора; D – выходной диаметр диффузора и β – угол раскрытия диффузора, равный 20° . Отношение $l_{кр} \cdot l_{д}$ и D к $d_{кр}$ для всех генераторов постоянно и выбирается из условия реализации максимального уровня колебаний давления жидкости при его работе в режиме периодически срывного кавитационного течения [4];
- режимные параметры – это давления нагнетания на входе в генератор P_n и подпора в выходном трубопроводе из него P_p (см. рис. 1), а также объемный расход жидкости через генератор Q ;
- динамические параметры – это колебания давления ΔP и объемного расхода ΔQ в выходном трубопроводе, которые и определяют энергетические характеристики дискретно-импульсного потока жидкости, реализуемого генератором. ΔP и ΔQ вследствие негармонической формы колебаний определялись как размахи

$$\Delta P = P_{\max} - P_{\min} = 2\delta P,$$

$$\Delta Q = Q_{\max} - Q_{\min} = 2\delta Q,$$

где P_{\max} и P_{\min} – максимальное и минимальное значения давлений в импульсе, а Q_{\max} и Q_{\min} – соответственно объемного расхода, δP и δQ – амплитуды колебаний давления и объемного расхода.

Объектом исследования в данной работе являются суммарный поток энергии \mathcal{E}_Σ при срывном кавитационном течении жидкости и поток энергии, соответствующий установившемуся течению \mathcal{E}_y (безкавитационный режим течения).

В работе [5] установлено, что суммарный поток энергии \mathcal{E}_Σ при срывном кавитационном течении жидкости представляет собою

$$\mathcal{E}_\Sigma = P_n Q + \frac{1}{2} \Delta P \Delta Q, \quad (1)$$

где

$$P_{п}Q = \mathcal{E}_y - \quad (2)$$

поток энергии, соответствующий установившемуся течению. Он определяется давлением подпора $P_{п}$ и объемным расходом жидкости Q . Второе слагаемое в уравнении (1) – это поток энергии, определяемый колебательными составляющими давления ΔP и объемного расхода ΔQ , и называется потоком колебательной энергии – \mathcal{E}_k .

2. Определение влияния диаметра критического сечения генератора на энергетические характеристики дискретно-импульсного потока жидкости

Энергетические характеристики дискретно-импульсного потока определялись для генераторов при угле раскрытия диффузора $\beta = 20^\circ$ с геометрическими и режимными параметрами, приведенными в табл. 1.

Таблица 1.

Геометрические и режимные параметры генераторов

Геометрические параметры			
$d_{кр}$, мм	2,5	4,0	6,0
$l_{кр}$, мм	3,4	5,4	8,2
D , мм	10	17	24
l_d , мм	21,2	36,9	51,0
Режимные параметры			
$P_{п}$, МПа	$Q \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$		
10	0,646	1,67	3,73
20	0,913	2,36	5,27
30	1,12	2,89	6,46

Исследование влияния диаметра критического сечения генератора на размахи колебательных составляющих давления и объемного расхода рассмотрены в зависимости от режима периодически срывного кавитационного течения. Этот режим определяется параметром динамического подобия τ и представляет собою отношение давления на выходе генератора к давлению на его входе, т.е.

$$\tau = \frac{P_{п}}{P_{н}}$$

В числитель этого параметра входит значение давления, под действием которого каверна захлопывается, а в знаменателе – давление, определяющее скоростной напор потока, в результате которого может образоваться и расширяться каверна.

В работе [6] выполнен анализ теоретических амплитуд колебаний давления δP , определенных по уточненной линейной математической модели генератора [7], и экспериментальных данных, полученных при испытаниях генераторов [3] с геометрическими и режимными параметрами, приведенными в табл. 1. Установлено, что давление на входе в генератор не оказывает влияния на зависимость амплитуды колебаний объема кавитационной каверны δV_k от параметра кавитации τ . В то же время, увеличение $d_{кр}$ приводит к росту значения оторвавшейся части каверны и амплитуды ее колебаний δV_k , что подтверждается зависимостью $\delta V_k = f(\tau)$ (рис.2 [6]). Из представленного рисунка следует, что при фиксированном значении параметра кавитации τ увеличение $d_{кр}$ (а, следовательно, и объемного расхода через генератор) приводит к росту значения δV_k .

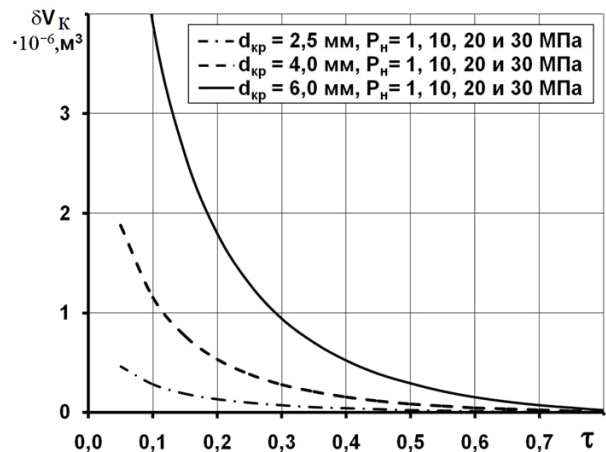


Рис. 2. Зависимость амплитуды колебаний объема кавитационной каверны δV_k от параметра кавитации τ [6]

Казалось бы, схлопывание большего объема каверны должно привести к увеличению размаха колебаний ΔP . Однако этого не происходит. Другими словами, существует парадокс влияния объемного расхода жидкости через кавитационный генератор на колебательную составляющую давления на выходе из него.

Это наглядно подтверждается совмещенными теоретическими и экспериментальными зависимостями $\Delta P = f(\tau)$ для генераторов с $d_{кр} = 2,5; 4,0$ и $6,0$ мм. Эти зависимости представлены на рис. 3 при давлениях на входе в генератор $P_{п} = 30, 20$ и 10 МПа.

Объяснение существующего парадокса приведено в работе [6], где с физической точки зрения и с позиции существующей математической модели генератора [7] показано, что колебательная составляющая давления не зависит от размера каверны, а определяется скоростью движения ее стенки.

Из рис. 3 видно, что устойчивый режим периодически срывного кавитационного течения жидкости, реализуемый генераторами, возникает при значении $\tau \approx 0,05$ и прекращается при достижении $\tau \approx 0,85$. Зависимости $\Delta P = f(\tau)$ для разных давлений P_n имеют максимум вблизи значений $\tau \approx 0,1 \div 0,2$. Максимальные значения ΔP приблизительно в 1,3-1,9 раза превышает давление P_n . При этом с увеличением давления нагнетания P_n отношение $\Delta P/P_n$ уменьшается. Независимо от проходного сечения генератора размах ΔP определяется давлением нагнетания жидкости P_n и параметром кавитации τ .

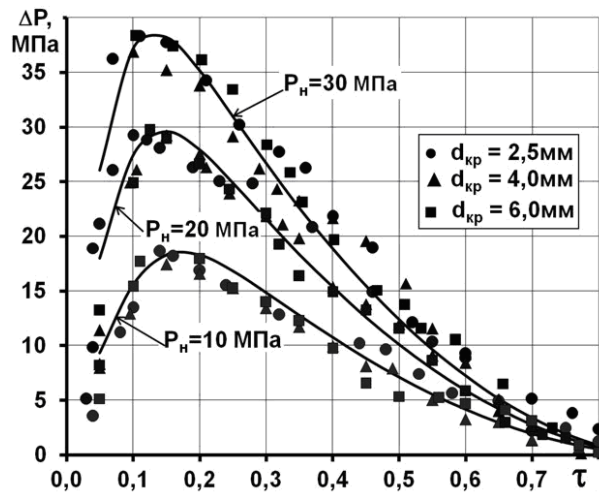


Рис. 3. Совмещенные теоретические и экспериментальные зависимости размаха колебаний ΔP от параметра кавитации τ

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 ΔP не изменился.

Размах колебания объемного расхода ΔQ определяется, следуя работе [5], из условия баланса – его равенства изменению объема кавитационной каверны в момент отрыва ΔV_k , умноженного на частоту колебаний f

$$\Delta Q = \Delta V_k f, \tag{3}$$

где $\Delta V_k = 2\delta V_k$.

Частота колебаний f определялась расчетно-экспериментальным способом [8], относительная погрешность которого не превышает 7 %, по формуле

$$f = Sh_3 \frac{v_{кр}}{r_{кр}} \tau, \tag{4}$$

где Sh_3 – число Струхалия, аппроксимационное уравнение которого установлено на основании экспериментальных данных с достоверностью $R^2 = 0,99$ описано выражением

$$Sh_3 = 0,0066 \cdot r_{кр} + 0,0745, \tag{5}$$

$v_{кр}$ – скорость жидкости в критическом сечении генератора, определяемая по известной формуле

$$v_{кр} = \sqrt{2(P_n - P_k)/\rho}, \tag{6}$$

где P_k – давление в кавитационной полости.

Амплитуды колебаний объема δV_k определялись с учетом того, что ее объем равен максимальному объему оседлой кавитационной каверны в момент отрыва при $\ell_k \leq \ell_d$ (где ℓ_k – осевая длина каверны) [7]

$$\delta V_k = \frac{\pi \ell_k}{2} \left[3r_{кр}^2 (1-\mu) + 3r_{кр} \ell_k \left(\text{tg} \frac{\beta}{2} - \text{tg} \frac{\alpha}{2} \right) + \ell_k^2 \left(\text{tg}^2 \frac{\beta}{2} - \text{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \right) \right], \tag{7}$$

где α – угол расширения струи жидкости,

μ – коэффициент расхода жидкости.

Осевая длина каверны в зависимости от степени развития кавитации определяется в соответствии с [7] по формуле

$$\ell_k = \frac{r_{кр}}{\text{tg} \frac{\beta}{2}} \cdot \left(\sqrt{\frac{\mu}{1 - \sqrt{0,88 - \tau}}} - 1 \right). \tag{8}$$

Расчет колебательных составляющих расхода ΔQ производился по формуле (3) с учетом (4)-(8). Данные получены при значениях угла расширения струи $\alpha = 1,35^\circ$, коэффициента расхода $\mu = 0,95$ и давления насыщенных паров $P_k = 0,0024$ МПа.

На рис. 4 для генераторов, геометрические и режимные параметры которых приведены в табл. 1, представлены зависимости размаха колебаний объемного расхода жидкости ΔQ от параметра кавитации τ .

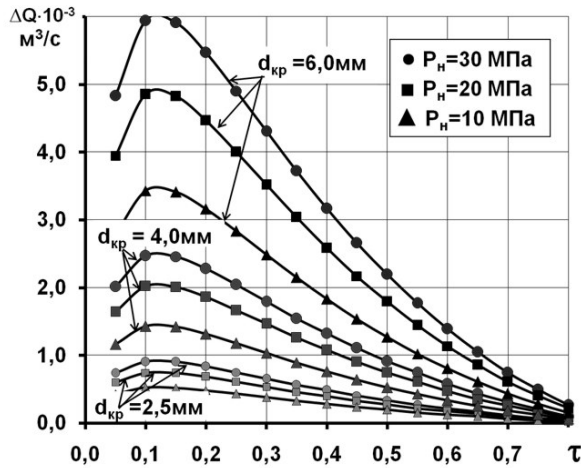


Рис. 4. Расчетные зависимости размаха объемного расхода ΔQ от параметра кавитации

Как видно из приведенного графика, характер изменения зависимостей ΔQ от параметра кавитации τ не линейный и близок к показательной функции. Зависимости $\Delta Q=f(\tau)$ показывают, что колебательная величина объемного расхода с ростом τ сначала резко возрастает, достигая максимума вблизи значения параметра кавитации $\tau \approx 0,12$, для всех значений давлений нагнетания и диаметров критического сечения генератора. В дальнейшем, с увеличением значения параметра кавитации, колебательная величина объемного расхода уменьшается.

Установлено, что значения ΔQ зависят от давления нагнетания (см. рис. 4). Так, например, для генератора с $d_{кр}=6,0$ мм с ростом давления нагнетания P_n от 10 до 30 МПа, при фиксированном значении параметра кавитации $\tau = 0,15$, происходит увеличение колебательной составляющей объемного расхода $\Delta Q \approx$ в 1,73 раза с $3,4 \cdot 10^{-3}$ до $5,9 \cdot 10^{-3}$ м³/с.

Это обусловлено только ростом частоты колебаний от 660 до 1144 Гц при отсутствии влияния давления нагнетания на значение δV_k , которое равно $2,58 \cdot 10^{-6}$ м³ как при $P_n=10$ МПа, так и $P_n=30$ МПа [6].

Анализ представленных на рис. 4 зависимостей показывает, что для любого фиксированного значения давления нагнетания жидкости P_n и параметра кавитации τ уменьшение диаметра критического сечения приводит к снижению значений колебаний объемного расхода ΔQ . Так, при $P_n=30$ МПа и $\tau=0,15$ уменьшение $d_{кр}$ от 6,0 до 2,5 мм приводит к снижению значения ΔQ примерно в 6,6 раза от $5,9 \cdot 10^{-3}$ до $0,9 \cdot 10^{-3}$ м³/с.

Это обусловлено превосходящим влиянием значения δV_k по сравнению со снижением частоты колебаний. Так, при указанных значениях давления нагнетания и параметра кавитации уменьшение $d_{кр}$

от 6,0 до 2,5 мм приводит к снижению значения δV_k более чем в 9 раз (от $2,58$ до $0,28 \cdot 10^{-6}$ м³) при росте частоты колебаний – в 2,1 раза (с 1144 до 2408 Гц).

Таким образом, установлено, что при фиксированном значении параметра кавитации как увеличение диаметра критического сечения, так и рост значения давления нагнетания приводит к росту значений колебательной составляющей объемного расхода.

Колебательные составляющие давления и объемного расхода жидкости, расчет которых приведен выше, позволяют определить влияние давления нагнетания P_n при фиксированном значении диаметра критического сечения генератора и $d_{кр}$ при фиксированном значении P_n на энергетические характеристики дискретно-импульсного потока.

Расчет суммарного потока энергии при периодически срывном кавитационном течении \mathcal{E}_Σ выполнен по (1), а поток энергии, соответствующий установившемуся течению \mathcal{E}_y (безкавитационный режим течения) – по (2).

На рис. 5 представлены расчетные зависимости \mathcal{E}_Σ и \mathcal{E}_y от параметра кавитации τ . Эти зависимости получены для генератора с фиксированным диаметром критического сечения $d_{кр}=4$ мм и позволяют определить влияние P_n на энергетические характеристики дискретно-импульсного потока.

Расчеты выполнены при значениях давления нагнетания $P_n=10, 20$ и 30 МПа и, соответственно, объемного расхода $Q=1,67, 2,36$, и 2,89 л/с.

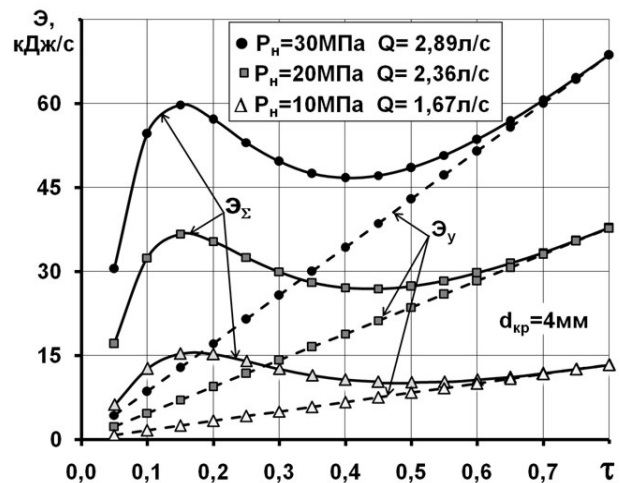


Рис. 5. Расчетные зависимости потоков энергии \mathcal{E}_Σ и \mathcal{E}_y от параметра кавитации τ при фиксированном значении $d_{кр}=4$ мм и изменении P_n от 10 до 30 МПа

Анализ представленных зависимостей потоков энергии от параметра кавитации показывает, что:

– зависимость $\mathcal{E}_y = f(\tau)$, соответствующая установившемуся течению, носит линейный характер. С ростом значения τ поток энергии \mathcal{E}_y увеличивает

ся от 0 и стремится к максимальному значению, развиваемому насосом \mathcal{E}_n ;

– зависимость $\mathcal{E}_\Sigma = f(\tau)$ не линейна и с ростом значения τ от нуля до 0,15 увеличивается, достигая максимального значения. В дальнейшем происходит ее снижение и при $\tau \approx 0,4$ и $P_n=30$ МПа \mathcal{E}_Σ достигает минимума. При этом понижение давления нагнетания P_n приводит к смещению минимального значения \mathcal{E}_Σ вправо в сторону больших значений τ . Так, при $P_n=10$ МПа минимальное значение \mathcal{E}_Σ достигается при $\tau \approx 0,5$. Последующий рост значения \mathcal{E}_Σ объясняется увеличением составляющей потока энергии \mathcal{E}_y при значительном снижении уровня динамического воздействия на жидкость;

– при фиксированном значении τ увеличение давления P_n приводит к росту суммарного потока энергии \mathcal{E}_Σ при гидродинамическом воздействии на жидкость, обусловленном режимом периодически срывного кавитационного течения в гидравлическом канале генератора, и потока, соответствующего установившемуся течению жидкости \mathcal{E}_y (безкавитационный режим течения). При значении параметра кавитации $\tau = 0,15$, увеличение давления P_n с 10 до 30 МПа приводит к росту значений \mathcal{E}_Σ в 4 раза (от 15 до 60 Кдж/с) и \mathcal{E}_y в 5,2 раза (от 2,475 до 12,475 Кдж/с). Повышение значений \mathcal{E}_Σ с увеличением давления P_n происходит за счет роста ее колебательных составляющих как давления ΔP (см. рис. 3), так и объемного расхода ΔQ (см. рис. 4).

Для оценки влияния диаметра критического сечения генератора на суммарный поток энергии \mathcal{E}_Σ и поток, соответствующий установившемуся течению \mathcal{E}_y , были выполнены расчеты при постоянном давлении нагнетания $P_n=30$ МПа.

Результаты расчета представлены в виде зависимостей $\mathcal{E}_\Sigma=f(\tau)$ и $\mathcal{E}_y=f(\tau)$ на рис. 6. Как видно из этого рисунка, характер поведения зависимостей $\mathcal{E}_y = f(\tau)$ и $\mathcal{E}_\Sigma = f(\tau)$ аналогичен приведенному на рис. 5.

Установлено, что увеличение проходного сечения генератора приводит к росту значений потоков энергии \mathcal{E}_Σ и \mathcal{E}_y . При фиксированном значении параметра кавитации $\tau = 0,15$, увеличение $d_{кр}$ от 2,5 до 6,0 мм приводит к росту значений $\mathcal{E}_\Sigma \approx$ в 6,2 раза (от 22,2 до 136,9 Кдж/с) и $\mathcal{E}_y \approx$ в 4,8 раза (от 5,04 до 24,16 Кдж/с).

3. Влияние режимных параметров генератора на энергетические характеристики

Для корректного сравнения и оценки влияния режимных параметров генератора были выполнены дополнительные расчеты колебательных состав-

ляющих потоков энергии \mathcal{E}_k при постоянном расходе через генератор $Q = 1,67$ л/с и изменении давления на входе в него P_n от 10 до 30 МПа, а также при постоянном $P_n=10$ МПа при изменении Q от 1,67 до 5,1 л/с. Результаты расчета в виде зависимостей колебательных составляющих \mathcal{E}_k от параметра кавитации τ представлены на рис. 7.

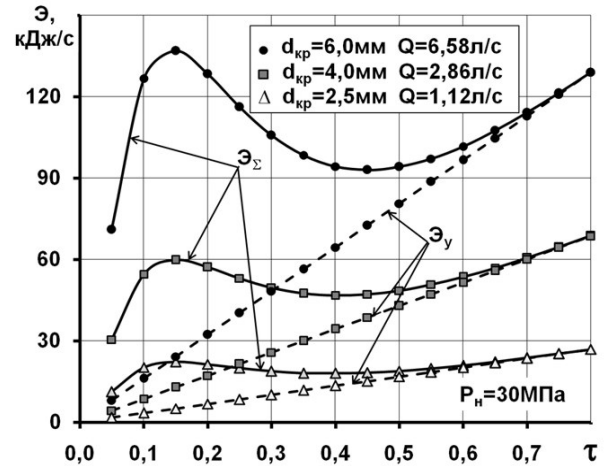


Рис. 6. Расчетные зависимости потоков энергии \mathcal{E}_Σ и \mathcal{E}_y от параметра кавитации τ при фиксированном $P_n = 30$ МПа и изменении $d_{кр}$ от 2,5 до 6,0 мм

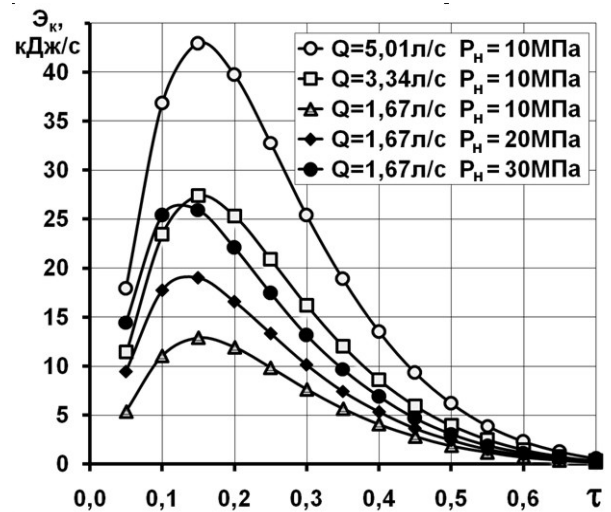


Рис. 7. Расчетные зависимости колебательных составляющих потоков энергии \mathcal{E}_k от параметра кавитации τ

Анализ представленных зависимостей показывает, что при одинаковой энергетике на входе в генератор, определенной как произведение $P_n \cdot Q$, увеличение расхода через генератор приводит к более значительному росту колебательной составляющей потока энергии \mathcal{E}_k по сравнению с увеличением давления на входе в генератор.

Так, при фиксированном значении $\tau = 0,15$ увеличение давления P_n в три раза – от 10 до 30 МПа

приводит к росту значения \mathcal{E}_k в два раза – от 13 до 26 кДж (см. рис. 7). Это происходит только за счет роста в два раза значения размаха колебаний давления ΔP (см. рис. 3) при увеличении давления P_n от 10 до 30 МПа.

В то же время при этом же значении τ , увеличение расхода Q в три раза от – 1,67 до 5,01 л/с приводит к росту значения \mathcal{E}_k в 3,3 раза – от 13 до 43 кДж (рис. 8). Указанное увеличение \mathcal{E}_k объясняется ростом значения колебательной составляющей объемного расхода ΔQ в те же 3,3 раза – от 1,42 до 4,69 л/с при неизменной величине размаха колебаний давления ΔP для любого фиксированного значения параметра кавитации τ .

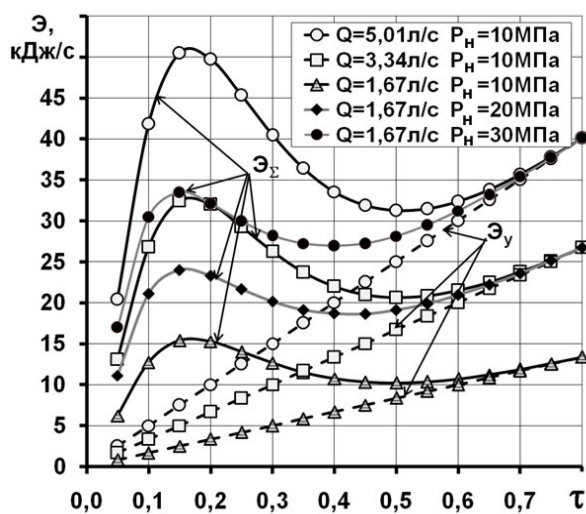


Рис. 8. Расчетные зависимости потоков энергии \mathcal{E}_Σ и \mathcal{E}_y от параметра кавитации τ

Влияние объемного расхода жидкости Q и давления P_n на суммарный поток энергии \mathcal{E}_Σ и поток, соответствующий установившемуся течению \mathcal{E}_y , было выполнено по их зависимостям от параметра кавитации τ . Эти зависимости представлены на рис. 8.

Из данных результатов следует, что при одинаковой энергетике жидкости, подаваемой на вход генератора, увеличение значения объемного расхода жидкости через него в три раза более эффективно влияет на суммарный поток энергии \mathcal{E}_Σ по сравнению с аналогичным ростом давления нагнетания на его входе.

При $\tau = 0,15$ увеличение объемного расхода жидкости Q в три раза от 1,67 до 5,01 л/с приводит к пропорциональному росту значения \mathcal{E}_Σ от 15,4 до 50,46 кДж. При этом рост давления нагнетания на входе в генератор в три раза – от 10 до 30 МПа приводит к росту значения \mathcal{E}_Σ в 2,2 раза – от 15,4 до 33,15. Различное влияние роста значений P_n и Q на

\mathcal{E}_Σ обусловлено колебательными составляющими потоков энергии \mathcal{E}_k , анализ которых (см. рис. 7) приведен выше.

В то же время, как и следовало ожидать, пропорциональное увеличение P_n (при фиксированном значении Q) и Q (при фиксированном P_n) не оказывают влияния на значения потоков, соответствующих установившемуся течению \mathcal{E}_y (см. рис. 8).

Выводы

Анализ результатов исследования влияния диаметра критического сечения генератора на колебательные составляющие давления и объемного расхода позволил установить, что:

- колебательная составляющая давления не зависит от диаметра критического сечения генератора а, следовательно, и от объемного расхода жидкости через него и определяется давлением нагнетания и параметром кавитации. Увеличение давления нагнетания на входе в генератор приводит к росту значений колебательной составляющей давления в выходном трубопроводе;

- колебательная составляющая объемного расхода зависят как от диаметра критического сечения генератора, так и давления нагнетания и с ростом их значений увеличивается;

- как увеличение диаметра критического сечения, так и повышение давления нагнетания на входе в генератор приводит к росту значений суммарного потока энергии при периодически срывном кавитационном течении и потока энергии, соответствующего установившемуся течению.

Результаты оценки влияния режимных параметров генератора на энергетические характеристики дискретно-импульсного потока показали, что

- увеличение как объемного расхода жидкости через генератор, так и давления нагнетания приводит к росту значений потока энергии, обусловленного режимом периодически срывного кавитационного течения в гидравлическом канале генератора и потока, соответствующего установившемуся течению жидкости;

- при одинаковой энергетике жидкости, подаваемой на вход генератора (определяемой как произведение давления нагнетания на объемный расход жидкости через генератор), увеличение значения объемного расхода жидкости через него более эффективно по сравнению с ростом давления нагнетания на его входе.

Приведенные выводы имеют важное практическое значение. Они позволяют выбрать рациональные параметры генератора при наложении ограничений по давлению нагнетания и объемному расходу жидкости. При этом реализуется максимальное

преимущество использования дискретно импульсного воздействия жидкости в технологических процессах с применением генератора колебаний давления жидкости по сравнению со статическим нагнетанием.

Литература

1. Кнепп, Р. Кавитация [Текст] : монография / Р. Кнепп, Дж. Дейли, Ф. Хеммит. – М. : Мир, 1974. – 687 с
2. 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.
3. Кавитация как средство интенсификации технологических процессов. Опыт применения и перспективы (Обзор) [Текст] / Ю. А. Жулай, В. Ю. Скосарь // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 8 (105). – С. 7-15.
4. 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. Довготько, В. А. Дрозд (СССР). – №1782997 ; заявл. 06.05.72 ; опубл. 05.02.76, Бюл. № 9.
5. Жулай, Ю. А. Определение КПД кавитационного генератора колебаний давления жидкости [Текст] / Ю. А. Жулай // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2016. – № 5 (132). – С. 22-28
6. Жулай, Ю. А. О парадоксе влияния объемного расхода жидкости через кавитационный генератор на размах колебаний [Текст] / Ю. А. Жулай // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2017. – № 1 (136). – С. 29-35.
7. Жулай, Ю. А. Уточнение линейной математической модели кавитационного генератора колебаний давления жидкости [Текст] / Ю. А. Жулай // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 7 (114). – С. 21-26.
8. Жулай, Ю. А. Разработка расчетно-экспериментального метода определения частот кавитационных колебаний [Текст] / Ю. А. Жулай, А. С. Ворошилов, С. В. Комаров // *НГУ України : зб. наук. пр.* – Дніпропетровськ, 2015. – Вип. 48. – С. 140-146.

References

1. Knepp, R., Dejli, Dzh., Hemmit, F. *Kavitacija* [Cavitation]. Moscow. Mir Publ, 1974. 687 p.
2. Pilipenko, V. V., Man'ko I. K., Zadontsev V. A. Cavitation self-oscillations intensify technological processes. *Proceedings of a Fluid Dynamics Panel Workshop, Ukraine, Kiev. Report 827 Publ., 1998*, pp. 32-1–32-4.
3. 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, no. 8 (105), pp. 7-15.
4. Pilipenko, V. V., Zadoincev, V. A., Man'ko, I. K., Dovgot'ko, N. I., Drozd, V. A. *Generator kolebanij davlenija vody* [Water pressure fluctuations generator]. Author's certificate USSR, №. 504444, 1976.
5. Zhulay, Yu. A. Opređenje KPD kavitatsionnogo generatona kolebanij davlenija zhidkosti [Definition of efficiency of cavitation generator of fluid pressure oscillation], *Aviatsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologija*, 2016, no. 5 (132), pp. 22-28.
6. Zhulaj, Ju. A. O paradokse vliyaniya ob'emnogo rashoda zhidkosti cherez kavitatsionnyiy generatona na razmah kolebanij [On the paradox of influence of volumetric fluid discharge through the cavity generator on fluctuation amplitude range] *Aviatsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya*, 2017, no. 1 (136), pp. 29-35.
7. Zhulaj, Ju. A. Utochnenie linejnoy matematicheskoy modeli kavitacionnogo generatona kolebanij davlenija zhidkosti [Refining of linear mathematical model of fluid pressure cavitation generator]. *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*, 2014, no. 7 (114), pp. 21-26.
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]. *NGU Ukraïni : zb. nauk. pr.*, Dnipro, 2015, vol. 48, pp. 140-146.

Поступила в редакцию 27.04.2017, рассмотрена на редколлегии 12.06.2017

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф. механотроники А.А. Приходько, Днепропетровский национальный университет, Украина.

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ГЕНЕРАТОРА НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНОГО ПОТОКУ РІДИНИ

Ю. О. Жулай, М. О. Дзоз

Визначено вплив параметрів кавітаційного генератора на коливальні складові тиску і об'ємної витрати, а також на його енергетичні характеристики. Показано, що коливальна складова тиску не залежить від діаметру критичного перерізу генератора і визначається тиском нагнітання, а коливальна складова об'ємної витрати залежить як від діаметру критичного перерізу генератора так і тиску нагнітання. Встановлено, що як збільшення об'ємної витрати рідини через генератор так і тиску нагнітання призводять до зростання значень потоку енергії, обумовленого режимом кавітаційної періодично зривної течії в гідравлічному каналі генератора. При однаковій енергетиці рідини, що подається на вхід генератора, зростання значення об'ємної витрати рідини через нього більш ефективно в порівнянні із підвищенням тиску нагнітання на його вхід.

Ключові слова: гідродинамічна кавітація, генератор кавітаційних коливань тиску рідини, коливальні складові тиску і об'ємної витрати, потік енергії.

INFLUENCE OF GENERATOR PARAMETERS ON ENERGY CHARACTERISTICS OF DISCRETE-PULSE FLUID FLOW

Yu. A. Zhulay, N. A. Dzoz

The influence of the parameters of a cavitations generator on oscillating components of pressure and volume flow, as well as its own energy characteristics is determined. It is shown that the oscillating pressure component does not depend on the diameter of the critical section of generator, but is determined by the pressure, whereas the oscillating component of volumetric flow rate depends both on the diameter of the critical section of the generator and pump pressure. It is determined that increase in both volume liquid flow rate through the generator and pump pressure leads to increase of energy flux caused by occasionally separated cavity flow mode in hydraulic channel of the generator. With the same energy of fluid supplied to the generator intake, the increase of fluid volumetric flow rate through generator is more effective than the increase of pump pressure at its intake.

Keywords: hydrodynamic cavitations, fluid pressure fluctuation generator, oscillating components of pressure and volume flow, energy stream.

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

Дзоз Николай Аникиевич – д-р техн. наук, Генеральный директор, Завод новых технологий, Днепр, Украина.

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

Dzoz Nilkolay Anikevich – Doctor of Technical Science, General Director, Plant of New Technologies, Dnepr, Ukraine.