

## SECTION 5. Innovative technologies in science.



**Terentiev Oleg Markovich**

Doctor of science, Professor  
Electromechanical Energy-Intensive  
Equipment Department  
National Technical University of Ukraine  
"Kyiv Polytechnic Institute"

**Streltcova Inna Nikolaievna**

Post graduate student  
Electromechanical Energy-Intensive  
Equipment Department  
National Technical University of Ukraine  
"Kyiv Polytechnic Institute"

### GEOMETRICAL AND FREQUENCY PARAMETERS OF ROTARY-HYDROCAVITATION WORK INSTRUMENT'S PULSE GENERATION

**Abstract:** In this article we presented mathematical model and geometrical and frequency parameters calculation of pulse generator node, which built into the work instrument for rock breaking by combined rotary-hydrocavitation method. The developed method allows to use specific energy of cavitation flow which reaching  $(10^4 \dots 10^5)$  kWh/m<sup>3</sup>. Permanent magnets used for axial focusing of cavitation flow in the body of work instrument. Due to magnets' action occurs oscillations cavities interference. As a result, cavitation's frequency increase to subresonance. Subresonant flow creates additional stress on rock. Natural and artificial fractures formed, rocks' resistance to cutting reduce, rock breaking energy reduce by 10%.

**Key words:** destruction, method, rock, frequency, cavitation.

УДК 622.1/2

### ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И ЧАСТОТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГЕНЕРАЦИИ ИМПУЛЬСОВ ВРАЩАТЕЛЬНО-ГИДРОКАВИТАЦИОННОГО РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА

**Аннотация:** В статье представлена математическая модель геометрических и частотных параметров генерации импульсов рабочего инструмента для разрушения горных пород комбинированным вращательно-гидрокавитационным способом. Разработанный способ позволяет использовать удельную энергию кавитации потока, которая достигает  $(10^4 \dots 10^5)$  кВт/м<sup>3</sup>. Для обеспечения осевого фокусирования кавитационного потока, в корпусе инструмента размещены постоянные магниты. За счет этого возникает интерференция колебаний каверн. Как следствие, - повышение частоты колебаний кавитации до субрезонансной. Субрезонансный поток создает дополнительную нагрузку на массив. В результате, растет естественная и образуется искусственная трещиноватость, снижается сопротивление резанию и на 10 % энергоемкость разрушения.

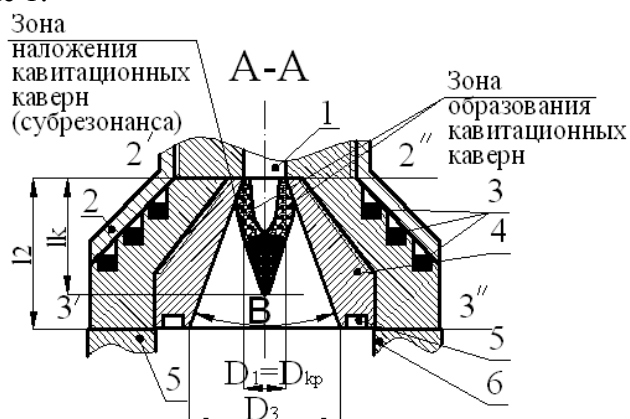
**Ключевые слова:** разрушение, способ, горная порода, частота, кавитация.

**ВСТУПЛЕНИЕ.** Разрушением горных пород, усовершенствованием известных и разработкой новых способов занимались отечественные и зарубежные ученые [3, с

140-142; 4, с. 6-29, 178-235; 5, с. 80-111, 192-198]. Однако, до сих пор в горной промышленности используют способы разрушения, имеющие высокую энергоемкость в пределах (250...900) МДж/м<sup>3</sup> [3, с. 140-142]. А также имеют ряд недостатков: использование механического способа - ограничено прочностью пород до 6 по шкале Протодяконова [4, с. 6], взрывного - сопровождается образованием сейсмических волн, загрязнением окружающей среды и т. д. И так, до сих пор задача разработки энергосберегающего способа разрушения горных пород остается актуальной. Это подтверждено постановлением Кабинета Министров Украины от 1 марта 2010 г. № 243 [6, приложение 2 пункт 3].

Целью исследований является разработка и обоснование нового энергосберегающего вращательно-гидрокавитационного комбинированного способа разрушения горных пород.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Объемная концентрация кавитационных пузырьков находится в пределах  $(1...10^{10})$  1/м<sup>3</sup> [1, с.6]. При их схлопывании возникают импульсы давления, достигающие  $10^3$  МПа. При таких значениях концентрации и давлений, удельная мощность составляет  $(10^4...10^5)$  кВт/м<sup>3</sup> [1, с.7]. Это является дополнительным источником энергии для разрушения горных пород. Один из вариантов реализации рабочего инструмента для комбинированного вращательно-гидрокавитационного способа представлен в [2, с.23]. Его узел генерации импульсов изображен на рисунке 1.



**Рисунок 1 - Узел генерации импульсов рабочего инструмента для реализации вращательно - гидрокавитационного способа разрушения горных пород:**

1 – фрагмент канала для подвода жидкости; 2 - фрагмент кожуха, 3 - магнит, 4 - диффузная насадка, 4 - кожух, 5 - паз монтажный, 6 – фрагмент вставок твердосплавных (зубов)

При размещении диффузора внутри инструмента, вектор движения кавитационных каверн направлен на режущие кромки резца. Это приводит к их разрушению. На основе теоремы Лармора [7, с. 4], сделан вывод, что под действием магнитного поля кавитационные каверны фокусируются. То есть, прецессируют вокруг оси потока промывочной жидкости. Это предотвращает разрушение инструмента от действия кавитации и создает направленную импульсную нагрузку на массив. Также, под действием магнитного поля, каверны взаимонакладываются. В результате этого, происходит интерференция частот колебаний каверн. Вследствие, - увеличивается частота колебаний гидрокавитационной генерации до субрезонансной. Промывочный кавитационный поток с субрезонансной частотой попадает на поверхность горной породы, что приводит к росту естественной и образованию искусственной трещиноватости. Уменьшается усилие резания горной породы за счет чего происходит снижение энергии разрушения до 10 % [2, с. 25-26].

Длина кавитационной каверны  $l_K$ , м [8, с. 49]:

$$l_K = \frac{d_{кр}}{2 \cdot \operatorname{tg}(\beta/2)} \cdot \left( \sqrt{\frac{\mu}{1 - \sqrt{(1-\tau) \cdot \psi^{-1}}}} - 1 \right), \quad (1)$$

где  $D_{кр}$  – диаметр отверстия диффузорной насадки в сечении  $2^I-2^{II}$ , м;  $\beta$  – угол раскрытия диффузорной насадки, градус;  $\mu=0.9$  – коэффициент расхода узла генерации импульсов, о. е. [8, с. 20];  $\tau$  – параметр кавитации, о. е.;  $\psi = 1,1$  – коэффициент потерь на расширение потока, о. е. [8, с.11].

Математическая модель (1) не учитывает параметры, влияющие на формирование кавитационной каверны: длину диффузора, перепад давлений на входе и выходе диффузора, гидравлическое сопротивление, коэффициент Дарси, кинематическую вязкость промывочной жидкости, ее плотность. Поэтому, для усовершенствования (1) приняты математические модели (2) - (13) [9 с. 188-211; 10, с. 46-51; 11, с. 77-78].

$$\tau = 2 \cdot (p_3 - p_2) \cdot \left( \rho \cdot v_{cp1}^2 \right). \quad (2)$$

Изменение давления в диффузоре при изменении угла его раскрытия и давления в сечениях  $2^I-2^{II}$  та  $3^I-3^{II}$  (рисунок 1) -  $p_2, p_3$ , соответственно, Па:

$$\Delta p = p_3 - p_2, \quad (3)$$

$$p_2 = p_1 - h_1 \cdot \rho \cdot g, \quad (4)$$

$$p_3 = \rho \cdot g \cdot \left( p_2 \cdot (\rho \cdot g) + \left( v_{cp2}^2 - v_{cp3}^2 \right) \cdot (2 \cdot g) - h_4 \right), \quad (5)$$

где  $p_1$  – давление, создаваемое насосом, Па;  $h_1, h_4$  – потери на трение в канале подвода промывочной жидкости и в диффузорной насадке, соответственно, м;  $\rho$  - плотность промывочной жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $v_{cp1}, v_{cp2}$  и  $v_{cp3}$  – скорости потока жидкости через рабочий инструмент в канале подвода промывочной жидкости, в сечениях  $2-2^I$  и  $3-3^I$  (рисунок 1), соответственно, м/с.

Скорости потока жидкости через рабочий инструмент, м/с:

$$v_{cp1} = v_{cp2} = Q / S_1 = (Q \cdot 4) / (\pi \cdot D_1^2), \quad (6)$$

$$v_{cp3} = Q / S_3 = (Q \cdot 4) / (\pi \cdot D_3^2) = (Q \cdot 4) / (\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot (l_2 \cdot \operatorname{tg}(\beta/2)))^2), \quad (7)$$

где  $Q$  – производительность насоса, м<sup>3</sup>/с;  $S_1, S_2, S_3$  – площади сечений канала для подвода промывочной жидкости, диффузорной насадки в сечениях  $2^I-2^{II}, 3^I-3^{II}$  (рисунок 1), соответственно, м/с;  $D_1, D_2, D_3$  – диаметры канала для подвода промывочной жидкости, диффузорной насадки в сечениях  $2^I-2^{II}, 3^I-3^{II}$  (рисунок 1), соответственно, м/с;  $l_2$  и  $\beta$  – длина и угол раскрытия диффузорной насадки, соответственно, м и градус.

Потери на трение в канале для подвода промывочной жидкости и в диффузорной насадке рабочего инструмента  $h_1, h_4$ , м:

$$h_1 = \lambda \cdot (l_1 / D_1) \cdot \left( v_{cp1}^2 / (2 \cdot g) \right), \quad (8)$$

$$h_4 = \xi_4 \cdot v_{cp3}^2 / (2 \cdot g), \quad (9)$$

где  $l_1$  – длина канала для подвода промывочной жидкости, м.

Коэффициент сопротивления в диффузорной насадке  $\xi_4$ , м [11, с. 77]:

$$\xi_4 = K_{np} \cdot (n-1)^2, \quad (10)$$

где  $n$  – степень расширения диффузора, в.о.;  $K_{np}(\beta=15^\circ)=0.35$ ,  $K_{np}(\beta=15^\circ)=0.8$ ,  $K_{np}(\beta=15^\circ)=0.95$  – коэффициент смягчения жидкости, [11, с. 78]. о. е.

Степень расширения диффузора (о. е.) и число Рейнольдса (о. е.):

$$n = S_2 / S_1, \quad (11)$$

$$Re = V_{cp1} \cdot (D_1 \cdot \nu), \quad (12)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с.

Для возникновения кавитации необходимо обеспечить выполнение условия:  $Re > 7340$  [12, с. 143]. Согласно с [13, с. 85], при  $2300 < Re < 10^5$ , коэффициент Дарси определяют по формуле Блазиуса (для турбулентного режима движения жидкости в гидравлически гладких трубах), о. е.:

$$\lambda = 0,3164 / \sqrt[4]{Re}. \quad (13)$$

Исходные данные для расчета длины кавитационной каверны и частоты колебаний генератора импульсов: диаметр скважины  $D_0=0.05$  м; глубина скважины  $\Delta S=0.1$  м; напряжение и ток в сети переменного тока  $U=220$  В,  $I=5$  А; время разрушения  $t=3600$  с; начальное давление и расход насоса  $p_1=6$  МПа,  $Q=0.011$  м<sup>3</sup>/с; коэффициент Дарси  $\lambda=0.026$  [рассчитано за 13, с. 85], о.е.; длина канала для подвода промывочной жидкости  $l_1=0.03$  м; скорость жидкости в канале 1 (рисунок 1)  $V_{cp1}=V_{cp2}=1.18$  м/с; плотность дистиллированной воды  $\rho=1000$  кг/м<sup>3</sup>[14, 314с.]; диаметр отверстия диффузорной насадки в сечении  $2^1-2^{II}$   $D_2=0.018$  м

Разработана новая математическая модель длины кавитационной каверны (14), которая отличается от известных тем, что учитывает перепад давлений, скорость жидкости и потери на трение в диффузорной насадке. Позволяет установить зависимость длины каверны от длины диффузорной насадки через скорость движения промывочной жидкости  $V_{cp3}$  через сечение  $3^1-3^{II}$  (рисунок 1). Такая зависимость представлена на рисунке 2 при исходных данных наведенных выше.

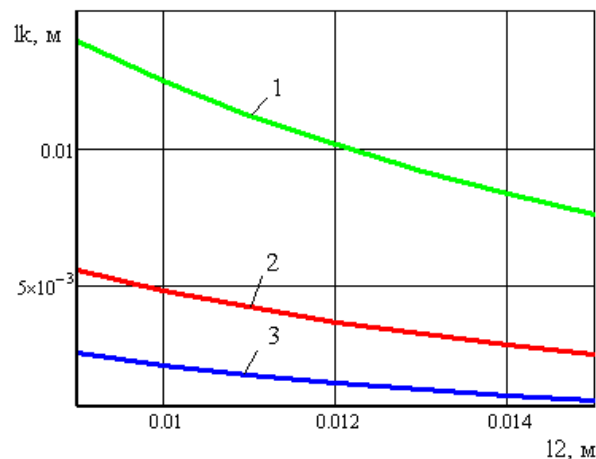
$$lk = \frac{Dk}{2 \cdot \operatorname{tg}(\beta/2)} \cdot \left( \sqrt{\frac{\mu}{\left(1 - \left(2 \cdot p_2 \cdot \rho_2 \cdot g^2 + (V_{cp2}^2 + V_{cp3}^2) \cdot 4 \cdot \rho \cdot g - \xi_4 \cdot V_{cp3}^2 \cdot \rho - p_2 \cdot \rho \cdot V_{cp2}^2\right)\right) - \psi^{-1}}} - 1 \right) \quad (14)$$

Зависимость длины кавитационных каверн от длины диффузора имеет нисходящий гиперболический характер. С увеличением угла раскрытия диффузора от  $30^\circ$  ( $\operatorname{tg}_{30}=0.58$ ) до  $60^\circ$  ( $\operatorname{tg}_{60}=0.58$ ), длина каверны уменьшается от 14 мм до 3 мм (при  $l_2 = 0.009$  м). В зависимостях (1), (14) тангенс угла раскрытия диффузорной насадки характеризует скорость образования кавитационных пузырьков. Отсюда, чем больше тангенс угла диффузора, тем меньше зона кавитации и длина кавитационной каверны. Это означает, что при увеличении угла диффузора происходит концентрация энергии кавитационного потока у критического сечения  $2^1-2^{II}$  (рисунок 1).

Частота автоколебаний генерации импульсов в рабочем инструменте без учета действия магнитного поля, Гц [8, с. 53-54]:

$$f = Sh_m \cdot (V_{cp1} / l_k) = (1 / \sqrt{\mu}) \cdot \operatorname{tg}(\beta/2) \cdot (V_{cp1} / l_k), \quad (15)$$

где  $Sh_m$  – модифицированное число Струхала, о.е.



**Рисунок 2 - Зависимость длины кавитационных каверн от длины диффузорной насадки (1 – при  $\beta = 30^\circ$ ; 2 – при  $\beta = 45^\circ$ ; 3 – при  $\beta = 60^\circ$ .)**

В таблице 1 представлены частоты в зависимости от изменения длины и угла раскрытия диффузорной насадки при начальных условиях указанных выше.

**Таблица 1**

**Частота генерации импульсов в рабочем инструменте, Гц**

Длина диффузора $l_2$ , м	Угол раскрытия диффузора, $\beta$ , градус		
	30	45	60
Частота генерации импульсов в рабочем инструменте, Гц			
0.009	713	1884	3518
0.012	776	1832	3135
0.015	789	1699	2761

Максимальное значение частоты колебаний кавитационной каверны 3518 Гц в зоне образования кавитационного потока (рисунок 1) при заданных исходных параметрах. Это достигается при наибольшем угле раскрытия  $60^\circ$  и наименьшей длине диффузора 0.009 м. Объясняется тем, что, при таких условиях, увеличивается частота срыва потока.

Интерференция частот «схлопывания» кавитационных каверн под действием магнитного поля - необходимое условие для образования субрезонансной зоны (рисунок 1). Для того, чтобы это произошло длина последней должна быть не менее радиуса диффузорной насадки. Исходя из этого условия, рекомендуемые значения длины и угла раскрытия диффузора 0.009 м и  $30^\circ$ , соответственно.

Преимуществами предлагаемого способа являются: комбинация вращающейся и кавитационной нагрузки; возникновение дополнительных динамических режимов среды, что разрушается; образование искусственной и рост естественной трещиноватости массива; возможность осевой фокусировки и концентрации кавитационных областей; повышение частоты колебаний кавитационного генератора до субрезонансной за счет волновой интерференции.

## ВЫВОДЫ

1. Зависимость длины кавитационных каверн от длины диффузора имеет нисходящий гиперболический характер. С увеличением угла раскрытия диффузора от  $30^\circ$  до  $60^\circ$ , длина каверны уменьшается с 0.014 м до 0.003 м при длине диффузора 0.009

м. Частота срыва потока растет от 713 до 3518 Гц. То есть, происходит концентрация энергии кавитационного потока на выходе из критического сечения диффузорной насадки рабочего инструмента.

2. Для образования субрезонансной зоны в кавитационном потоке, необходимым условием является интерференция колебаний кавитационных каверн под действием магнитного поля. Для того, чтоб это произошло, длина кавитационной каверны должна быть не менее радиуса диффузорной насадки. Это достигается при длине и угле раскрытия диффузора 0.009 м и  $30^0$ , соответственно.

3. Преимуществами предлагаемого способа являются: комбинация вращающейся и кавитационной нагрузки; возникновение дополнительных динамических режимов среды, что разрушается; образование искусственной и рост естественной трещиноватости массива; возможность осевой фокусировки и концентрации кавитационных областей; повышение частоты колебаний кавитационного генератора до субрезонансной за счет волновой интерференции.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Федоткин И. М., Гулый И. С., Шаповалюк Н. И. Использование кавитации в промышленности. Киев: Арктур - А, 1998. 135 с. ISBN 966-95344-2-9.
2. Терентьев О. М., Стрельцова И. Н. Энергоемкость разрушения горных пород комбинированным механико-гидрокавитационным способом. – Serbia, Neoplanta. Theoretical & Applied Science, № 12 (8), 2013, с. 22 – 26. ISSN 2308-4944.
3. Брылин В. И., Кожушко Ю. М. Бурение скважин специального назначения. Томск: ТПУ, 2006. 255 с.
4. Кучерявый Ф. И. Разрушение горных пород. М.: Недра, 1972. 240 с.
5. Партон В. З. Механика разрушения: От теории к практике. М.: Наука, 1990. 240 с. ISBN 978-5-382-00157-9.
6. Кабінет Міністрів України, постанова від 1 березня 2010 р. № 243 «Про затвердження Державної цільової економічної програми енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010 - 2015 роки» [Эл. ресурс]. – Режим доступа: \www/ URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/243-2010-п> – Заголовок с экрана.
7. Козлов В. И. Ларморова прецессия. Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова. Лабораторный практикум по физике - 2006. – 14 с.
8. Пилипенко В. В. Кавитационные автоколебания. – К.: Наукова думка, 1989. – 316с.
9. Штеренлихт Д. В. Гидравлика, книга 1. М: Энергоатомиздат, 1991. 351 с. ISBN 5-283-02112.
10. Штеренлихт Д. В., Алышев В. М., Яковлева Л. В. Гидравлические расчеты. М.: Колос, 1992. 286 с.
11. Альтшуль А. Д. Калицун В. И., Майграновский Ф. Г., Пальгунов П. П. – М.: Стройиздат, 1977. – 248 с.
12. Булгаков А. Б. Улучшение свойств жидких топлив гидромеханической обработкой в кавитационном поле. — М.: Недра, 1996. — 193 с. – ISBN 5-247-03495-3.
13. Башта Т. М., Руднев С. С., Некрасов Б. Б. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы. – М.: Машиностроение, 1982. – 424 с.
14. Гейер В. Г., Дулин В. С., Заря А. Н. Гидравлика и гидропривод. - М.: Недра, 1991. – 331 с.