

УДК 622.831.322:532.538

Ю. А. ЖУЛАЙ*Институт транспортных систем и технологий НАН Украины***ОПРЕДЕЛЕНИЕ КПД КАВИТАЦИОННОГО ГЕНЕРАТОРА
КОЛЕБАНИЙ ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ**

В работе предложена методика определения КПД кавитационного генератора колебаний давления жидкости. Для расчета амплитуд использовалась уточненная линейная математическая модель, описывающая колебания, генерируемые периодически срывной кавитацией, а определение частот проводилось расчетно-экспериментальным способом. Приведены теоретические зависимости КПД генератора от давления подпора. Установлено, что КПД генератора на режимах работы, обусловленных процессами периодически срывной кавитации, превышает КПД статического воздействия. Оценка эффективности генератора выполнена на примере его работы в составе устройства гидроимпульсного воздействия на угольный пласт. Показано, что импульсное воздействие (при прочих равных условиях по давлению нагнетания и подпора) значительно эффективнее по сравнению со статическим нагнетанием, что приводит к снижению энергозатрат.

Ключевые слова: удельные энергозатраты, гидродинамическая кавитация, кавитационный генератор колебаний давления жидкости, гидроимпульсное воздействие, статическое нагнетание, поток энергии, КПД.

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

В условиях роста цен на энергоносители одним из направлений интенсификации технологических процессов и снижения их удельного потребления в различных отраслях промышленности является использование эффектов гидродинамической кавитации.

В качестве устройства, реализующего преобразование стационарного течения жидкости в кавитационный дискретно-импульсный поток, может использоваться известная в системе регулирования топлива ракетного двигателя трубка Вентури. Экспериментально установлено, что при углах раскрытия диффузора $\beta > 16^\circ$ (в регуляторах расхода $\beta < 9^\circ$) она генерирует высокочастотные колебания давления в диапазоне частот от 100 до 15000 Гц. Такая трубка Вентури со специальной геометрией получила название кавитационный генератор колебаний давления жидкости [1] (далее генератор). Как источник ударных гидродинамических волн, он позволяет реализовать способ создания импульсов давления жидкости, в несколько раз превышающих по величине давление на выходе насосной установки P_n . Генератор обладает простотой изготовления, отсутствием подвижных частей, не требует дополнительных источников энергии и органично вписывается в существующее оборудование. Примеры практического использования генератора в метал-

лургии, машиностроении и химической промышленности приведены в работах академика НАН Украины В.В. Пилипенко [2]. Автоматизированная кавитационная установка для очистки вафельных конструкций обечаек топливных баков ракеты-носителя «Зенит» от заусениц, разработанная Институтом технической механики НАН Украины, успешно эксплуатировалась ЮМЗ.

Известны исследования, направленные на разработку энергосберегающих технологических процессов в горнодобывающей отрасли при бурении и раскольматации водяных скважин. Институтом геотехнической механики НАН Украины интенсивно ведутся работы по созданию технических средств, в которых используют генератор для борьбы с газодинамическими явлениями в шахтах [3].

Использование генератора во всех этих случаях позволяет снизить удельное энергопотребление до 50%. Однако, теоретическая оценка преимуществ дискретно-импульсного воздействия по сравнению со статическим нагнетанием технологической жидкости при разработке оборудования или его модернизации с использованием генератора отсутствует и по-прежнему остается актуальной задачей.

**1. Анализ последних исследований
и публикаций**

Впервые оценка энергетических характеристик стационарного и пульсирующего воздействия жидкости была предпринята в работе [4], для чего были

выполнены расчеты потоков энергии по Раушенбаху. Объектом исследования в данной работе является генератор колебаний давления жидкости, входящий в состав устройства гидроимпульсного воздействия на угольный пласт (УГИВ) [5].

Основными параметрами, определяющими эффективность гидроимпульсного рыхления, являются размах и частота автоколебаний давления жидкости, воздействующих на горный массив. Именно они определяют рабочий режим устройства и обеспечивают необходимый уровень вибрационной нагрузки блочно-слоистой структуры угля и, как следствие, инициирование развития разнонаклонных трещин.

Схема УГИВ с расположением в скважине представлена на рис. 1.

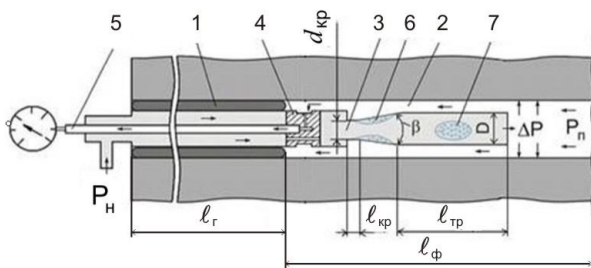


Рис. 1. Устройство гидроимпульсного воздействия на угольный пласт:

- 1 – герметизатор скважины; 2 – фильтрационная часть скважины; 3 – генератор; 4 – разделитель потока жидкости; 5 – обратный канал для замера давления подпора жидкости; 6 – кавитационная каверна; 7 – оторвавшаяся часть каверны

Основным критерием выбора геометрических параметров кавитационного генератора (диаметр критического сечения $d_{кр} = 2,5$ мм и ее длина $l_{кр} = 3,0$ мм, угол раствора диффузора $\beta = 20^0$ и диаметр выходного сечения $D = 10$ мм) и последидиффузорного канала (длина $l_{тр} = 250$ мм) является реализация максимальных значений размаха автоколебаний давления технологической жидкости в скважине.

Установлено, что суммарный поток энергии \mathcal{E}_Σ при срывном кавитационном течении жидкости представляет собою

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

где $P_n Q_n = \mathcal{E}_y$ – это поток энергии, соответствующий установившемуся течению, не связанный с колебаниями. Он определяется давлением подпора P_n и объемным расходом жидкости через насос Q_n . 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 .

В работе [4] определение значения колебательной составляющей объемного расхода за период колебаний T выполнялось по выражению

$$\Delta Q = \mu F_{кр} \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{\frac{2\delta P}{\rho}} dt, \quad (2)$$

где μ – коэффициент расхода генератора,

$F_{кр}$ – площадь критического сечения,

ρ – плотность жидкости,

δP – отклонение давления от установившегося значения.

Учитывая, что форма отклонения давления δP за период колебаний T близка к треугольной, расчет колебательной составляющей объемного расхода ΔQ выполнялся по формуле

$$\Delta Q = \mu F_{кр} \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}, \quad (3)$$

где ΔP – размах автоколебаний.

Однако, анализ результатов, полученных в этой работе, показал, что до давления подпора $P_n \leq 6$ МПа значения энергии суммарного потока превышают по величине энергию, развиваемую насосом \mathcal{E}_n . Т.е. отношение $\mathcal{E}_\Sigma / \mathcal{E}_n$, которое в классической физике определяется как КПД, больше единицы. Это противоречит закону сохранения энергии и указывает на возможную ошибку при определении колебательных составляющих ΔP и ΔQ или частоты f .

Определение значения ΔP выполнялось по экспериментальным зависимостям от давления подпора P_n не вызывающим сомнения. В то же время, средств измерения быстропеременных колебаний расхода не существует, а расчет ΔQ по формуле (3) без учета скважности колебаний давления за период T приводит к значительной погрешности ее определения. Это наглядно видно из копии осциллограммы колебаний давления жидкости за генератором и поясняющего графического изображения к ней, представленных на рис. 2.

Характер колебательного процесса указывает, что в проточной части генератора реализуется режим периодически срывной кавитации, а на выходе из него возникают ударные колебания давления с явно выраженной скважностью. Это указывает на то, что интеграл в формуле (2) необходимо брать в пределах от 0 до $T-t_c$, где t_c – длительность скважности. Она изменяется по неизвестному нам закону от давления подпора, а ее определение по осциллограммам затруднительно. Учитывая вышеизложен-

ное, определение составляющей ΔQ , как это выполнено в работе [4], не корректно и приводит к увеличению значений суммарного потока энергии \mathcal{E}_Σ .

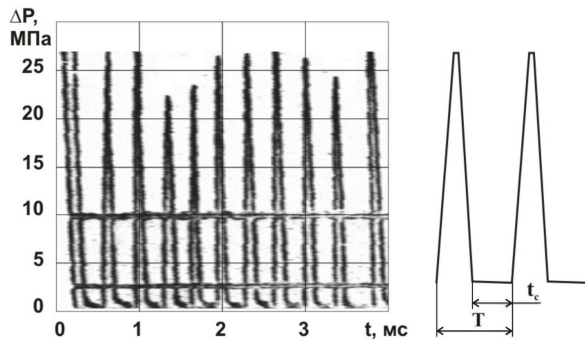


Рис. 2. Фрагмент осциллограммы давления ΔP_1 во времени на выходе из генератора с $d_{кр} = 2,5$ мм и $P_n = 11$ МПа

Целью настоящей работы является определение КПД генератора и оценка его преимуществ по сравнению со статическим нагнетанием жидкости.

2. Методика определения КПД генератора

В настоящей работе колебательная составляющая ΔQ определялась из условия баланса ее равенства изменению объема оседлой кавитационной каверны в момент отрыва ΔV_k , умноженного на частоту колебаний f

$$\Delta Q = \Delta V_k \cdot f. \tag{4}$$

Как указано в работе [6], определение частот f в соответствии с [2], при повышении давления нагнетания и уменьшении диаметра критического сечения генератора, имеют заметное расхождение с экспериментальными значениями. Поэтому частота колебаний f определялась расчетно-экспериментальным способом [6], относительная погрешность которого не превышает 7%, по формуле

$$f = Sh_3 \frac{v_{кр}}{r_{кр}} \tau, \tag{5}$$

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

$$Sh_3 = 0,0066 \cdot r_{кр} + 0,0749, \tag{6}$$

где $r_{кр}$ и $v_{кр}$ – радиус критического сечения генератора и скорость жидкости в нем, определяемой по известной формуле

$$v_{кр} = \sqrt{2(P_n - P_k) / \rho}, \tag{7}$$

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 $l_k \leq l_d$ (где l_k и l_d – осевые длины каверны и диффузора генератора):

$$\Delta V_k = \frac{\pi l_k}{2} \left[3r_{кр}^2(1-\mu) + 3r_{кр}l_k \left(\text{tg} \frac{\beta}{2} - \text{tg} \frac{\alpha}{2} \right) + l_k^2 \left(\text{tg}^2 \frac{\beta}{2} - \text{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \right) \right], \tag{8}$$

где α – угол расширения струи жидкости.

Осевая длина каверны в зависимости от степени развития кавитации определяется в соответствии с [6] по формуле

$$l_k = \frac{r_{кр}}{\text{tg} \frac{\beta}{2}} \cdot \left(\sqrt{\frac{\mu}{1 - \sqrt{0,88 - \tau}}} - 1 \right), \tag{9}$$

где τ – параметр кавитации. Он определяется как отношение давления подпора к давлению нагнетания, т.е.

$$\tau = \frac{P_n}{P_n}. \tag{10}$$

Расчет колебательных составляющих расхода ΔQ производился по формуле (4) с учетом (5)÷ (10), а давления ΔP – по уточненной линейной математической модели кавитационного генератора [7] с относительной погрешностью, не превышающей 10%. Данные получены при значениях давления нагнетания $P_n = 11$ МПа, угла расширения струи $\alpha = 1,35^\circ$, скорости звука в жидкости $c = 1100$ м/с, коэффициента расхода жидкости $\mu = 0,95$ и давления насыщенных паров $P_k = 0,0024$ МПа.

3. Анализ численных результатов

На рис. 3 представлены расчетные зависимости колебательных составляющих давления ΔP , расхода ΔQ и частоты f от давления подпора P_n в диапазоне его изменения от 0,5 до 9 МПа.

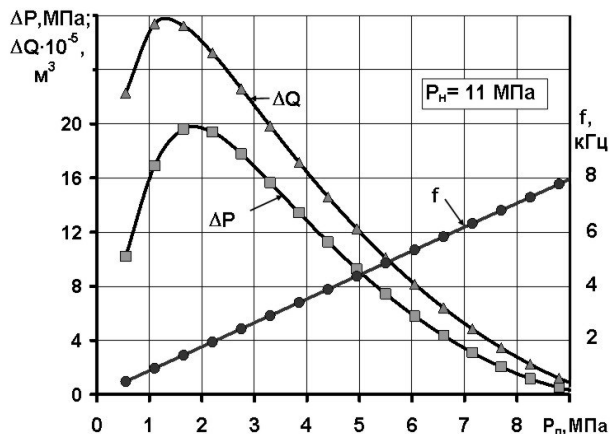


Рис. 3. Расчетные зависимости колебательных составляющих ΔP , ΔQ и частоты f от давления подпора P_n

Характер установленных зависимостей $\Delta P = f(P_n)$ и $\Delta Q = f(P_n)$ показывает, что размах этих колебательных величин с ростом P_n сначала резко возрастает, достигая максимума вблизи значений давления подпора $P_n \approx 1,8$ и $P_n \approx 1,3$ МПа соответственно, и, в дальнейшем, при определенном значении давления подпора P_n уменьшается. Максимальное значение ΔP приблизительно в 1,9 превышает давление на входе в генератор P_n .

Зависимость частоты f колебаний от давления подпора P_n линейна. С увеличением давления подпора наблюдается рост частоты колебаний.

Эти расчеты позволили определить поток энергии, соответствующий колебательным составляющим $\mathcal{E}_k = \Delta P \cdot \Delta Q$, и суммарный поток энергии \mathcal{E}_Σ .

Зависимости этих потоков энергии и КПД при импульсном и статическом воздействии жидкости на угольный пласт от давления подпора P_n приведены на рис. 4.

Из него следует, что:

- зависимость $\mathcal{E}_y = f(P_n)$, соответствующая установившемуся течению, носит линейный характер. Значения \mathcal{E}_y с ростом давления подпора увеличиваются от 0 и стремятся к максимальному значению, развиваемому насосом \mathcal{E}_n ;

- при изменении давления подпора P_n от 0 до $\approx 1,5$ МПа динамическая составляющая \mathcal{E}_k потока энергии при гидроимпульсном воздействии увеличивается от нуля до максимального значения $\mathcal{E}_k \approx 5,4$ кДж/с;

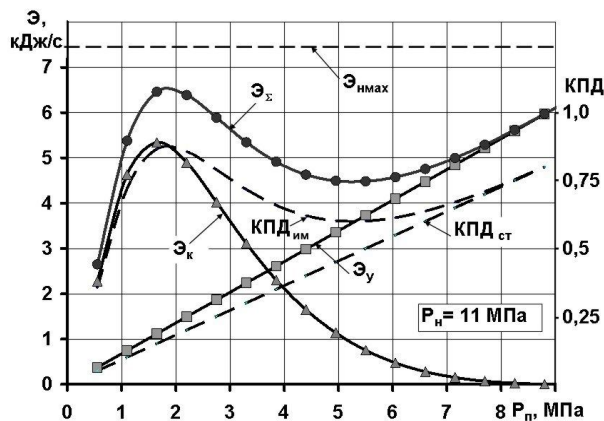


Рис. 4. Расчетные зависимости потоков энергии и КПД от давления подпора P_n

- в дальнейшем с ростом давления подпора значение динамической составляющей \mathcal{E}_k монотонно уменьшается, достигая нулевого значения при $P_n \approx 8,5$ МПа. Это объясняется снижением уровня колебаний давления ΔP и объемного расхода ΔQ при увеличении давления подпора P_n ;

- с ростом значения давления подпора P_n от нуля до $\approx 1,7$ МПа суммарный поток энергии \mathcal{E}_Σ при гидродинамическом воздействии увеличивается, достигая максимального значения $\mathcal{E}_{\Sigma \max} \approx 6,5$ кДж/с, с последующим его снижением. При $P_n \approx 5,5$ МПа суммарный поток \mathcal{E}_Σ достигает минимума $\approx 4,5$ кДж/с. Дальнейший рост значения \mathcal{E}_Σ объясняется увеличением составляющей потока энергии, соответствующего установившемуся течению \mathcal{E}_y , при значительном снижении уровня динамического воздействия на жидкость.

Исследование, выполненное в данной работе, позволяет оценить КПД при гидрорыхлении импульсным или статическим нагнетанием жидкости в угольный пласт. Выражение для КПД при импульсном воздействии представлено в виде

$$KPD_{им} = \frac{\mathcal{E}_\Sigma}{\mathcal{E}_n}, \quad (11)$$

а при статическом нагнетании –

$$KPD_{ст} = \frac{\mathcal{E}_{ст}}{\mathcal{E}_n}. \quad (12)$$

Рассмотрение расчетных зависимостей КПД при импульсном и статическом воздействии на пласт от давления подпора P_n (см. рис. 4) показывает, что:

- с ростом подпора P_n от 0,5 МПа $KPD_{им}$ сначала резко возрастает, достигая максимального значе-

ния 0,87 при $P_n \approx 1,9$ МПа, и, в дальнейшем, уменьшается до 0,6 при $P_n \approx 5,5$ МПа. Такое поведение $KPD_{им} = f(P_n)$ обусловлено характером зависимости \mathcal{E}_Σ от P_n (рис. 4). Дальнейший рост $KPD_{им}$ при $P_n > 5,5$ МПа объясняется существенным увеличением потока энергии, соответствующего установившемуся течению, над колебательной составляющей, которая практически приобретает нулевое значение при $P_n \approx 8,5$ МПа;

– как и следовало ожидать, характер зависимости $KPD_{ст} = f(P_n)$ линейный. С ростом давления подпора P_n $KPD_{ст}$ увеличивается.

Сопоставление зависимостей $KPD_{им} = f(P_n)$ и $KPD_{ст} = f(P_n)$ показывает, что в диапазоне изменения давления подпора P_n от 0,5 МПа до 6 МПа импульсное воздействие на пласт значительно эффективнее статического нагнетания.

4. Оценка эффективности генератора в составе УГИВ

Эффективность использования генератора в составе УГИВ рассмотрим на примере гидрорыхления угольного пласта импульсным воздействием по сравнению со статическим нагнетанием жидкости.

В работе [4] приведены результаты горно-экспериментальных работ по рыхлению выбросоопасных угольных пластов в условиях Шахтоуправления «Молодогвардейское» с глубиной залегания шахтного поля $H=617$ м в два этапа. На первом этапе определялись параметры гидрорыхления статическим нагнетанием жидкости по нормативной методике [8], на втором – по методике горно-экспериментальных работ гидроимпульсного действия. Процесс гидрорыхления осуществлялся через две скважины длиной $\ell = 6,0$ м, глубиной герметизации $\ell_r \geq 4,0$ м и длиной фильтрационной камеры $\ell_\phi = 2,0$ м (см. рис. 1).

Расчётные параметры гидрорыхления по нормативной методике составили:

– давление при статическом нагнетании жидкости $P_n = (0,75 \div 1,0) \gamma_n H = 12,1 \dots 16,1$ МПа ($\gamma = 2,5 \text{ м}^3/\text{т}$ – удельный вес горных пород,);

– количество воды, нагнетаемой в одну скважину, $1,35 \text{ м}^3$.

Расчетное давление нагнетания при гидроимпульсном рыхлении определено из условия гидро-разрыва пласта. Давление жидкости на входе устройства не должно превышать $P_n = 0,75 \gamma_n H \leq 12,1$ МПа. В процессе нагнетания манометром через обратный канал 5 (см. рис.1) осуществлялся контроль давления жидкости в фильтрационной части скважины. Снижение этого давления не менее чем на 30

% от начального является основным критерием завершения процесса гидрорыхления угольного пласта.

Контроль гидрорыхления производился звукоулавливающей аппаратурой ЗУА-98. Она позволяет установить уровни акустических сигналов сейсмограммы развития трещин и рабочие диапазоны генератора.

Сопоставление полученных результатов показывает, что при импульсном нагнетании по отношению к статическому время гидрорыхления снижается на 35 %, а объем жидкости, закачанной в пласт, на 40 %.

Кроме этого, визуальными наблюдениями было установлено, что при статическом нагнетании через 15 минут воздействия произошёл прорыв жидкости в забой выработки, что не позволило выполнить качественное гидрорыхление. При импульсном нагнетании выделение жидкости наблюдается в конце процесса рыхления в виде капеза с поверхности пласта, что свидетельствует о качественном гидрорыхлении.

Для получения информации о влиянии гидроимпульсного воздействия на угольный пласт и вмещающие породы, в забое выработки были установлены точки измерения резонансно-акустического профиля (РАП). Контроль РАП показал, что в углепородном массиве при регистрации сигнала до и после гидроимпульсного воздействия наблюдается значительное изменение сигналаграммы. Снижение амплитуды и спектра частот подтверждают эффективность гидроимпульсного рыхления угольного пласта.

Таким образом, было установлено, что устройство гидроимпульсного воздействия с применением генератора обеспечивает качественное гидрорыхление и дегазацию выбросоопасных угольных пластов.

Анализ представленных расчетов и результатов горно-экспериментальных работ позволил установить, что:

– по отношению к нормативной методике время гидроимпульсного рыхления уменьшается примерно на 40%, а объем жидкости, нагнетаемой в пласт – на 40...60 %, что приводит к значительному снижению удельных энергозатрат.

Выводы

Анализ представленных расчетов КПД генератора и результаты горно-экспериментальных работ позволили установить, что:

– при прочих равных условиях (по давлению нагнетания и в диапазоне изменения подпора, где реализуется режим периодически срывной кавитации в проточной части генератора) КПД при гидро-

импульсном воздействии превышает КПД статического воздействия примерно $4,8 \div 1,2$ раза;

– по отношению к нормативной методике времени гидроимпульсного рыхления угольного пласта уменьшается примерно на 40 %, а объем нагнетаемой жидкости в пласт – на 40...60 %, что приводит к снижению удельных энергозатрат примерно на 50%;

– гидроимпульсное рыхление, не перегружая массив угля в целом, порождает в упругой среде переменные напряжения, способствующие образованию разветвленной системы микротрещин. Вследствие этого, растет эффективная пористость угля, обеспечиваются условия для повышения его влажности и ослабления массива. Это подтверждает возможность повышения эффективности гидрорыхления выбросоопасных угольных пластов и борьбы с газодинамическими факторами в шахтах при проведении пластовых подготовительных выработок;

– предложенная методика определения КПД генератора имеет важное практическое значение. Она позволяет на стадии проектирования нового оборудования или модернизации существующего, с применением генератора без дополнительных экспериментальных исследований оценить эффективность гидроимпульсного воздействия в технологическом процессе.

Литература

1. 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.

2. Pilipenko, V. V. Cavitation self-oscillations intensify technological processes [Text] / 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. *Hydrodynamic cavitation in energy-saving technological processes of mining sector* [Text] / Y. Zhulay, V. Zberovskiy, A. Anglovskiy, I. Chugunkov // *Geomechanical Processes During Underground Mining Taylor & Francis Group*. – London, 2012. – P. 51–56.

4. Ангеловський, О. А. Обґрунтування гідродинамічних параметрів пристрою гідроімпульсного розпушування вугільних пластів [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.06 / Ангеловський Олександр Анатолійович ; ІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ, 2015. – 23 с.

5 Пат. 87038 Україна, МПК E21F 5/02 . Пристрій для гідроімпульсного впливу на вугільний пласт [Текст] / Л. М. Васильєв, Ю. О. Жулай, В. В. Зберовський, П. Ю. Моїсеєнко, М. Я. Трохимец ; заявник і патентовласник ІГТМ НАН України. – № а 200710209/9822 ; заявл. 13.09.07 ; опубл. 10.06.09, Бюл. № 11.

6. Жулай, Ю. А. Разработка расчетно-экспериментального метода определения частот кавитационных колебаний [Текст] / Ю. А. Жулай, А. С. Ворошилов, С. В. Комаров // *36. наук. праць НГУ України*. – Дніпропетровськ, 2015. – № 48. – С. 140-146.

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. СОУ 10.1.00174088.011-2005. Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ [Текст]. Введений вперше 30.12.2005 Мінвуглепром України. – К. : Вид-во Мінвуглепром України, 2005. – 225 с.

References

1. Pilipenko, V. V., Zadoncev, V. A., Man'ko, I. K., Dovgot'ko, N. I., Drozd, V. A. A.s. 504444 SSSR, MKI V 06 V 1/18. Generator kolebanij davljenija vody [Generator water pressure fluctuations], (SSSR). – no. 1782997, zajavl. 06.05.72, opubl. 05.02.76, Bjul. 9.

2. 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 827, 1998, pp. 32-1–32-4.

3. Zhulay, Y., Zberovskiy, V., Anglovskiy, A., Chugunkov, I. Hydrodynamic cavitation in energy-saving technological processes of mining sector. *Geomechanical Processes During Underground Mining Taylor & Francis Group*, London, 2012, pp. 51–56.

4. Anhelovs'kyu, O. A. Obgruntuvannya hidrodinamichnykh parametriv prystroyu hidroimpul'snoho rozpushuvannya vuhil'nykh plastiv, avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk [Justification hydrodynamic parameters of the device Hydro loosening coal seams. Thesis. Dis. ... Candidate. Sc. Science]. Dnipropetrovsk, IGTM NAS of Ukraine Publ., 2015. 23 p.

5 Vasyly'yev, L. M., Zhulay, Yu. O., Zberovs'kyu, V. V., Moiseyenko, P. Yu., Trokhymets, M. Ya. Pat. Ukrayina 87038, MPK E21F 5/02. Prystriy dlya hidroimpul'snoho vplyvu na vuhil'nyy plast [Device for Hydro impact on coal seam], zayavnyk i patentovlasnyk IHTM NAN Ukrayiny, no. a 200710209/9822, zayavl. 13.09.07, opubl. 10.06.09, Byul. 11.

6. Zhulaj, Ju. A., Voroshilov, A. S., Komarov, S. V. Razrabotka raschetno-jeksperimental'nogo metoda opredelenija chastot kavitacionnyh kolebanij [Development of computational and experimental method for determining the frequency of oscillations of cavitation]. *Zb. nauk. pr. NGU Ukraini*, Dnipropetrovsk, 2015, no. 48, pp. 140-146.

7. Zhulaj, Ju. A. Utochnenie linejnoy matematicheskoy modeli kavitacionnogo generatora kolebanij davljenija zhidkosti [Refinement of linear mathematical model of cavitation generator of fluid

pressure oscillation]. *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*, 2014, no. 7/114, pp. 21-26.

8. SOU 10.1.00174088.011-2005. *Pravyla veden-nya hirnychых robot na plastakh, skhyl'nykh do ha-zodynamichных yavыshch* [Rules of mining in seams

prone to gas-dynamic phenomena] Vvedenyу vpershe 30.12.2005 Minvuhleprom Ukrayiny, Kiev, Minvuhleprom Ukrayiny Publ., 2005. 225 p.

Поступила в редакцию 12.08.2016, рассмотрена на редколлегии 16.09.2016

ВИЗНАЧЕННЯ ККД КАВІТАЦІЙНОГО ГЕНЕРАТОРА КОЛИВАНЬ ТИСКУ РІДИНИ

Ю. О. Жулай

У роботі запропоновано методику визначення ККД кавітаційного генератора коливань тиску рідини. Для розрахунку амплітуд використовувалась уточнена лінійна математична модель, що описує коливання, генеровані періодично зривною кавітацією, а визначення частот проводилося розрахунково-експериментальним способом. Приведено теоретичні залежності ККД генератора від тиску підпору. Встановлено, що ККД генератора на режимах роботи, обумовлених процесами періодично зривної кавітації, перевищує ККД статичної дії. Оцінку ефективності генератора виконано на прикладі його роботи у складі обладнання гідроімпульсної дії на вугільний пласт. Показано, що імпульсна дія (за інших рівних умов по тиску нагнітання і підпору) значно ефективніше в порівнянні із статичним нагнітанням, що призводить до зниження енерговитрат.

Ключові слова: питомі енерговитрати, гідродинамічна кавітація, кавітаційний генератор коливань тиску рідини, гідроімпульсна дія, статичне нагнітання, потік енергії, ККД.

DEFINITION OF EFFICIENCY OF CAVITATION GENERATOR OF FLUID PRESSURE OSCILLATION

Yu. A. Zhulay

In the paper the design procedure of efficiency of cavitations generator of fluid pressure oscillations is proposed. Oscillation amplitudes were calculated used the refined linear mathematical model describing oscillations generated by periodically stalling cavitations, and the frequencies were determined by an experiment-calculated method. The theoretical dependences of the generator efficiency on backup pressure are summarized. It is determined that generator efficiency on the operating modes caused by periodically stalling cavitation processes exceeds its efficiency at static action. Generator efficiency is estimated by the example of its operation as a part of a device of hydropulse action on a coal layer. It is shown that pulse action (on equal injection and backup pressures) is much more effective in comparison with static injection and thereby the power inputs are decreased.

Keywords: specific power inputs, hydrodynamic cavitation, cavitation generator of pressure fluid oscillations, hydro pulse action, static injection, energy stream, efficiency.

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

Zhulay Yury Alexeyevich – Candidate tehn. Sciences, leading researcher of the ‘Transmag’ Institute of Transport Systems and Technologies of NAS of Ukraine, Dnipro, e-mail: zhulay@westa-inter.com