

УДК 622.232.5: 532.517.6: 532.232.72

В. С. Коломиец, канд. техн. наук, доц., **А. Л. Зуйков**, аспирант
Донецкий национальный технический университет

К УЛУЧШЕНИЮ ДИНАМИЧЕСКИХ И СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНЫХ СТРУЙ

Проведен графоаналитический анализ момента появления кавитации при работе гидроимпульсных устройств, а также получена зависимость диаметра насадка от диаметра ствола, при которых невозможно образование разрыва сплошности потока.

гидроимпульсные устройства, кавитация, графоаналитический анализ

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. История развития гидравлической добычи угля на шахтах Украины и стран ближнего и дальнего зарубежья берет свое начало с 30 – х годов прошлого столетия [1]. За это время на практике, наибольшее применение нашли струи стационарного течения, различной мощности и диаметра. Однако широкого применения на угледобывающих предприятиях стационарная струя не получила из-за непостоянства динамических и структурных характеристик её по мере увеличения расстояния между насадком и разрушаемым массивом. В решении задачи, поставленной Министерством угольной промышленности СССР в 1987г. перед научно-исследовательскими организациями, по созданию и внедрению устройств для улучшения динамических характеристик струй гидромониторов, принял участие и ДонНТУ.

Анализ исследований и публикаций. Многочисленными исследованиями водяных струй [2, 3] было отмечено, что эффективность гидроотбойки в большой степени зависит от выбора частотного воздействия струи на угольный массив.

По результатам экспериментальных исследований по изучению динамики струй импульсного характера, проведенных в ДонНТУ на тот период, было установлено, что импульсная струя создаваемая двухствольным импульсным гидромонитором ГИ–4 дает повышение производительности в 1,7–2,5 раза и увеличение эффективной дальности в 1,6–1,8 раза в сравнении со стационарной струей тех же параметров [4].

Однако из-за сложившегося положения в угольной промышленности все ранее существующие на территории Украины гидрошахты

свернули свою деятельность и перешли на традиционную (“сухую”) технологию выемки угля

Постановка задачи. Поэтому дальнейшие разработки группы гидроимпульсной техники кафедры «Энергомеханические системы» ДонНТУ были направлены на использование достоинств гидравлической добычи в условиях действующих шахт, что позволило создать компактные, высокоомобильные машины различного технологического назначения, предназначенные для разрушения горного массива в самых разнообразных горно-геологических условиях.

Изложение материала и результаты. Основой этих машин является генератор импульсов, позволяющий преобразовывать высоконапорный, малорасходный стационарный поток рабочей жидкости в импульсный, того же давления, но повышенных мгновенных расходов.

За период эксплуатации этих гидроимпульсных устройств были отмечены нестабильные автоколебательные режимы их работы приводящие к снижению эффективности гидроотбойки. Одной из причин нестабильного режима является образование разрыва сплошности потока жидкости (кавитация), которая наблюдается на контактной поверхности запорного клапана (рис.1, сечение 1-1).



Рисунок 1 – Схема системы генератор импульсов – ствол – насадок

Образовавшиеся полости мгновенно захлопываются, высвобождая при этом колоссальную энергию, которая, в конечном итоге, влияет как на скорость, так и на равномерность перемещения запорного устройства клапана. Это влияет на отклонение от стабильного автоколебательного режима работы гидроимпульсных устройств, а также, при длительном воздействии кавитационной эрозии (рис. 2), снижает герметизацию контактной поверхности клапана, что приводит к недопустимым объёмным потерям.

Наиболее простым методом для анализа момента появления разрыва сплошности является графоаналитический. Этот метод дает возможность решать задачу исследования переходных процессов, при граничных условиях, изображаемых графическими зависимостями

между давлением и расходом для данных моментов времени, что позволяет увязать понимание процесса с одновременным установлением расчетных параметров.



Рисунок 2 - Влияние кавитационной эрозии на поверхность запорного устройства после непродолжительной работы

Суть графоаналитического метода заключается в построении на плоскости с координатами p – Q граничных зависимостей для конечных сечений струеформирующего ствола и волновых характеристик, которые являются графическим изображением уравнения Н. Е. Жуковского [5], определяющего связь между изменением давления и расхода в переходном режиме. Это уравнение имеет вид

$$\Delta p = \pm \frac{4 \cdot \rho \cdot c}{\pi \cdot d_{ств}^2} \cdot \Delta Q \quad (1)$$

где Δp – изменение давления в струеформирующем стволе, МПа;

ρ – плотность потока рабочей жидкости, кг/м³;

c – скорость распространения ударной волны, м/с;

ΔQ – изменение расхода, м³/с.

$d_{ств}$ – внутренний диаметр струеформирующего ствола, м.

Выражение (1) является уравнением прямой линии с тангенсом угла наклона $\pm \frac{4 \cdot \rho \cdot c}{\pi \cdot d_{ств}^2}$. Знак наклона волновой характеристики опре-

деляется направлением перемещения волны давления относительно движения жидкости в стволе. Наклон волновой характеристики положителен, если волна движется против направления потока, и отрицателен при совпадении их направлений [5].

В тоже время, при графоаналитическом методе решения поставленной задачи, невозможно учесть распределение потерь на трение по длине ствола. Поэтому необходимо использовать метод Шнидера [6], который заключается в том, что позволяет сконцентрировать потери по длине в одной точке (в нашем случае у запорного элемента клапана) в виде местного сопротивления. Этот метод построения дает возможность достаточно точно воспроизвести процесс происходящий в системе, с одновременным отражением его затухания, вызванного трением. Решение поставленной задачи графоаналитическим методом предполагает, что изменение входного сопротивления клапана происходит за достаточно короткое время, т.е. мгновенно.

Граничное условие для сечения 1–1 (рис. 1), с учетом сосредоточения в нем распределенного по всей длине сопротивления ствола запишется в виде:

$$p(0,t) = p_o - \rho \cdot g \cdot (a_{ств} + a_{кл}) \cdot Q^2 \quad (2)$$

где p_o – давление перед входом в ствол до возмущения, Па;

$a_{ств}$ – гидравлическое сопротивление ствола, $\text{с}^2/\text{м}^5$;

$a_{кл}$ – гидравлическое сопротивление клапана, $\text{с}^2/\text{м}^5$;

Q – расход жидкости через сечение 1–1, $\text{м}^3/\text{с}$.

Граничное условие для сечения 2–2 (рабочий насадок), выражается уравнением:

$$p(L_{ств}, 0) = \rho \cdot g \cdot a_{нас} \cdot Q^2 \quad (3)$$

где $a_{нас}$ – гидравлическое сопротивление насадка, $\text{с}^2/\text{м}^5$.

Давление перед входом в ствол p_o , а так же гидравлические сопротивления $a_{нас}$, $a_{кл}$ и $a_{ств}$, относятся к конструктивным элементам генератора импульсов и должны быть определены. Последние рассчитываются по известным зависимостям:

$$a_{нас} = \frac{8}{g \cdot (\pi \cdot \mu \cdot d_{нас}^2)^2}; \quad (4)$$

$$a_{кл} = \frac{1}{2 \cdot g \cdot (\pi \cdot \mu \cdot d_{кл}^2)^2};$$

$$a_{ств} = \frac{8 \cdot \lambda \cdot L_{ств}}{\pi^2 \cdot g \cdot d_{ств}^5},$$

где μ – коэффициент расхода насадка, $\mu = 0,94 - 0,96$;

$d_{нас}$ – диаметр рабочего насадка, м;

$d_{кл}$ – диаметр проходного отверстия клапана, м;

λ – коэффициент Дарси;

$L_{ств}$ – длина ствола, м.

Пользуясь выражениями (1) – (3) на координатной сетке $p-Q$ строятся характеристики входного и выходного (насадка) сечения ствола, а также характеристика ударной волны.

Общая схема распространения нестационарного напорного течения представлена на рис. 3. На графике точка с координатой $(0, 0)$ представляет начальный момент $(t=0)$, когда клапан генератора импульсов закрыт, а давление и расход в стволе равны $p(L_{ств}, t) = Q(L_{ств}, t) = 0$.

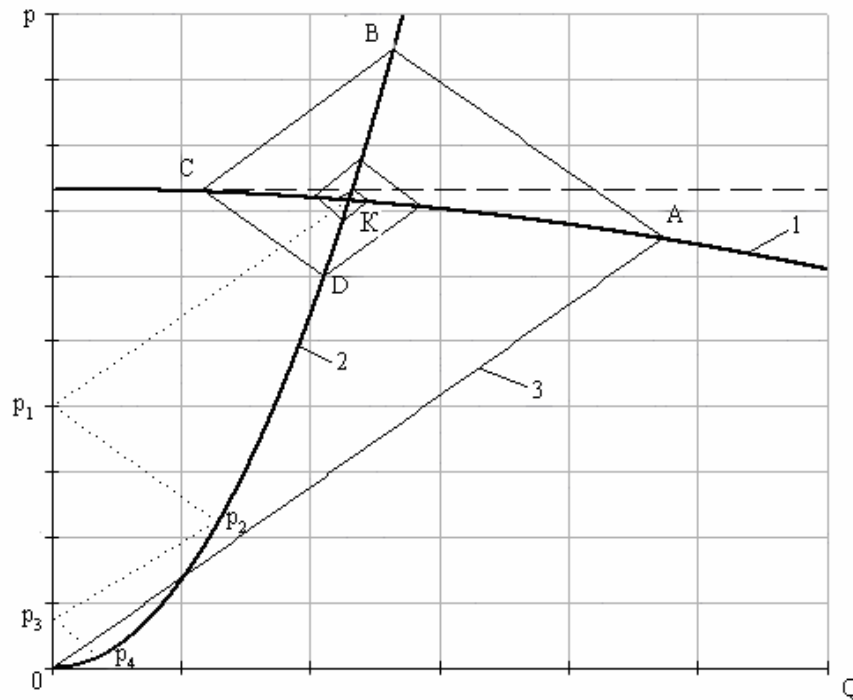


Рисунок 3 - Графический метод расчета давления в струеформирующем стволе:

- 1 – характеристика входного сечения;
- 2 – характеристика насадка;
- 3 – волновая характеристика.

После открытия клапана жидкость под давлением направляется во внутреннюю полость ствола, где происходит повышение давления до p_A . Волна повышенного давления направляется к насадку, имеющему сопротивление на 2–3 порядка больше сопротивления ствола. Вследствие этого возникает гидравлический удар и мгновенный скачок давления до величины p_B .

Отразившись от насадка, волна повышенного давления направляется обратно к клапану, где приобретает параметры точки p_C . Дальнейшее распространение волн нестационарного течения протекает аналогично рассмотренному процессу. При этом, из-за потерь по длине, происходит снижение давления перед насадком до величины равной стационарному течению, представленного на рисунке точкой пересечения характеристик входного сечения и насадка (точка K).

После окончания выстрела, которое характеризуется закрытием клапана, также наблюдается нестационарность течения жидкости во внутренней полости ствола. Этот процесс происходит в соответствии с ломаной линией $p_K - p_1 - p_2 - p_3 - p_4$ (точечная), показанной на рис. 3 и построенной по вышерассмотренной методике.

Для изучения кавитационного эффекта на рис. 4 представлена увеличенная начальная часть характеристики насадка. Предположим, что волна возмущения с параметрами p_n, Q_n отразившись от насадка, движется к клапану генератора импульсов. При этом из-за инерционности потока, с массой распределенной по длине, расход, прошедший через насадок за последнюю фазу, невозможно компенсировать дальнейшим снижением давления во входном сечении. Это приводит к снижению давления до давления насыщенных паров жидкости и разрыву сплошности потока в данном сечении:

$$p = (0, t) = p_{\text{пар}}$$

Для установления зависимости, при которой возможен разрыв сплошности потока необходимо провести из точки с координатами $(0, p_{\text{пар}})$ касательную АВ к характеристике насадка. При этом касательная АВ является критической линией кавитации, позволяющей установить характер протекающего режима. Так, если сформировавшаяся волновая характеристика будет более пологой, чем линия АВ, то в данном случае не будет наблюдаться нарушения сплошности потока жидкости.

Из вышеизложенного, можно сделать вывод, что возникновение кавитации будет лишь в тех струеформирующих стволах, волновая характеристика которых, выходя из предельной точки $(0, p_{\text{пар}})$ пере-

секает характеристику насадка. Аналитически условие течения жидкости без разрыва сплошности может быть представлено отсутствием корней решения для алгебраической системы из уравнений (3) и

$$p_{н1} + p_{нар} = \frac{4 \cdot \rho \cdot c}{\pi \cdot d_{ств}^2} \cdot Q_{н1}.$$

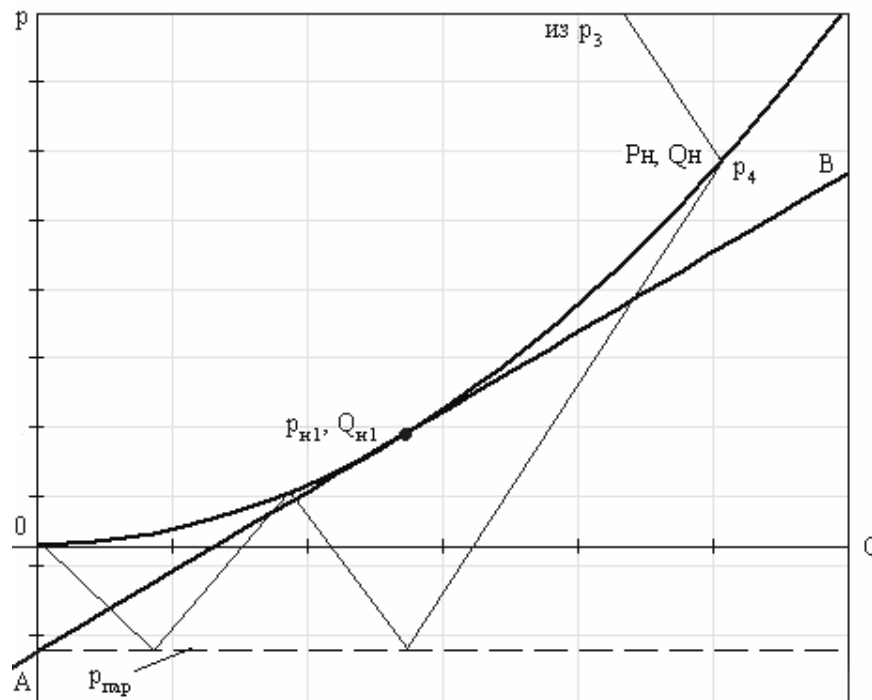


Рисунок 4 - К установлению образования разрыва сплошности потока во входном сечении ствола

Подставляя уравнение (3) в полученное выражение волновой характеристики, перейдем к квадратичной зависимости

$$\rho \cdot g \cdot a_{нас} \cdot Q_{н1}^2 - \frac{4 \cdot \rho \cdot c}{\pi \cdot d_{ств}^2} \cdot Q_{н1} + p_{нар} = 0,$$

в которой для существования мнимых корней необходимо, чтобы дискриминант $D < 0$

$$D = \left(\frac{4 \cdot \rho \cdot c}{\pi \cdot d_{ств}^2} \right)^2 - 4 \cdot \rho \cdot g \cdot a_{нас} \cdot p_{нар} < 0 \quad (5)$$

Решив это уравнение относительно $d_{нас}$, получим:

$$d_{нас} < 0,1 \cdot d_{ств} \quad (6)$$

Выводы. Зависимость (6) показывает связь конструктивных параметров насадка и струеформирующего ствола, при которых в последнем невозможно образование разрыва сплошности потока. В реальных условиях эксплуатации имеющихся на вооружении, в настоящее время, гидроимпульсных устройств выражение (6) не выполняется. Следовательно, во входном сечении ствола перед клапаном, в большинстве случаев будет наблюдаться кавитационный эффект, который необходимо учитывать при исследовании рассматриваемого неустановившегося процесса струеформирования и при конструировании запорного элемента генератора импульсов.

Список источников.

1. Мучник В.С., Голланд Э.Б., Маркус М.Н. Подземная гидравлическая добыча угля. – М.: Недра, 1986. – 223 с.
2. Тимошенко В. Г., Кравец В. Г. Пульсирующий гидромонитор с импульсным повышением давления // Уголь Украины. – 1985. – № 5. – С. 24–25.
3. Сигаев Е. А. Исследования гидроотбойки пульсирующими струями // Горный журнал. – 1964. – № 2. – С. 39–43.
4. Тимошенко В. Г., Кравец В. Г. Пульсирующий гидромонитор с импульсным повышением давления. // Уголь Украины. – 1985. № 5. с. 24–25.
5. Бержерон Л. От гидравлического удара в трубах до разряда в электрической сети. – М.: Машгиз, 1962. – 348 с.
6. Фокс Д. А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах: Пер. с англ. – М.: Энергоиздат, 1981. – 248 с.

Стаття надійшла до редколегії 09.09.2009

Рецензент: докт. техн. наук, проф. А. П. Кононенко

В.С.Коломієць, А.Л.Зуйков. До поліпшення динамічних і структурних характеристик імпульсних струменів. Проведений графоаналітичний аналіз моменту появи кавітації при роботі гідроімпульсних пристроїв, а також отримана залежність діаметру насадка від діаметру ствола, при яких неможливе утворення розриву сплошності потоку.

гідроімпульсні пристрої, кавітація, графоаналітичний аналіз

V.Kolomiets, A.Zuykov. Improvement of Dynamic Behavior and Structure of Impulse Jets. The paper describes the graphic-analytical analysis of the moment of cavitation appearance in the process of hydroimpulse device functioning and provides the dependence of nozzle diameter on trunk diameter which makes impossible the break of jet continuity.

hydroimpulse device, cavitation, graphic-analytical analysis

© В. С. Коломієць, А. Л. Зуйков, 2009