

УДК 622.831.322:532538

Ю.А. Жулай<sup>1</sup>, канд. тех. наук, ст. научн. сотр.,  
А.А. Ангеловский<sup>2</sup>1 – Институт транспортных систем и технологий  
Национальной академии наук Украины, г. Днепропетровск,  
Украина, e-mail: zhulay@westa-inter.com2 – Публичное акционерное общество „Краснодонуголь“,  
г. Краснодон, Украина

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ИМПУЛЬСНОГО НАГНЕТЕНИЯ ЖИДКОСТИ В УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ

Yu.A. Zhulay<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Tech.), Senior Research  
Fellow,  
A.A. Angelovskiy<sup>2</sup>1 – Institute of Transport Systems and Technologies of National  
Academy of Sciences of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine  
e-mail: zhulay@westa-inter.com2 – Public Joint-Stock Company “Krasnodonugol”,  
Krasnodon, Ukraine

## ENERGY APPROACH TO ANALYSYS OF THE FLUID PULSE INJECTION INTO A COAL BED

Одним из эффективных способов борьбы с внезапными выбросами угля и газа, взрывами метана в шахтах является нагнетание жидкости в угольные пласты в импульсном режиме. В последние годы значимые результаты в развитии этого направления получены Институтом геотехнической механики (ИГТМ) НАН Украины совместно с ПАО „Краснодонуголь“. Здесь разработаны способ и устройство для гидроимпульсного воздействия на угольные пласты с применением кавитационного генератора упругих колебаний давления жидкости. Результаты горно-экспериментальных работ по оценке эффективности применения погружного кавитационного генератора в технологической схеме гидрорыхления показали, что устройство обеспечивает его качественное проведение и дегазацию выбросоопасных угольных пластов с низкой гидравлической проницаемостью в зонах повышенного горного давления при проведении подготовительных выработок комбайнами.

**Цель.** Энергетическая оценка преимуществ гидрорыхления угольного пласта импульсным воздействием по сравнению со статическим нагнетанием жидкости.

**Методика.** Основана на теоретическом исследовании плотности потока энергии, протекающего в единицу времени через поверхность, с использованием экспериментально установленной зависимости величины импульса давления жидкости от значения подпора в скважине.

**Результаты.** Представлены расчетные зависимости потока энергии при импульсном и статическом нагнетании жидкости от давления подпора при давлении нагнетания в угольный пласт 20 МПа.

**Научная новизна.** Впервые установлено, что поток энергии при гидроимпульсном воздействии на угольный пласт (при прочих равных условиях по давлению нагнетания и одних и тех же величинах подпора) превышает поток энергии при гидрорыхлении статическим нагнетанием жидкости в 1,8 раза.

**Практическая значимость.** Рассмотрение представленных зависимостей подтверждает возможность повышения эффективности гидрорыхления выбросоопасных угольных пластов и борьбы с газодинамическими факторами в шахтах посредством гидроимпульсного воздействия при проведении пластовых подготовительных выработок.

**Ключевые слова:** *выбросоопасный угольный пласт, гидроимпульсное воздействие, статическое нагнетание, поток энергии*

**Постановка проблемы.** Перспектива развития угольной промышленности Украины в значительной мере связана с увеличением добычи угля из выбросоопасных пластов, которая в настоящее время составляет более 35% от общей добычи угля в стране. При этом интенсификация горных работ сдерживается газо-динамическим фактором – основным природным барьером достижения высокопроизводительной и безопасной разработки газонасыщенных угольных пластов. Внезапные выбросы угля и газа, взрывы метана и пыли приводят к катастрофическим последствиям. До настоящего времени основным способом борьбы с этими явлениями в шахтах является гидрорыхление стати-

ческим нагнетанием жидкости призабойной части угольного пласта [1]. Это приводит к изменению физико-механических свойств угля, способствует снижению пылеобразования при разрушении угля и интенсификации газовыделения из пласта. Однако анализ опыта применения гидрорыхления в статическом режиме нагнетания жидкости показывает, что возможности повышения его эффективности в условиях больших глубин исчерпаны [2].

Основным недостатком такого гидрорыхления можно считать неуправляемый процесс трещинообразования, что снижает эффективность фильтрации жидкости по всей мощности слоев и пропластков, слагающих угольный пласт. Кроме этого, повышение эффективности мероприятий, связанных с таким

нагнетанием жидкости в угленородный массив, сдерживается горногеологическим фактором – наличием пород, склонных к размоканию, обрушению и пучению, и горнотехническим фактором – формированием впереди забоя выработки зон разгрузки и повышенного горного давления. Коэффициент проницаемости жидкости  $k$ , как это видно из рис. 1, в этих зонах имеет прямо противоположные значения от свободного течения жидкости по трещинам до практического отсутствия фильтрации жидкости вообще.

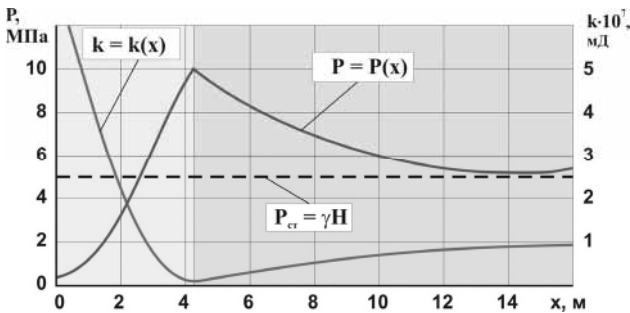


Рис.1. Изменение водопроницаемости угля и величины горного давления на удалении от забоя выработки:  $k$  – коэффициент водопроницаемости угля;  $P$  – величина горного давления;  $x$  – расстояние в глубь забоя;  $P_{ст}$  – статическое горное давление;  $\gamma$  – средний удельный вес горных пород;  $H$  – глубина залегания угольного пласта

Между водопроницаемостью угольного пласта и величиной горного давления имеется четкая обратная связь – при увеличении горного давления  $P$  водопроницаемость пласта уменьшается и, наоборот, по мере уменьшения горного давления водопроницаемость возрастает. Как показала практика ведения работ, при расположении фильтрационной камеры в разгруженной зоне (0–3 м по оси  $x$ ) нагнетаемая жидкость фильтруется по трещинам в выработанное пространство. А при расположении камеры в зоне с повышенным горным давлением (3–8 м) из-за низкой водопроницаемости угля происходит неуправляемый процесс гидроотжима краевой части пласта с последующим провоцированием газодинамического явления.

В связи с вышеизложенным, поиск новых способов и средств проведения профилактических мероприятий борьбы с газовым и пылевым факторами, а также проверка их эффективности продолжает оставаться актуальной задачей.

Решение данной проблемы стало возможным после ряда исследований импульсного нагнетания жидкости в угольный массив, проведенных ИГТМ НАН Украины совместно с ПАО „Краснодонуголь“. В основу гидроимпульсного воздействия положено явление периодически-срывной кавитации в потоке технологической жидкости при рыхлении пласта. В работах [3,4] были обоснованы геометрические параметры устройства гидроимпульсного воздействия, реализующего режим такого течения, и определены

его динамические характеристики – зависимости импульсов давления и частот автоколебаний от параметра кавитации.

На рис. 2 приведена схема гидроимпульсного рыхления, состоящая из напорного трубопровода – 4, погружного кавитационного генератора (КГ) – 5 с присоединенным к нему последидиффузорным каналом – 8.

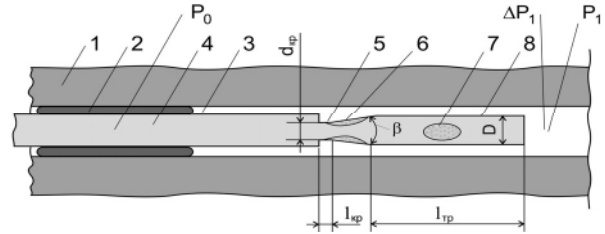


Рис. 2. Схема гидрорыхления: 1 – угольный пласт; 2 – герметизатор; 3 – скважина; 4 – напорный трубопровод; 5 – кавитационный генератор; 6 – оседлая каверна; 7 – оторвавшаяся и снесенная по потоку часть каверны

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  $\beta = 20^\circ$  и диаметр выходного сечения  $D = 10$  мм) и последидиффузорного канала (длина  $l_{тр} = 0,25$  м) была реализация максимальных значений размаха автоколебаний давления технологической жидкости в скважине [4].

Устройство работает следующим образом. При подаче жидкости по напорному трубопроводу 4 на вход генератора 5 под давлением  $P_0$  со скоростью  $v_0$  в его критическом сечении происходит резкое падение давления и рост скорости движения жидкости до значений –  $P_{кр}$ ,  $v_{кр}$ . Это приводит к разрыву сплошности жидкости и образованию каверны б, заполненной парами и выделившимся из жидкости газом. Оседлая каверна распространяется вдоль стенок критики и диффузора и, при достижении определенных размеров, отрывается от стенок генератора, сносится по потоку и захлопывается в зоне повышенного давления 7 последидиффузорного канал 8, создавая высокоамплитудное пульсирующее течение. Отличительной особенностью такого течения являются стабильность частоты роста и отрыва кавитационной каверны, расположенной в диффузоре, и её захлопывания (500 – 7000 Гц), а также отсутствие зависимости частоты колебаний от длины выходного трубопровода за местным сужением, которое указывает на неакустическую природу высокочастотных колебаний. Такую кавитацию называют гидродинамической.

Предварительные испытания гидрорыхления угольного массива импульсным нагнетанием воды по представленной схеме, при проведении пластовых подготовительных выработок в условиях ОАО „Краснодонуголь“, показали возможность повышения эффективности гидрорыхления [3].

Поток энергии, соответствующий установившемуся течению  $P_y Q_y$  при статическом нагружении угольного пласта, определялся по разнице давлений, развиваемой насосной установкой  $P_0$  и подпора  $P_1$ , расходу жидкости через насос  $Q_n$

$$\mathcal{E}_{ст} = (P_0 - P_1)Q_n.$$

Разница давлений  $P_0$  и  $P_1$  характеризует степень фильтрации жидкости через пласт.

Расчет потока энергии при импульсном нагружении угольного пласта выполнялся по экспериментальным данным работы [3] в рабочем диапазоне параметров выбросоопасных угольных пластов. Под параметрами выбросоопасных угольных пластов здесь понимаются давление газа (давление подпора), которое в среднем составляет 2–6 МПа, а в некоторых случаях достигает 12,0 МПа, и расчетная величина давления нагнетания  $P_n \leq 0,75 \gamma H$ , которая должна обеспечить безопасность ведения горных работ и для глубины шахты  $H = 1000$  м составляет 21,4 МПа.

На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости максимальных и минимальных значений размаха колебаний давления  $\Delta P_1$  от давления подпора  $P_1$  при давлении нагнетания  $P_0 = 20$  МПа. Рассмотрение указанных зависимостей наглядно демонстрирует наличие двух зон.

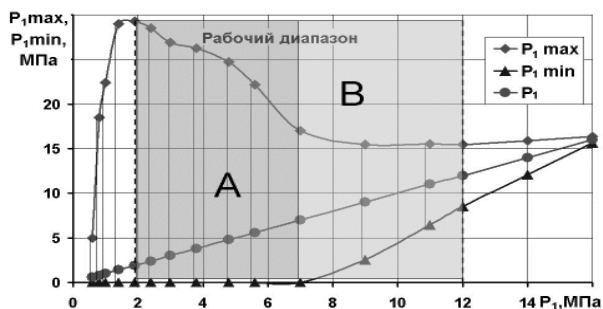


Рис.4. Экспериментальные зависимости max и min значений размаха колебаний давления  $\Delta P_1$  от давления подпора  $P_1$  при  $P_0 = 20$  МПа

Первая зона *A*, когда поток энергии определяется лишь колебательными составляющими –  $\delta P$  и  $\delta Q$ ,  $\delta P = P_{1max}$ , поскольку  $P_{1min} = 0$ . Вторая зона *B* – поток энергии определяется колебательными составляющими –  $\delta P$  и  $\delta Q$  и параметрами установившегося течения  $P_y$  и  $Q_y$ .

При расчете колебательных составляющих потока энергии  $\delta P$  принималось равным  $\Delta P_1$ , а поток  $\delta Q$  за секунду представим в виде

$$\delta Q = (\mu \sqrt{2g\gamma} \int_0^T \Delta P_1) n, \quad (3)$$

где  $n$  – число периодов колебаний за секунду.

Учитывая, что форма сигнала  $\Delta P_1$  близка к треугольной, выражение (3) трансформируется

$$\delta Q = \mu \sqrt{g\gamma \Delta P_1}.$$

На рис. 5 представлены результаты расчета потока энергии  $I$  – соответствующего установившемуся течению при гидрорыхлении статическим нагнетанием жидкости в скважину угольного пласта, 2 – результирующая потока энергии при гидродинамическом воздействии на угольный пласт, ее составляющие – 3 статическая и 4 динамическая.

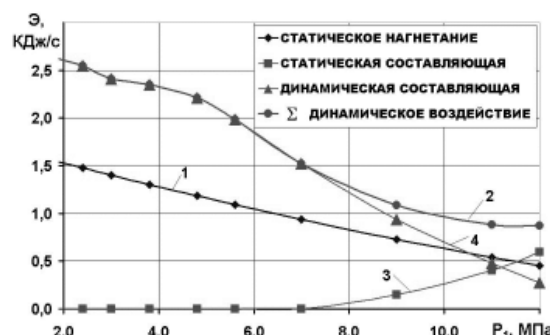


Рис.5. Расчетные зависимости потока энергии  $\mathcal{E}$  от давления подпора  $P_1$  при давлении нагнетания в угольный пласт  $P_0 = 20$  МПа

Из рассмотрения представленных на этом рисунке зависимостей потока энергии от давления подпора следует, что:

- при статическом нагнетании жидкости в скважину угольного пласта зависимость  $\mathcal{E} = f(P_1)$  носит линейный характер (линия 1). С ростом давления подпора от 2 до 12 МПа поток энергии уменьшается приблизительно в два раза с 1,54 до 0,70 КДж/с. Это связано с уменьшением разницы давлений  $P_0 - P_1$  (а, следовательно, и фильтрации жидкости через пласт) при постоянном расходе через насосный агрегат;

- при прочих равных условиях (по давлению нагнетания  $P_0$  и одних и тех же величинах подпора  $P_1$ ) гидроимпульсное воздействие на угольный пласт (кривая 2) более эффективно по сравнению со статическим нагнетанием жидкости и заметно влияет на значения потока энергии. Так, при давлении нагнетания  $P_0 = 20$  МПа и значениях подпора в диапазоне от  $P_1 = 2$  до 12 МПа, результирующий поток энергии при гидродинамическом воздействии на угольный пласт превышает примерно в 1,8 раза поток энергии при статическом нагнетании;

- динамическая составляющая при гидроимпульсном воздействии на угольный пласт (линия 4) уменьшается с 2,62 до 0,27 КДж при изменении подпора от  $P_1 = 2$  до 12 МПа. Это объясняется снижением уровня колебаний давления  $\Delta P_1$  с ростом давления подпора  $P_1$ . Статическая составляющая при гидроимпульсном воздействии в диапазоне изменения значений подпора  $P_1 = 2 - 7$  МПа равна нулю (линия 3) и с увеличением его значения  $P_1 > 7$  МПа растет, дости-

гая 0,59 КДж при  $P_1 = 12$  МПа. Этот факт можно объяснить наличием двух зон размаха колебаний давления  $\Delta P_1$  от давления подпора  $P_1$ . Зоны А (рис.4), когда размах колебаний давления  $\Delta P_1$  существует в пределах от нуля до некоторого значения, и зоны В, когда размах колебаний давления  $\Delta P_1$  наложен на величину подпора.

**Выводы.** Анализ представленных результатов расчета потоков энергии при рыхлении выбросоопасных угольных пластов статическим нагнетанием жидкости в скважину и гидродинамическим воздействием позволили:

- выполнить сравнительную оценку энергетического воздействия на выбросоопасный угольный пласт при статическом и импульсном нагнетании жидкости;

- установить, что, при прочих равных условиях (по давлениям нагнетания и подпора), результирующий поток энергии при гидродинамическом воздействии на угольный пласт превышает примерно в 1,8 раза поток энергии при статическом нагнетании жидкости, что обеспечивает более эффективное гидрорыхление угольных пластов;

- определить структуру суммарного гидродинамического воздействия, т. е. ее составляющие статическую и динамическую в диапазоне изменения давления подпора от 2 до 12 МПа.

### Список литературы / References

1. СОУ 10.1.00174088.011-2005. Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ. Введений уперше 30.12. 2005 Мінвуглепром України. – К.: Вид-во Мінвуглепром України, 2005. – 225 с.

SOU 10.1.00174088-2005. *Pravila vedennia girnychikh robit na plastakh skhylnykh do gazodynamichnykh yavysch* [Rules of Mining on Layers Prone to Gas-Dynamic Phenomena]. Introduced on December 30, 2005, Minugleprom Ukrainy, Kyiv, Ukraine.

2. Бойко Я.И. Повышение эффективности гидрорыхления выбросоопасных угольных пластов в подготовительных выработках и нишах / Я.И. Бойко, А.В. Никифоров, А.А. Рубинский // Способы и средства создания безопасных условий труда в угольных шахтах: сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 2009. – № 2(24). – С. 52–57.

Boyko, Ya.I., Nikiforov, A.V. and Rubinskyi, A.A. (2009), “Increase of efficiency of hydro loosening of outburst prone coal layers in development working and in niches”, *Sposoby i sredstva sozdaniya bezopasnykh usloviy truda v shakhtakh: sbornyk nauchnykh trudov MakNII*, no.2 (24), pp. 143–147.

3. Моисеенко П.Ю. Обоснование параметров кавитационного генератора для гидрорыхления угольных пластов: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.05.06 / П.Ю. Моисеенко – Днепрпетровск, 2010. – 25 с.

Moiseenko, P.Yu. (2010), *Obosnovaniye parametrov kavitatsyonnogo generatora dlya rykhleniya ugolnykh*

*plastov* [Substantiation of Parameters of Cavitation Generator for Hydro Loosening of Coal Layers], *Abstract of the Dissertation of Cand. Sci. (Tech.)*, Dnepropetrovsk, Ukraine.

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

Vasilyev, L.M., Zhulay, Yu.A., Zberovsky, V.V., Moiseenko, P.Ya. and Trokhimets N.Ya. (2009), *Ustroystvo dlya hidroimpulsnogo vozdeystviya na ugolny plast* [Device for Hydro Pulse Action on Coal Layer] Patent 87038 Ukraine, МКУ E21F 5/02, declarant and patent holder: Institute of Geotechnical Mechanics of National Academy of Science of Ukraine, declaration date September 13, 2007, published on June 6, 2009, Bulletin no.11.

5. Жулай Ю.А. Сравнительная оценка энергии удара пульсирующей и стационарной струй/ Ю.А. Жулай, А.С. Ворошилов // 36. науч. пр. НГУ України. – Дніпропетровськ, 2010. – № 34. – Т. 2. – С. 183–190.

Zhulay, Yu.A. and Voroshilov, A.S. (2010), “Comparative estimation of blow energy of pulsing and stationary streams”, *Zbirnyk naukovykh prats NGU Ukrainy*, vol. 2, no. 34, pp. 183–190.

Одним з ефективних способів боротьби з рапто-вими викидами вугілля й газу та вибухами метану в шахтах є нагнітання рідини у вугільні пласти в імпульсному режимі. В останні роки значимі результати в розвитку цього напрямку отримані Інститутом геотехнічної механіки (ІГТМ) НАН України разом з ПАТ „Краснодонвугілля“. Тут розроблені спосіб і пристрій для гідроімпульсного впливу на вугільні пласти із застосуванням кавітаційного генератора пружних коливань тиску рідини. Результати гірничо-експериментальних робіт з оцінки ефективності застосування заглибного кавітаційного генератора в технологічній схемі гідророзпушування показали, що пристрій забезпечує його якісне виконання й дегазацію викидо-небезпечних вугільних пластів з низькою гідравлічною проникністю в зонах підвищеного гірського тиску при проведенні підготовчих виробок комбайнами.

**Мета.** Енергетична оцінка переваг гідророзпушування вугільного пласта імпульсним впливом у порівнянні зі статичним нагнітанням рідини.

**Методика.** Заснована на теоретичному дослідженні щільності потоку енергії, що протікає в одиницю часу через поверхню, з використанням експериментально встановленої залежності величини імпульсу тиску рідини від значення підпору у свердловині.

**Результати.** Представлено розрахункові залежності потоку енергії при імпульсному й статичному нагнітанні рідини від тиску підпору при тиску нагнітання у вугільний пласт 20 МПа.

**Наукова новизна.** Уперше встановлено, що потік енергії при гідроімпульсному впливі на вугільний пласт (за інших рівних умов по тиску нагнітання й тих самих величин підпору) перевищує потік енергії при гідророзпушуванні статичним нагнітанням рідини приблизно в 1,8 рази.

**Практична значимість.** Розгляд наведених залежностей підтверджує можливість підвищення ефективності гідророзпушування викидонебезпечних вугільних пластів і боротьби з газодинамічними факторами в шахтах за допомогою гідроімпульсного впливу при проведенні пластових підготовчих виробок.

**Ключові слова:** викидонебезпечний вугільний шар, гідроімпульсний вплив, статичне нагнітання, потік енергії

One of the effective methods of controlling the spontaneous outbursts of coal and gas and explosions of methane in mines is the fluid pulse injection into coal beds. Of late years the significant results in this field have been received by Institute of Geotechnical Mechanics of National Academy of Sciences of Ukraine together with PAO "Krasnodonugol". They developed the method and the device for hydro pulse action on coal layers using the cavitation generator of fluid pressure elastic vibrations. The results of mining experimental work aimed at the evaluation of the efficiency of the submersible cavitation generator application in the flowchart of hydro loosening have shown that the device provides the effective hydro loosening and degassing of outburst-prone coal layers

with low hydraulic permeability in ground pressure zones when driving a development working with mining combines.

**Purpose.** To carry out the energy estimation of advantages of the hydro loosening of a coal layer by the pulse action and compare it with static fluid injection.

**Methodology.** The research was based on theoretical study of density of an energy flow running through a surface per a time unit taking into account the experimentally obtained dependence of the fluid pressure pulse value on the value of backup in the borehole.

**Findings.** The calculated dependencies of energy flow on backup pressure, at both pulse and static fluid injection pressure of 20.1 MPa are presented.

**Originality.** For the first time we have established that the energy flow during the hydro pulse action on a coal layer (other conditions being equal) 1.8 times exceeds the value of energy flow during hydro loosening by static fluid injection.

**Practical value.** The analysis of the presented dependences confirms the possibility of improvement of efficiency of hydro loosening of outburst-prone coal layers and control of gas-dynamic factors in mines through hydro pulse action when running the in-seam development working.

**Keywords:** outburst-prone coal layer, hydro pulse action, static injection, energy flow

*Рекомендовано до публікації докт. фіз.-мат. наук  
О.А. Приходьком. Дата надходження рукопису 18.01.13.*