

Список літератури

1. Сахновский В.Л., Умнов А.Е., Куроченко В.М. Интенсификация проветривания глубоких подземных рудников. – М.: Недра, 1992. – 143 с.
2. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Гос. из-во физ.-мат. лит., 1959. – 699 с.
3. Рачинский В.В. Введение в общую теорию динамики сорбции и хроматографии. – М.: Наука, 1964. – 136 с.
4. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. – М.: Химия, 1984. – 592с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Бойком В.О.
Надійшла до редакції 08.10.10*

УДК 622.831.322:532.528

© Ю.А. Жулай, В.В. Зберовский

РЕШЕНИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ГИДРОИМПУЛЬСНОГО РЫХЛЕНИЯ ВЫБРОСОПАСНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ В РЕЖИМЕ ПЕРИОДИЧЕСКИ-СРЫВНОЙ КАВИТАЦИИ

Рассмотрены проблемы статического и импульсного нагнетания жидкости, а также эффективность использования явления периодически-срывного кавитационного течения жидкости в устройстве импульсного воздействия при гидрорыхлении угольных пластов.

Розглянуто проблеми статичного й імпульсного нагнітання рідини, а також ефективність використання явища періодично-зривного кавітаційного потоку рідини в пристрої імпульсного впливу при гідророзпушуванні вугільних шарів.

The problems of static and pulse modes of fluid injection as well as efficiency of use of phenomenon of periodically stalling cavity fluid flow in pulsed device for hydraulic ripening of coal beds have been considered.

До настоящего времени основополагающим профилактическим мероприятием по борьбе с газодинамическим и пылевым факторами является статическое нагнетание жидкости в угольные пласты. В данных направлениях проведен большой объем научно-технических исследований, на основании которых разработаны нормативные документы, регламентирующие проведение, контроль и оценку эффективности этих работ [1]. Вместе с тем увеличение глубины освоения месторождений, изменение горно-геологических условий и свойств угленосного массива привели к значительному снижению эффективности профилактических мероприятий. При статическом нагнетании имеют место случаи спонтанного прорыва воды в выработанное пространство и преждевременного гидроотжима краевой части пласта с угрозой провоцирования газодинамического явления. Поэтому поиск новых решений в проведении профилактических мероприятий, основанных на гидровоздействии, продолжает оставаться **актуальной задачей**.

Эффективное решение данной проблемы стало возможным после ряда экспериментальных исследований импульсного нагнетания жидкости в угольный массив. Значимые результаты в этом направлении получены в Институте геотехнической механики (ИГТМ) НАН Украины при разработке новых способов и средств гидроимпульсного воздействия, основанных на явлении периодически-

ски-срывного кавитационного течения жидкости. В промышленных условиях прошли опытную проверку устройство [2] и механизм гидроимпульсного воздействия [3], разработаны элементы технологических схем и параметры способа гидроимпульсного рыхления угольных пластов.

Целью данной работы является решение концептуальных задач гидроимпульсного рыхления выбросоопасных угольных пластов в режиме периодически-срывной кавитации в условиях больших глубин, где применение статического нагнетания жидкости малоэффективно.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Теоретическое обоснование параметров гидроимпульсного воздействия на угольный пласт;

2. Определение ожидаемых динамических характеристик высокочастотного генератора автоколебаний давления жидкости (зависимостей частоты и размаха кавитационных автоколебаний от параметра кавитации τ);

3. Экспериментальное определение характеристик генератора при различных давлениях на входе и выходе генератора;

4. Экспериментальное исследование характеристик УГИВ при его расположении в имитаторе скважины;

5. Горно-экспериментальное исследование УГИВ и оценка эффективности его применения в промышленных условиях.

Рассмотрим результаты исследований, полученных в процессе решения поставленных задач.

Обоснование гидродинамических параметров импульсного воздействия выполним с использованием данных работы [4], где скорость деформаций выражена в следующем виде

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{4\Delta P \cdot f}{E}, \quad (1)$$

где ε – линейная деформация угля; ΔP – импульсное давление; f – частота импульсов; E – модуль упругости угля; 4 – коэффициент, определяемый из условий равенства между собой длительности и скважности, длительностей возрастания и затухания импульса (рис. 1а).

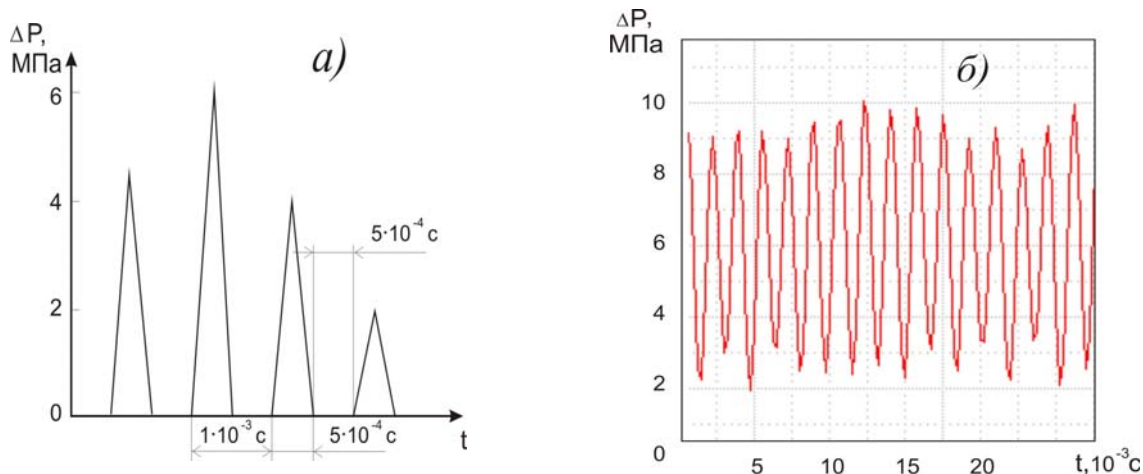


Рис.1. Изменение импульсного давления во времени

Однако многочисленные экспериментальные исследования, выполненные авторами работы, показали, что зависимость изменения импульсов давления во времени, генерируемых УГИВ (рис. 1б) имеет отличия. К ним следует отнести следующие: частота следования импульсов почти на порядок превышает частоту, полученную ранее [5]; отсутствие скважности импульсов. Учитывая вышесказанное и то, что с увеличением скорости деформации, более 480-500 1/с, значение коэффициента трения стабилизируется, выражение (1) приобретает следующий вид:

$$f = \frac{60E}{\Delta P} \quad (2)$$

Так как гидроимпульсное воздействие на пласт приводит к зарождению и развитию трещин, наклонных к напластованию, и направлено на трещинообразование в зонах с малой гидравлической проницаемостью угля, значение модуля упругости принимается исходя из условия сжатия по напластованию. Для большинства шахтопластов наиболее вероятны значения модуля упругости при сжатии от $3 \cdot 10^2$ МПа до $5 \cdot 10^2$ МПа. Зависимости рациональной частоты от импульсного давления при наиболее вероятных значениях модуля упругости приведены на рисунке 2.

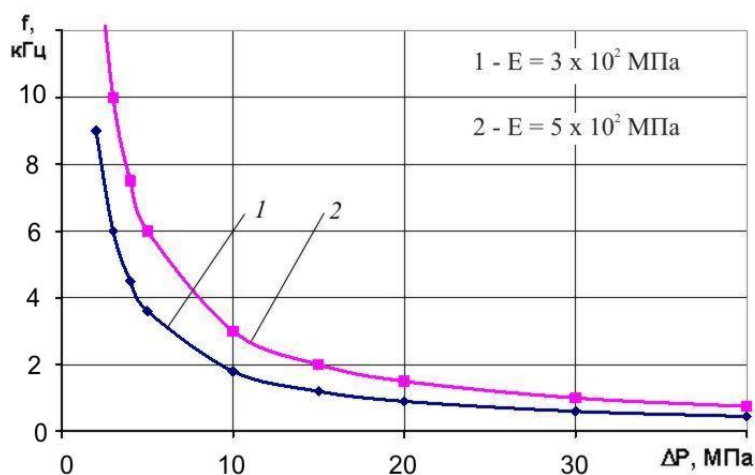


Рис.2. Зависимости рациональной частоты импульсов от импульсного давления различных значениях модуля упругости угля: 1 – $E = 3 \cdot 10^2$ МПа; 2 – $5 \cdot 10^2$ МПа

Рассмотрение приведенной зависимости позволяет обосновать рациональные динамические параметры УГИВ, рабочая точка которого должна находиться выше кривых 1 и 2. Например, при значении импульса давления, создаваемых УГИВ, в 5 МПа частота следования импульсов давления должна превышать 6 кГц, а в 15 МПа – 2 кГц.

Учитывая, что в основу гидроимпульсного воздействия положено явление периодически-срывной кавитации в потоке жидкости, рассмотрим результаты визуальных наблюдений, выполненные ранее [6]. Разработанное устройство, реализующее режим такого течения в фильтрационной камере шпура или скважины, включает в себя трубку Вентури специальной геометрии, входной и выходной каналы сечением, соответствующим критическому сечению трубки Вентури (рис. 3) [7].

При подаче жидкости на вход критического сечения трубки Вентури под давлением P_0 со скоростью v_0 в диффузоре происходит резкое падение давления и рост скорости движения жидкости до критических значений – $v_{кр}$, $P_{кр}$. при которых возникает разрыв сплошности жидкости и образуются каверна, заполненная парами и газами.

В зависимости от геометрических параметров трубки Вентури для режима $P_0 = \text{constant}$, $P_1 = \text{constant}$ в ней может реализоваться режим периодически-срывного кавитационного течения, при котором присоединенная каверна растет до максимальных размеров, а потом происходит отрыв всей ее диффузорной части [6].

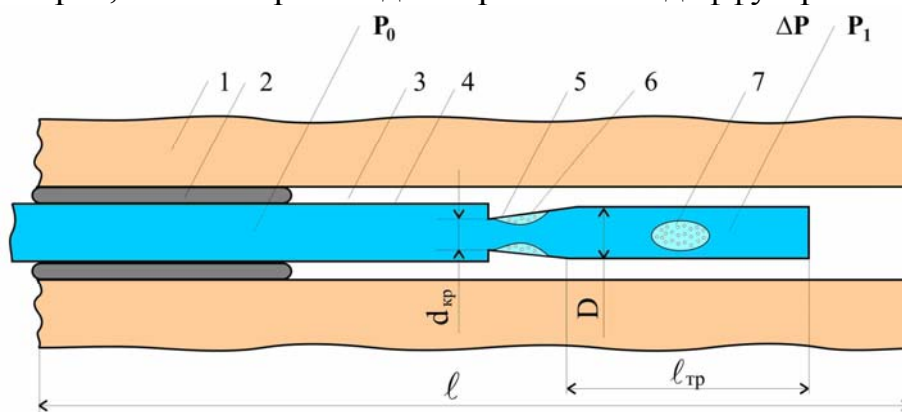


Рис. 3. Схема гидрорыхления угольного массива с использованием УГИВ 1 – угольный пласт; 2 – герметизатор; 3 – скважина; 4 – напорный трубопровод; 5 – кавитационный генератор; 6 – оседлая каверна; 7 – оторвавшаяся и снесенная по потоку каверна.

Отличительной особенностью такого кавитационного течения являются стабильность частоты отрыва кавитационной каверны, расположенной в диффузоре и её захлопывания. Экспериментально были установлены характерные особенности этого вида колебаний. К этим особенностям относится, прежде всего, отсутствие зависимости частоты колебаний от длины выходного трубопровода за местным сужением, которое указывает на неакустическую природу высокочастотных кавитационных колебаний. Частота и «двойная амплитуда» высокочастотных колебаний определяются геометрическими и режимными параметрами местного сужения. Под «двойной амплитудой», вследствие негармонической формы колебаний, понимается величина размаха $\Delta P_1 = P_{1\max} - P_{1\min}$, где $P_{1\max}$ и $P_{1\min}$ – максимальное и минимальное значения давления в импульсе за трубкой Вентури.

Параметром динамического подобия такого течения является число кавитации – K , которое представляет собой отношение разности давления подпора за выходом из трубки Вентури P_1 и давления в критическом сечении $P_{кр}$ к скоростному напору, который определяется по скорости струи в критическом сечении $v_{кр}$.

$$K = \frac{P_1 - P_{кр}}{\rho \frac{v_{кр}^2}{2}}; \quad (3)$$

где ρ – плотность жидкости.

В числитель этого параметра входит значение давления или напора, под действием которого каверна захлопывается, а в знаменателе – скоростной напор потока, определяющий падение давления, в результате которого может образоваться и расширяться каверна. С этой точки зрения число кавитации представляет собой отношение давления, под действием которого происходит захлопывание каверны, к давлению, под действием которого каверна возникает и растет. Поскольку $\rho \frac{v_{кр}^2}{2} = P_0 - P_{кр}$ и учитывая, что для воды $P_{кр} \approx P_S$ (где для воды $P_S \approx 0,0024$ МПа – давление насыщенных паров), а также, что $P_{кр} \ll P_0$ и $P_{кр} \ll P_1$ в дальнейшем, так как испытания проводились на воде, было введено понятие параметра кавитации τ [6]. Он определяется как отношение давлений на выходе из трубки Вентури к давлению на входе в нее, т.е.

$$\tau = P_1 / P_0 \quad (4)$$

Параметр кавитации отличается от числа кавитации тем, что вместо статического используется полное давление.

Использование кавитационного генератора типа трубки Вентури в УГИВ позволяет создавать и поддерживать устойчивый режим импульсной нагрузки на угольный пласт. Интенсивность и величина нагрузки регулируется конструктивными параметрами генератора и давлением на входе и выходе из него. Данное решение позволяет управлять фильтрационным процессом и разрушением угля независимо от изменения величины горного давления впереди забоя подготовительной выработки, устранить прорыв жидкости и гидроотжим краевой части пласта, а так же обеспечить безопасность работ по газовому и пылевому факторам.

Исходные данные для обоснования и разработки УГИВ базируются на параметрах серийно изготавливаемых и используемых на шахтах насосных установок, физико-механических свойствах угольных пластов, горно-геологических и горнотехнических условиях. Основные условия следующие:

– по параметрам насосных установок: давление подачи жидкости $1,0 \text{ МПа} \leq P_0 \leq 30 \text{ МПа}$; расход жидкости $Q = 35 \dots 40 \text{ л/мин}$ (УН-35, УНШ); $Q = 50 \dots 60 \text{ л/мин}$ (УНР, УНИ); $Q > 60 \text{ л/мин}$ (УГН);

– по горно-геологическим условиям и свойствам угля: по давлению газа в пласте (давления подпора) $P_1 = 1,0 \dots 20,0 \text{ МПа}$; по сопротивлению угля на сдвиг $K = 2,0 \dots 6,0 \text{ МПа}$, глубине герметизации скважины не менее $2,5 \text{ м}$;

– по параметрам трубки Вентури: диаметр критического сечения $d_{кр}$; угол раскрытия диффузора β ; диаметр входного $d_{вх}$ и выходного каналов D ; длина входного – $l_{вх}$ и выходного – $l_{вых}$ каналов.

В соответствии с теоретической моделью нестационарного кавитационного течения жидкости в сужающе-расширяющемся канале типа трубки Вентури диаметр критического сечения устройства рассчитывается по формуле

$$d_{кр} = \sqrt{\frac{4G}{\pi \mu \sqrt{2g\gamma(P_0 - P_k)}}}, \quad (5)$$

где G – весовой расход жидкости.

На основании многочисленных экспериментальных определений, входящие в формулу значения коэффициента расхода генератора μ принимаются равными от 0,90 до 0,98, ускорение свободного падения $g = 981$ см/сек, удельный вес воды $\gamma = 0,001$ кг/см³.

Угол раскрытия диффузора $\beta = 20^\circ$ и диаметр последиффузорного канала $D = 4 d_{кр}$ выбираются из условия обеспечения максимальных значений давления в импульсе ΔP_1 , а длина последиффузорного канала $l_{вых} = 25D$ из условия передачи этих импульсов в скважину с минимальными потерями [6]. Частота автоколебаний давления жидкости в фильтрационной камере должна обеспечивать эффективное разрушение угля (трещинообразование) в прискважинной зоне. Исходя из условия собственных колебаний трещиновато-пористой блочно-слоистой структуры угольного пласта от 1 до 3 кГц, частота импульсов автоколебаний давления жидкости должен составлять не менее 1 кГц.

На рисунке 4 приведены теоретические значения ожидаемых частоты (а) и размаха кавитационных автоколебаний (б) рассчитаны по модели [6].

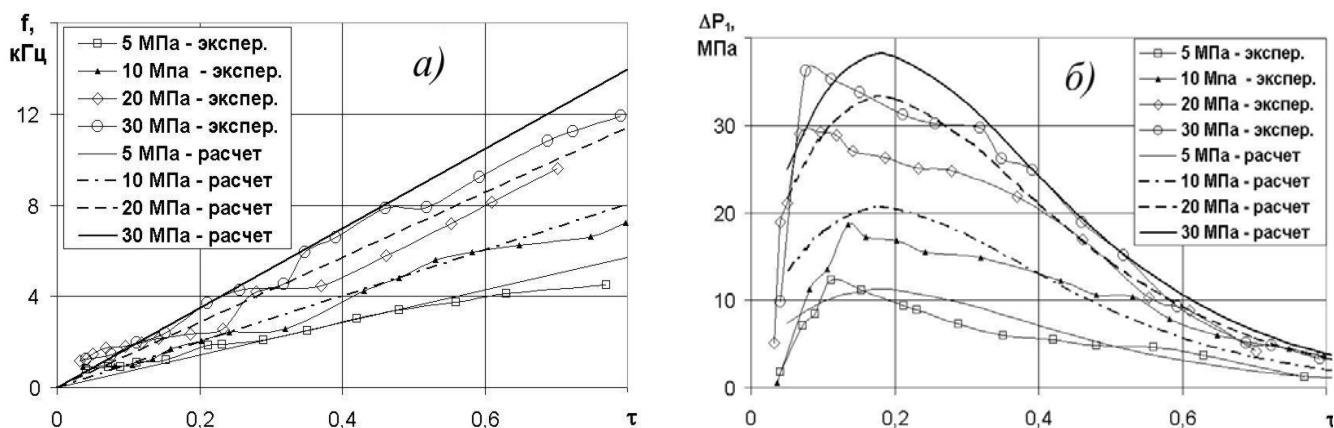


Рис. 4. Теоретические и экспериментальные зависимости частоты (а) и размаха (б) автоколебаний от параметра кавитации при разных значениях давления P_0

Экспериментальные зависимости установлены при автономных испытаниях устройства с критическим сечением $d_{кр} = 2,5$ мм и углом раскрытия диффузора $\beta = 20^\circ$.

Анализ теоретических и экспериментальных зависимостей частоты и размаха автоколебаний давления от параметра кавитации показывает на удовлетворительное качественное и количественное согласование расчетных и экспериментальных данных. Установленный диапазон работоспособности генератора по параметру кавитации от 0,05 до 0,7 обеспечивает рабочий диапазон частот автоколебаний от 1,0 до 9,0 кГц, что соответствует условию разрушения угля в массиве по его собственным частотным характеристикам.

Максимальное значение размаха ΔP_1 превышает давление питания P_0 примерно от 1,2 до 2,4 раза. При этом заметна тенденция, что при увеличении давления на входе в генератор P_0 отношение $\Delta P_1/P_1$ – уменьшается.

Для определения гидродинамических характеристик УГИВ на гидравлическом стенде были проведены исследования затопленного периодически-срывного

кавитационного течения в трубопроводе, моделирующем скважину. Инструментальные измерения импульсов давления и их частоты следования по длине имитатора скважины проводились на различном удалении от устройства (рис. 5).

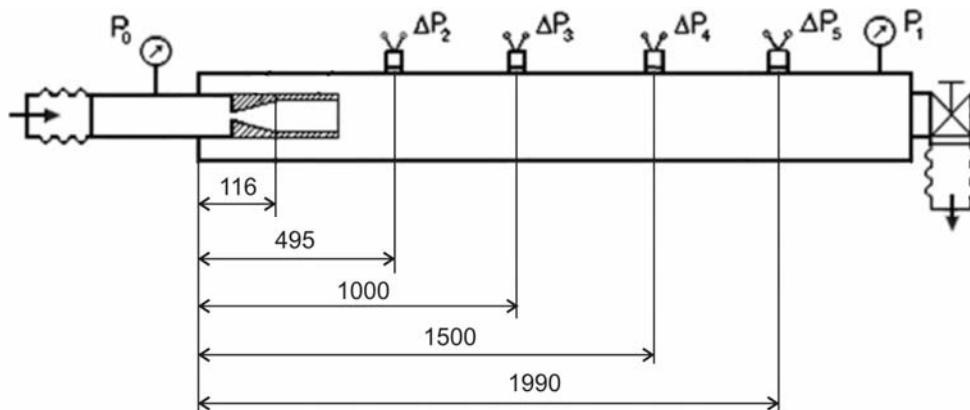


Рис. 5. Схема испытаний УГИВ на модели имитатора скважины

В качестве примера на рисунке 6 представлены зависимости частоты следования пульсаций f (а) и величин размаха автоколебаний давления жидкости ΔP (б) от параметра кавитации τ полученные при лабораторных исследованиях погружного УГИВ на модели скважины.

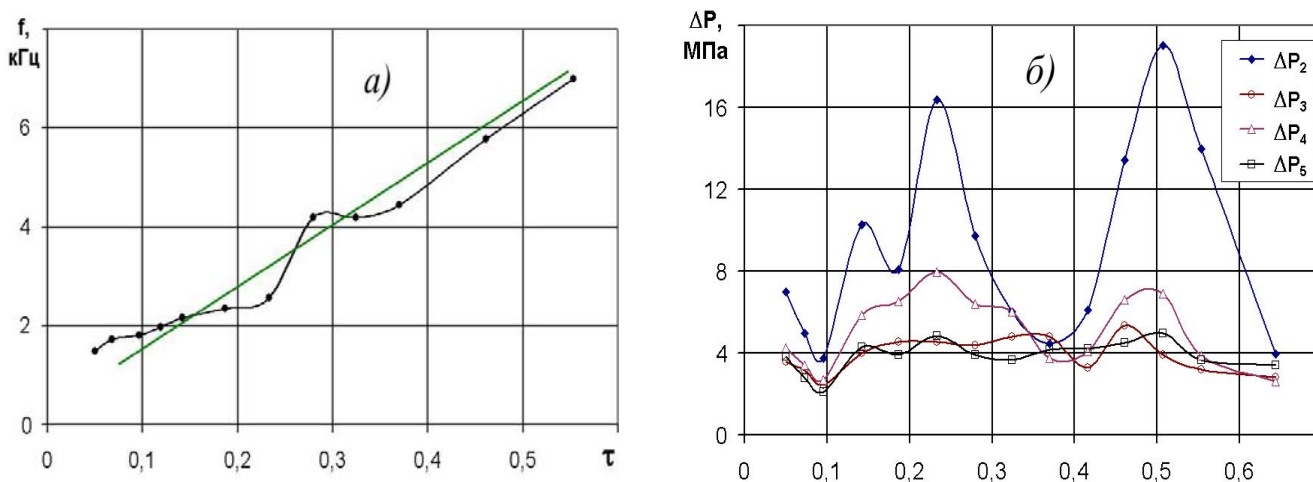


Рис. 6. Экспериментальные зависимости частоты (а) и размаха автоколебаний (б) от параметра кавитации в разных сечениях модели имитатора скважины

Анализ представленных зависимостей показывает, что при давлении нагнетания 21 МПа с расходом жидкости 56 л/мин рабочий диапазон частоты автоколебаний (рис. 6а) составляет от 1 до 7 кГц и удовлетворительно согласуется с частотой генерируемой устройством. Изменение величин пульсаций давления ΔP_2 и ΔP_4 от параметра кавитации τ нелинейно. Имеется два ярко выраженных максимума при значении параметра кавитации $\tau \approx 0,23$ значения $\Delta P_2 = 16,4$ МПа, $\Delta P_4 = 8,0$ МПа, а при $\tau \approx 0,51$ значения $\Delta P_2 = 19,0$ МПа, $\Delta P_4 = 6,9$ МПа. Величины ΔP_3 и ΔP_5 существенно не отличаются друг от друга и находятся в диапазоне от 3 до 6 МПа.

Испытания устройства на гидравлическом стенде подтвердили возможность его использования в комплексе горного оборудования для импульсного гидрорыхления угольных пластов. Исследования УГИВ на выбороопасный угольный массив проводились на шахте «Суходольская-Восточная» ОАО «Краснодонуголь», на пласте i_3^1 гор. 915м. Методикой проведения горно-экспериментальных работ предусматривалась оценка эффективности гидроимпульсного воздействия нормативными способами контроля и оценки эффективности и сравнительная оценка мероприятий при проведении выработки с применением нормативного способа гидрорыхления и с применением гидроимпульсного воздействия.

При проведении горно-экспериментальных работ в забоях подготовительных выработок использовалась технологическая схема гидрорыхления выбороопасных угольных пластов через две скважины. В результате оценки эффективности применения гидроимпульсного воздействия установлено:

- разработанная конструкция УГИВ при подаче жидкости на вход устройства в диапазоне давления от 10,0 до 20,0 МПа со скоростью нагнетания от 40 до 60 л/мин обеспечивает эффективное рыхление угольных пластов в зонах с низкой гидравлической проницаемостью и безопасное проведение выработки по газодинамическому фактору;

- гидрорыхление массива через скважины диаметром 43 мм, длиной от 6,0 до 8,0 м с глубиной герметизации от 4,0 до 6,0 м и камерой фильтрации 2,0 м осуществляется без проявления гидроотжима и гидроразрыва пласта в забое выработки.

- сравнение двух способов по длительности воздействия на массив показало, что при гидроимпульсном воздействии продолжительность нагнетания жидкости до завершения активного процесса гидрообработки пласта снижается до 50 %, а расход жидкости до 60%;

На основании результатов лабораторных и горно-экспериментальных исследований можно сделать следующие **выводы**:

1. Определены условия и исходные данные для разработки геометрических параметров устройства гидроимпульсного рыхления угольных пластов с использованием кавитационного генератора импульсов давления жидкости, на основании которых разработан и изготовлен экспериментальный образец;

2. Экспериментально на гидравлическом стенде определены гидродинамические характеристики устройства:

- работоспособность по параметру кавитации от 0,05 до 0,70;
- рабочий диапазон частот автоколебаний от 1.0 до 7,0 кГц.

Установлено, что размах автоколебаний давления, наложенный на величину давления подпора жидкости, соизмерим с давлением нагнетания в рабочем диапазоне гидрорыхления от 10,0 до 20,0 МПа;

3. В результате горно-экспериментальных работ и оценки эффективности применения устройства гидроимпульсного рыхления угольных пластов по нормативной технологической схеме гидрорыхления установлено:

- гидродинамические параметры устройства и параметры скважин при подаче жидкости на вход устройства в диапазоне давления от 10,0 до 20,0 МПа со скоростью нагнетания до 60 л/мин позволяют вести эффективную гидрообработку угольного пласта независимо от его гидравлической проницаемости, что

позволяет управлять процессом трещинообразования в угольном пласте по всей его мощности;

- экономическая эффективность применения способа гидроимпульсного рыхления выбросоопасных пластов оценивается снижением длительности нагнетания жидкости до завершения активного процесса гидрообработки пласта до 50 % и расхода жидкости до 60% при одновременном повышении уровня безопасности ведения горных работ по газодинамическому фактору и возможностью перехода на более перспективную схему проведения выработок комбайнами.

Список литературы

1. Правила ведения горных работ на пластах, склонных к газодинамическим явлениям: СОУ 10.1.001740088-2005 / Минуглепромом Украины. – К.; Минуглепром Украины, 2005. – 225 с.
2. Васильев Л.М. Импульсная насосная установка / Л.М. Васильев, В.С. Демченко, А.В. Родин // Геотехническая механика: Межведомст. сб. научн.труд / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2001. – № 29. – С.3-8.
3. Васильев Л.М. Механизм разрушения угольных пластов гидроимпульсным воздействием через шпурь или скважину / Л.М. Васильев, В.В. Зберовский, Ю.А. Жулай, П.Ю. Моисеенко // Материалы XVII Межд. науч. школы им. С.А. Христиановича «Деформирование и разрушение материалов с дефектами, и динамические явления в горных породах и выработках» Алушта 17-23 сентября 2007г. – Симферополь: ТНУ, 2007.- С. 73-77.
4. Мохначев М.П. Динамическая прочность горных пород / М.П. Мохначев, В.В. Присташ. – М.: Наука. 1982. – 142 с.
5. Родин А.В. Обоснование параметров и разработка погружного кавитационного генератора импульсов давления, обеспечивающего повышение эффективности предварительного увлажнения угольных пластов: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Родин А.В. – Днепропетровск, 1983. – 254 с.
6. Пилипенко В.В. Кавитационные автоколебания / В.В. Пилипенко. – К.: Наукова думка, 1989. – 316 с.
7. Пат. 87038 Украина, МКИ E21F 5/02 Устройство для гидроимпульсного воздействия на угольный пласт/ Л.М. Васильев, Ю.А. Жулай, В.В. Зберовський, П.Ю. Моисеенко, Н.Я. Трохимец; собственник Институт геотехнической механики НАН Украины. – № 2007 10209/9822; заявл.13.09.07; опубл.10.06.09, Бюл. № 11 – 4 с.: 2 ил.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Бойком В.О.
Надійшла до редакції 08.10.10*

УДК 504.3.054:622

© В.В. Задорнова

МІКРОКЛІМАТИЧНІ ФЛУКТУАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПАРАМЕТРІВ АТМОСФЕРИ В ГЛИБОКИХ КАР'ЄРАХ

Представлены результаты расчета температурных параметров атмосферы глубоких карьеров Кривбасса, полученных на основе статистического метода обработки экспериментальных данных.

Представлені результати розрахунку температурних параметрів атмосфери глибоких кар'єрів Кривбасу, отриманих на основі статистичного методу обробки експериментальних даних.

Presents the results of calculation of temperature parameters of the atmosphere of deep pits Krivbass obtained on the basis of the statistical method of data processing.