

РОЗРОБКА РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.831.322:532.528

Ю.А. Жулай¹, канд. техн. наук,
А.А. Ангеловский²,
Д.Л. Васильев³, канд. техн. наук

1 – Институт транспортных систем и технологий Национальной академии наук Украины, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: zhula@westa-inter.com

2 – Публичное акционерное общество „Краснодонуголь“, г. Краснодон, Украина

3 – Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: vdl_2007@mail.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОГО НАГНЕТЕНИЯ ЖИДКОСТИ В УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ

Yu.A. Zhulay¹, Cand. Sci. (Tech.),
A.A. Angelovskiy²,
D.L. Vasilyev³, Cand. Sci. (Tech.)

1 – Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: zhula@westa-inter.com

2 – Public Joint-Stock Company “Krasnodonugol”, Krasnodon, Ukraine

3 – N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: vdl_2007@mail.ru

THEORETICAL SUBSTANTIATION OF DYNAMICAL PARAMETERS OF IMPULSE INJECTION OF A FLUID INTO A COAL BED

Гидрорыхление является одним из основных способов предотвращения газодинамических явлений при проведении подземных горных выработок. Институтом геотехнической механики НАН Украины совместно с ПАО „Краснодонуголь“ ведутся работы по повышению эффективности гидрорыхления путём нагнетания жидкости в импульсном режиме. Максимальный размах автоколебаний давления жидкости, наложенный на величину подпора, соизмерим с давлением нагнетания. Это подтверждает возможность эффективного использования разработанного устройства для импульсного нагнетания жидкости в комплексе горного оборудования при гидрорыхлении угольных пластов.

Цель. Определение рациональных величин импульсов давления и частоты их следования при гидродинамическом воздействии на угольный пласт.

Методика. Методика исследований базируется на экспериментально установленных закономерностях взаимосвязи прочности каменного угля и скорости деформации, позволяющих обосновать рациональные частоты импульсов гидравлического давления и величины этих импульсов.

Результаты. Представлены экспериментальные рабочие точки устройства импульсного нагнетания жидкости в угольный пласт при изменении давления подпора в скважине в диапазоне от 3,1 МПа до 14,4 МПа и давлении нагнетания 21,9 МПа. Экспериментальные данные получены при замерах пульсаций давления на расстояниях 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 метра от выхода из устройства гидроимпульсного воздействия (УГИВ). Из представленных данных видно, что параметры динамического нагружения угольного пласта при импульсном гидрорыхлении УГИВ полностью соответствуют условиям теоретических зависимостей рациональной частоты следования импульсов от величины импульса давления. Рабочие точки устройства, как правило, находятся выше теоретических зависимостей.

Научная новизна. Впервые установлены гиперболические зависимости рациональной частоты следования гидравлических импульсов от величины их давления. Дано сопоставление этих же зависимостей и рабочих параметров устройства импульсного нагнетания жидкости в угольный пласт.

Практическая значимость. Рассмотрение приведенных зависимостей позволяет обосновать рациональные динамические параметры УГИВ, которые должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Значения импульсов давления, создаваемых устройством, должны достигать 2-10 МПа.
2. Частота следования импульсов давления должна лежать в диапазоне от 1 до 7 кГц.

Ключевые слова: выбросоопасность, импульсное нагнетание, давление, гидроимпульсное воздействие

Постановка проблемы. Известно, что при проведении подготовительных выработок комбайнами од-

ним из основных способов предотвращения газодинамических явлений является гидрорыхление угольного пласта нагнетанием жидкости в статическом режиме. Опыт работ показывает, что с увеличением глубины

разработки месторождений, изменением горно-геологических условий и свойств углепородного массива, при одновременном увеличении нагрузки на очистные и подготовительные забои, возможности повышения эффективности нагнетания жидкости в таком режиме исчерпаны. В процессе гидрорыхления не исключается вероятность гидроразрыва и гидроотжима краевой части пласта с последующим провоцированием газодинамического явления.

Вместе с тем известно, что одним из путей повышения эффективности гидрорыхления является нагнетание жидкости в импульсном режиме. В последние годы значимые результаты в этом направлении получены Институтом геотехнической механики (ИГТМ) НАН Украины совместно с ПАО „Краснодонуголь“. Лабораторные исследования на модели скважины погружного устройства гидроимпульсного воздействия (УГИВ) [1, 2] показали, что при давлении нагнетания 20,0 МПа с расходом жидкости 55 л/мин рабочий диапазон частоты автоколебаний составляет от 1 до 7 кГц.

Предварительные испытания технологии гидрорыхления угольного массива импульсным нагнетанием в него воды (по схеме, представленной на рис. 1), при проведении пластовых подготовительных выработок в условиях ПАО „Краснодонуголь“, показали возможность повышения эффективности гидрорыхления [2]. Нагнетание воды в угольный массив 1 по скважине 3, с установленным в ней герметизатором 2, производилось через напорный трубопровод 4 и кавитационный генератор (КГ) колебаний 5, преобразующий стационарное течение в дискретно-импульсное.

Максимальный размах автоколебаний давления жидкости, наложенный на величину подпора, соизмерим с давлением нагнетания. Это подтверждает возможность эффективного использования разработанного устройства для импульсного нагнетания жидкости в комплексе горного оборудования при гидрорыхлении угольных пластов.

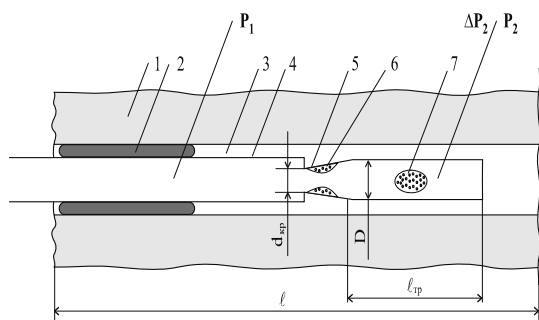


Рис. 1. Схема гидрорыхления угольного массива: 1 – угольный пласт; 2 – герметизатор скважины 3; 4 – напорный трубопровод; 5 – КГ; 6 – оседлая каверна; 7 – оторвавшаяся и снесенная по потоку каверна; l – длина скважины; $l_{кр}$ – длина последиффузорного канала; $d_{кр}$ – диаметр критического сечения; D – диаметр последиффузорного канала; P_1 – давление на входе в КГ; P_2 – давление на выходе из КГ; ΔP_2 – размах колебаний

Нерешенной задачей этих исследований осталось определение параметров динамического нагружения угольного пласта при импульсном гидрорыхлении с минимальными энергозатратами.

Целью настоящей работы является определение рациональных величин импульсов давления и частоты их следования при гидродинамическом воздействии на угольный пласт.

Анализ последних исследований и публикаций. Теоретическому исследованию импульсного воздействия на пласт было уделено внимание в работе [3]. Анализ воздействия импульса напряжений на дефектную структуру показывает, что взаимодействие полей напряжений с развитием дефектов (разрушение) происходит только при определённых характеристиках импульсов (амплитуда, длительность и частота) и с определёнными размерами дефектов.

Кратковременность действия высокого давления жидкости порождает в упругой среде переменное напряжение, которое, распространяясь в виде волн, не перегружает массив угля в целом, а обеспечивает образование системы разветвленных микротрещин. Вследствие этого повышается эффективная пористость угля и обеспечиваются условия для повышения влажности угля, что приводит к эффекту пылеподавления и ослабления массива.

Повышение эффективности ослабления угля при импульсном нагнетании объясняется действием дополнительных факторов:

- высокими местными концентрациями напряжений в массиве при прохождении через него ударных волн;
- усталостными деформациями отдельных элементов массива от многократного повторения знакопеременных напряжений;
- резонансными напряжениями при совпадении возбуждаемой и собственной частоты колебаний элементарных объемов угля, слагающих пласт;
- тангенциальными напряжениями при нарушении равновесия вмещающих пород.

Попытка обосновать параметры импульсного воздействия была предпринята в работе [4]. Зависимость частоты следования импульсов от величины импульсного давления получена из условий: увеличение скорости деформации, превышающей $480-500 \text{ с}^{-1}$, не имеет смысла, так как после этого значение коэффициента трения стабилизируется; а также равенства между собою длительности и скважности, определяемых из экспериментальной зависимости изменения импульсов давления во времени, которая приведена на рис. 2.

На рис. 3 показаны зависимости частоты следования импульсов от импульсного давления, заимствованные из работы [4], при различных значениях модуля упругости, наиболее вероятных для большинства шахтопластов при сжатии по напластованию ($E = 3 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^2 \text{ МПа}$) и перпендикулярно напластованию ($2 \cdot 10^3 \text{ МПа}$).

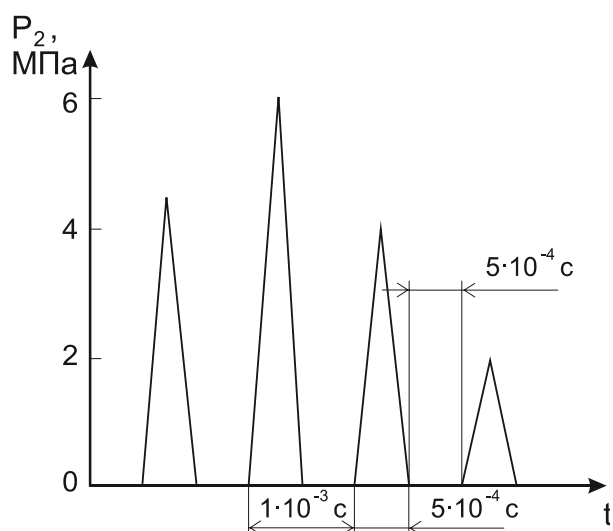


Рис. 2. Изменение импульсного давления во времени: P_2 – давление на выходе из КГ; t – время

Из рассмотрения представленной зависимости следует, что параметры гидроимпульсного воздействия на угольный пласт составляют: импульсное давление 20–60 МПа, частота следования импульсов 4–1 кГц. Однако следует отметить, что в настоящее время отсутствуют технические средства, способные реализовать воздействие с такими значениями импульсов.

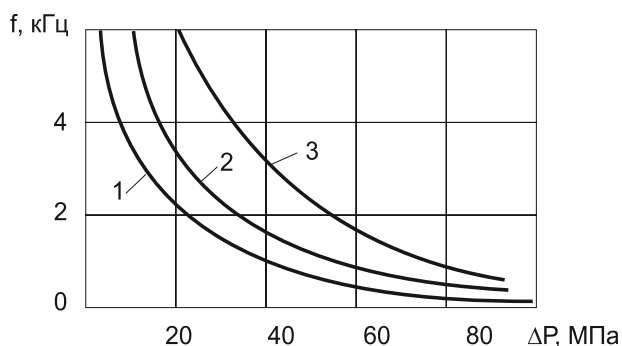


Рис. 3. Зависимости частоты следования импульсов от импульсного давления: 1 – $E = 3 \cdot 10^2$ МПа; 2 – $5 \cdot 10^2$ МПа; 3 – $2 \cdot 10^3$ МПа; f – частота колебаний КГ

Изложение основного материала. Многочисленные экспериментальные исследования, выполненные авторами работы при разработке нового способа гидроимпульсного воздействия, показали, что в условиях выбороопасных пластов, где давление газа (давление подпора) составляет 4–6 МПа, а в некоторых случаях достигает 12,0 МПа, зависимость изменения импульсов давления во времени (рис. 4) имеет некоторые отличия. К этим отличиям следует отнести: частота следования импульсов почти на порядок превышает частоту, полученную ранее; отсутствие скважности импульсов, как это видно на рис. 4.

Обоснование гидродинамических параметров импульсного воздействия выполним с использованием данных П.М.Мохначева и В.В. Пристаха [5], где скорость деформаций выражена в следующем виде

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

где ε – линейная деформация угля; ΔP – импульсное давление; f – частота импульсов; E – модуль упругости угля.

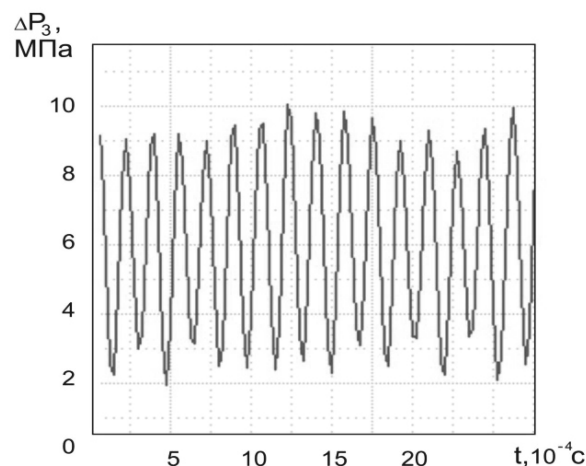


Рис. 4. Копия осциллограммы с записью колебаний давления в трубопроводе-имитаторе скважины при давлении подпора 4 МПа

В связи с проблемой горных ударов и внезапных выбросов, ВНИМИ [6] были исследованы свойства удароопасных углей. Впервые обнаружено падение прочности каменного угля. Особенно резкий спад прочности наблюдается в интервале скоростей деформации от 1 до 10 с^{-1} .

С учетом вышесказанного, выражение (1), для предельного случая скорости деформации, равной 10 с^{-1} , трансформируется следующим образом

$$f = \frac{10E}{\Delta P}. \quad (2)$$

Для нас более важно значение модуля упругости по напластованию, так как в этом направлении динамическое воздействие приводит в движение трещины, наклонные к напластованию, т.е. в направлении малой проницаемости угольного пласта в естественном состоянии.

На рис. 5 приведены теоретические зависимости рациональной частоты следования импульсов давления от их величины, рассчитанные по выражению (2).

Здесь же представлены экспериментальные рабочие точки устройства импульсного нагнетания жидкости в угольный пласт при изменении давления подпора в скважине в диапазоне от 3,1 до 14,4 МПа и давлении нагнетания 21,9 МПа. Экспе-

риментальные данные получены при замерах пульсаций давления на расстояниях 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 метра от выхода из УГИВ.

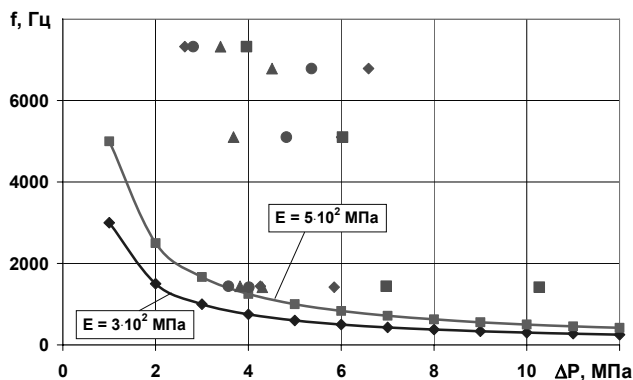


Рис. 5. Теоретические зависимости рациональной частоты следования импульсов от их величины и экспериментальные рабочие точки устройства импульсного нагнетания жидкости в угольный пласт при давлении нагнетания 21,9 МПа: Δ – 3,1 МПа; \square – 7,1 МПа; \circ – 10,1 МПа; \diamond – 14,4 МПа

Как видно из представленных данных параметры динамического нагружения угольного пласта при импульсном гидрорыхлении УГИВ полностью соответствуют условиям теоретических зависимостей рациональной частоты следования импульсов от величины импульса давления. Рабочие точки устройства, как правило, находятся выше теоретических зависимостей.

Выводы. Рассмотрение приведенных зависимостей позволяет обосновать рациональные динамические параметры УГИВ, которые должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Значения импульсов давления, создаваемых устройством, должны достигать 2–10 МПа.

2. Частота следования импульсов давления должна лежать в диапазоне от 1 до 7 кГц.

Так, например, при давлении нагнетания 20 МПа величина импульса давления за устройством составляет ≈ 4 МПа, тогда частота их следования должна лежать в пределах от 1,5 кГц и выше. Следует отметить, что указанный диапазон выбран для значений модуля $E = 3 \cdot 10^2$ и $5 \cdot 10^2$ МПа при сжатии по напластованию, так как именно в этом направлении динамическое воздействие приводит в движение трещины, наклонные к напластованию, т.е. в направлении малой проницаемости угольного пласта в естественном состоянии.

Список литературы / References

1. Пат. 87038 Украина, МКИ E21F 5/02. Устройство для гидроимпульсного воздействия на угольный пласт / Л.М. Васильев, Ю.А. Жулай, В.В. Зберовский, П.Ю. Моисеенко, Н.Я. Трохимец; заявитель и

патентообладатель ИГТМ НАН Украины. – опубл. 10.06.09, Бюл. № 11.

Vasilyev, L.M., Zhulay, Yu.A., Zberovskiy, V.V., Moiseyenko, P.Yu. and Trokhimets, N.Ya. *Ustroistvo dlya gidroimpulsnogo vozdeistviya na ugolnyi plast* [Device for Hydro-Impulse Influence on Coal Layer], Pat.87038 Ukraine, МКУ E21F 5/02, declarant and patent holder IGTM NAN of Ukraine, published on June 10, 2009, Bull. No.11.

2. Жулай Ю.А. Решение концептуальных задач гидроимпульсного рыхления выбросоопасных угольных пластов в режиме периодически-срывной кавитации / Ю.А. Жулай, В.В. Зберовский, // Сборник научных трудов НГУ – Днепропетровск, 2011.– № 35 т.2. – С. 246–253

Zhulay, Yu.A. and Zberovskiy, V.V. (2011), “Solution of Conceptual Tasks of The Hydro-Impulse Breakage of Coal Layers with Burst Hazard in the Mode of Periodically Disruptive Cavitation”, *Collection of the scientific papers of National Mining University, Dnepropetrovsk*, vol.2, no.35.

3. Зорин А.Н. Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых / Зорин А.Н., Халимендик Ю.М., Колесников В.Г. – М.: ООО Недр-Бизнесцентр, 2001.– 413 с.: ил. – ISBN 5-8365-0062-2

Zorin, A.N., Khalimendik, Yu.M. and Kolesnikov, V.G. (2001), *Mekhanika razrusheniya gornogo massiva i ispolzovanie ego energii pri dobyche poleznykh iskopaemykh* [Mechanics of Destruction of Rock Massif and Use of Its Energy During Mining], Nedra-Biznestsentr LTD, Moscow, Russia.

4. Васильев Л.М. Научные основы процесса и создание технических средств нагнетания жидкости в угольные пласты для борьбы с вредными явлениями в шахтах: автореф. дис. доктора техн. наук: специальность 05.15.11; 05.05.06 / Васильев Леонид Михайлович. – Днепропетровск, 1985. – 307 с.

Vasylyev, L.M. (1985), *Nauchnye osnovy protsessa i sozdanie tekhnicheskikh sredstv nagnetaniya zhidkosti v ugolnie plasty dlya borbi s vrednimi yavleniyami v shakhtakh* [Scientific Bases of the Process and the Creation of Hardware for Fluid Infusion into Coal Layers for the Harmful Phenomena Control in Mines], Abstract of Dr. Sci. (Tech.) dissertation, Dnipropetrovsk, Ukraine.

5. Мохначев М.П. Динамическая прочность горных пород / М.П. Мохначев, В.В. Присташ. – М.: Наука, 1982. – 142 с.

Mokhnachev, M.P. and Prystash, V.V. (1982), *Dinamicheskaya prochnost gornykh porod* [Dynamic Strength of Rock], Nauka, Moscow, Russia.

6. Лодус Е.В. Влияние скорости деформирования на прочность и хрупкость удароопасных углей и каменной соли / Е.В. Лодус, С.Л. Романовский // Горное давление и горные удары. – Л.: ВНИИ горн. геомеханики и маркшейд. дела, 1976. – сб. 99. – С. 151–154.

Lodus, Ye.V. and Romanovskiy, S.L., (1976), “Influence of speed of deformation on strength and fragility of high outburst coal and salt beds”, *Gornoe davlenie i gornye udary*, no.99, pp. 151–154.

Гідророзпушування є одним з основних способів запобігання газодинамічним явищам при проведенні підземних гірських виробок. Інститутом геотехнічної механіки (ІГТМ) НАН України спільно з ПАТ „Краснодонвугілля“ ведуться роботи по підвищенню ефективності гідророзпушування шляхом нагнітання рідини в імпульсному режимі. Максимальний розмах автоколивань тиску рідини, накладений на величину підпору, приблизно відповідає тиску нагнітання. Це підтверджує можливість ефективного використання розробленого пристрою для імпульсного нагнітання рідини в комплексі гірничого устаткування при гідророзпушуванні вугільних пластів.

Мета. Визначення раціональних величин імпульсів тиску і частоти їх проходження гідродинамічної дії на вугільний пласт.

Методика. Методика досліджень базується на експериментально встановлених закономірностях взаємозв'язку міцності кам'яного вугілля і швидкості деформації, що дозволяють обґрунтувати раціональні частоти імпульсів гідравлічного тиску і величини цих імпульсів.

Результати. Представлені експериментальні робочі точки пристрою імпульсного нагнітання рідини у вугільний пласт при зміні тиску підпору в свердловині в діапазоні від 3.1 МПа до 14.4 МПа і тиску нагнітання 21,9 МПа. Експериментальні дані, одержані при вимірах пульсацій тиску на відстанях 0,5; 1,0; 1,5 і 2,0 метри від виходу з пристрою гідроімпульсної дії (ПГІД). З представлених даних видно, що параметри динамічного навантаження вугільного пласта при імпульсному гідророзпушуванні ПГІД повністю відповідають умовам теоретичних залежностей раціональної частоти проходження імпульсів від величини імпульсу тиску. Робочі точки пристрою, як правило знаходяться вище за теоретичні залежності.

Наукова новизна. Уперше встановлені гіперболічні залежності раціональної частоти проходження гідравлічних імпульсів від величини їх тиску. Дано зіставлення цих же залежностей і робочих параметрів пристрою імпульсного нагнітання рідини у вугільний пласт.

Практична значимість. Розгляд приведених залежностей дозволяє обґрунтувати раціональні динамічні параметри ПГІД, які повинні задовольняти наступним вимогам:

1. Значення імпульсів тиску, створюваних пристроєм, повинні досягати 2–10 МПа.

2. Частота проходження імпульсів тиску повинна лежати в діапазоні від 1 до 7 кГц.

Ключові слова: *викидонебезпечність, імпульсне нагнітання, тиск, гідроімпульсна дія*

Hydro-breakage is one of basic methods of prevention of the gas-dynamic phenomena during underground mining. The N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine together with PAO “Krasnodonugol” works on increasing of efficiency of hydro-breakage by the method of pulse mode liquid infusion. Maximal scope of auto-vibrations of pressure of liquid superimposed on backup value corresponds approximately to the pressure of injecting. It confirms the possibility of the effective use of the created device for the pulse liquid infusion in the complex of mining equipment for hydro-breakage of coal layers.

Purpose. To determine efficient values of pressure impulses and frequency of their passage and hydrodynamic influence on a coal layer.

Methodology is based on the experimentally set laws of correlation between coal strength and speed of deformation, allowing determining of rational values of frequencies of hydraulic pressure impulses.

Findings. The experimental working points of the device for the impulsive injection of liquid in a coal layer at the change of pressure of backup in a borehole in the range from 3.1 MPa to 14.4 MPa and at pressure of injecting of 21,9 MPa were represented. Experimental information was received during measuring of pulsations of pressure on the distances 0,5; 1,0; 1,5 and 2,0 meters from hydro-impulse device. The parameters of the dynamic pressure of coal layer by means of impulsive hydro-breakage correspond to the terms of theoretical dependences of rational frequency of the passing impulses from the value of pressure impulse. Working points of the device, as a rule are higher than theoretical dependences.

Originality. Hyperbolic dependences of efficient frequency of the passing of hydraulic impulses on the value of their pressure were set for the first time. Comparison of these dependences with operating parameters of the device for the impulsive liquid infusion in a coal layer was carried out.

Practical value. Consideration of the mentioned dependences allows establishing of the rational dynamic parameters of hydro-impulse device satisfying the following requirements:

1. The values of the impulses of pressure, created by the device, must reach 2–10 MPa.

2. Frequency of the passing of pressure impulses must be in the range 1–7 kHz.

Keywords: *outburst hazard, pulse infusion, pressure, hydro-impulse influence*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Самусею. Дата надходження рукопису 18.11.11.