

© А.А. Ангеловский, Ю.А. Жулай, В.В. Зберовский, А.С.Ворошилов

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАТОРА УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ГИДРОРЫХЛЕНИИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

В работе приведены результаты теоретического определения параметров гидроимпульсного воздействия при гидрорыхлении угольного пласта в направлении малой проницаемости. Установлено, что значения импульсов давления, создаваемых генератором упругих колебаний, должны составлять 2,0 – 6,0 МПа при частоте их следования 1 – 7 кГц.

В роботі наведені результати теоретичного визначення параметрів гідроімпульсної дії при гідророзпушуванні вугільного пласта у напрямку малої проникності. Встановлено, що значення імпульсів тиску, створюваних генератором пружних коливань, повинні складати 2,0 – 6,0 МПа при частоті їх проходження 1 – 7 кГц.

In this paper the results of theoretical definition of pulse action parameters at hydraulic loosening of a coal layer in direction of small permeability are summarized. It is determined that the values of pressure pulses generated by elastic vibration generator should reach 2,0 – 6,0 MPa at pulse repetition frequency in the range from 1 to 7 kHz.

Анализ результатов гидрорыхления выбросоопасных угольных пластов в условиях больших глубин показывает, что при статическом нагнетании жидкости под расчетным давлением  $(0,75-1,0)\gamma H$  [1] параметры способа не всегда в полной мере обеспечивают безопасность ведения горных работ. Например, при расположении фильтрационной камеры в разгруженной зоне происходит свободная фильтрация жидкости по трещинам в выработанное пространство. А при расположении фильтрационной камеры в зоне повышенного горного давления или за ней, из-за низкой водопроницаемости угля возрастает вероятность гидроотжима одной из пачек угольного пласта или неуправляемого процесса гидроразрыва по трещинам напластования и прослоям, слагающим пласт.

Поэтому, единственным способом проведения выработок по неразгруженным выбросоопасным пластам остается применение буровзрывных работ в режиме сотрясательного взрывания. Что в свою очередь является сдерживающим фактором проведения выработок и дополнительным источником возгорания метановоздушной смеси в выработке.

В то же время известно, что применение импульсных режимов воздействия, в отличие от статического, приводит к снижению прочностных характеристик горных пород и повышению эффективности нагнетания [2]. Работы, проведенные по исследованию параметров гидроимпульсного воздействия с целью пылеподавления, а затем и гидрорыхления выбросоопасных угольных пластов при проведении выработок комбайнами [3, 4] позволили в значительной мере продвинуться в решении данной проблемы. Вместе с тем в решении задач предельного состояния угольного пласта при высоконапорном нагнетании жидкости, в том числе и при гидроимпульсном воздействии, до настоящего времени имеется ряд нерешенных вопросов.

Одной из нерешенных задач исследований, выполненных в работах [2-4], является определение рациональных параметров импульсного нагружения угольного пласта при гидрорыхлении и соответствие динамических характеристик погружного кавитационного генератора упругих колебаний (ГК) этим величинам.

**Целью** настоящей работы является определение рациональных параметров (импульсов давления и частоты их следования) гидроимпульсного воздействия на угольный пласт и соответствие амплитудно-частотных характеристик ГК этим параметрам.

Погружной кавитационный генератор упругих колебаний представляет собою трубку Вентури специальной геометрии. В зависимости от его геометрических параметров, при установившемся режиме давления на входе  $P_0$  и давлении подпора  $P_1$  ( $P_0$  и  $P_1 = \text{const}$ ) в проточном канале генератора реализуется периодически-срывное кавитационное течение жидкости. При этом осевшая каверна растет до максимальных размеров, а потом происходит отрыв всей её диффузорной части и захлопывание со стабильной частотой (рис. 1).

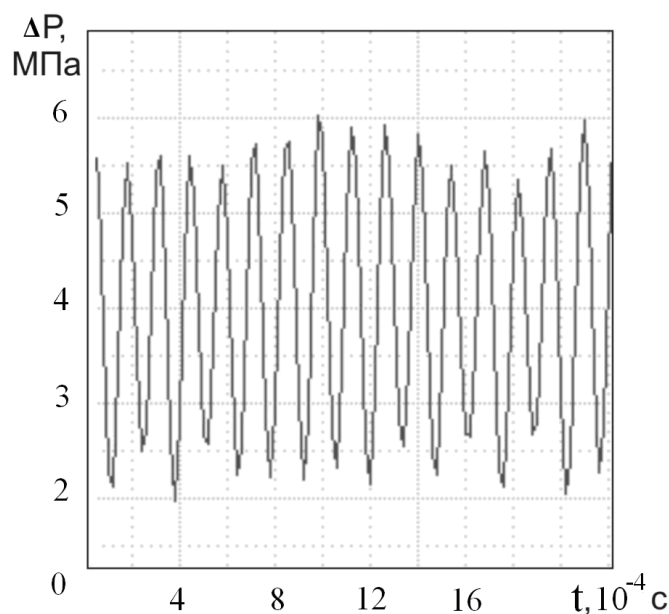


Рис. 1. Копия оциллограммы с записью автоколебаний давления  $\Delta P_1$  с частотой  $f = 7500$  Гц за ГК-2,5 при  $P_0 = 20,0$  МПа

Использование такого типа устройства в качестве источника гидродинамических волн позволяет реализовать способ создания импульсов давления жидкости, получаемых на выходе генератора. При этом возможность расположения ГК в фильтрационной части скважины позволяет передавать энергию импульсов давления непосредственно угольному пласту.

Динамические характеристики - частота и «двойная амплитуда» высокочастотных кавитационных автоколебаний определяются геометрическими и режимными параметрами кавитационного генератора. Под «двойной амплитудой», вследствие негармонической формы колебаний, понимается величина размаха  $\Delta P_1 = P_{1\text{max}} - P_{1\text{min}}$ , где  $P_{1\text{max}}$  и  $P_{1\text{min}}$  – максимальное и минимальное зна-

чения давления в импульсе. При этом установлено, что наиболее развитые кавитационные автоколебания, частотой и амплитудой которых в широком диапазоне значений легко управлять геометрическими и режимными параметрами, наблюдаются в гидравлической системе при значениях угла раскрытия диффузора генератора  $15^\circ < \beta < 45^\circ$ .

Теоретическому исследованию импульсного нагнетания жидкости в пласт было уделено внимание в работе [2]. По мнению авторов работы, сущность импульсного нагнетания состоит в использовании высокого и сверхвысокого давления жидкости (от 10 МПа до нескольких сотен), действующего в течение малого промежутка времени. Такое воздействие порождает в упругой среде переменное напряжение, которое, распространяясь в виде волн, не перегружает массив угля в целом, а обеспечивает образование системы разветвленных микротрещин. Это приводит к повышению эффективной пористости угля, а, следовательно, обеспечивает повышение эффективности его дегазации и увлажнения.

В отличие от статического нагнетания, воздействие на горные породы высокочастотной гидроимпульсной вибрацией приводит к росту динамической нагрузки и скорости развития деформации  $\dot{\epsilon}$ , снижению угла внутреннего трения и уменьшению отношения углов внутреннего трения при динамическом и статическом нагружениях  $\rho^d/\rho^{ст}$  (рис.2) [5].

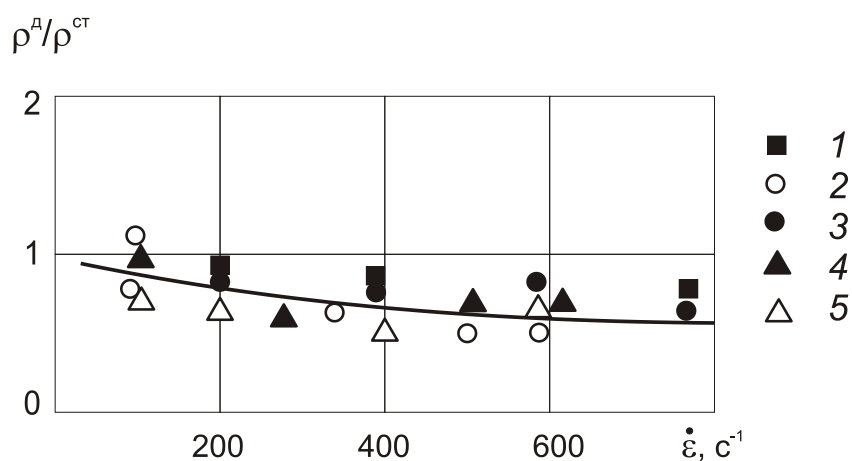


Рис. 2. Зависимость изменения скорости развития деформаций при изменении внутреннего трения: 1 и 2 – песчаник; 3 – габбро; 4 – аргиллит; 5 – известняк

Снижение сил внутреннего трения приводит к нарушению равновесия между силами сцепления горных пород, горизонтальной и вертикальной составляющими горного давления и зарождению касательных напряжений. При достижении критических значений скорости развития деформаций инициируется разрушение на сдвиг.

Таким образом, применение высокочастотной гидроимпульсной вибрации позволяет, изменяя силы внутреннего и внешнего трения нарушить равновесие сил вертикальной и горизонтальной составляющих горного давления и инициировать развитие деформаций сдвига, то есть трещинообразование.

Отличительной особенностью трещин сдвига является то, что они образуются в точке концентрации максимальных касательных напряжений под различными углами наклона к напластованию.

Обоснование параметров импульсного воздействия было предложено в работе [3], где скорость деформаций выражена в следующем виде

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

где  $\varepsilon$  – линейная деформация угля;  $\Delta P$  – импульсное давление;  $f$  – частота импульсов;  $E$  – модуль упругости угля; 4 – коэффициент, определяемый из условий равенства между собою длительности и скважности, длительностей возрастания и затухания импульсов по экспериментальной зависимости изменения импульсов давления во времени, которая приведена на рисунке 3

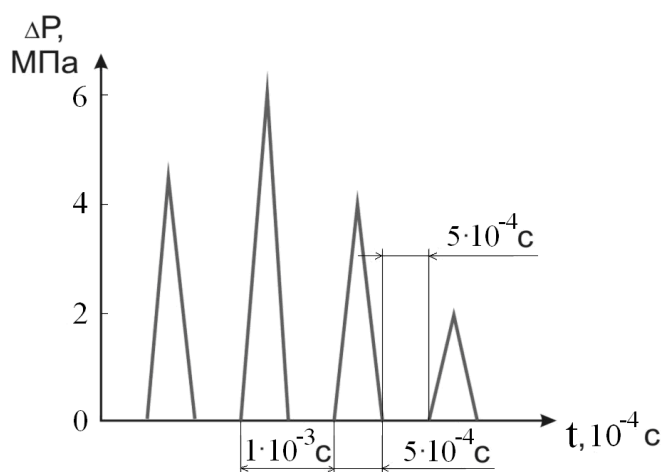


Рис. 3. Копия осциллограммы изменения импульсов давления  $\Delta P_1$  во времени за генератором при  $P_0 = 16$  МПа и частоте  $f = 1000$  Гц

Из выражения (1) можно определить величину импульсного давления в зависимости от частоты и значений модуля упругости угля

$$\Delta P = \frac{\dot{\varepsilon} E}{4f}. \quad (2)$$

Линейная деформация угля  $\dot{\varepsilon}$ , согласно зависимости изменения скорости развития деформаций (рис. 2), принимается в пределах  $480 \dots 500 \text{ с}^{-1}$ , так как при  $\dot{\varepsilon} > 500 \text{ с}^{-1}$  значения коэффициента трения практически стабилизируются и не могут оказать существенного влияния на изменение величины импульса [5]. Значение модуля упругости для угольных пластов при сжатии по напластованию составляет  $3 \cdot 10^2 \text{ МПа} \leq E \leq 5 \cdot 10^2 \text{ МПа}$ , а перпендикулярно напластованию  $E = 2 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ . Для этих значений по выражению (2) установлены теоретические зависимости величины импульсного давления  $\Delta P$  от частоты их следования  $f$  (рис. 4).

Анализ установленных зависимостей показывает, что для инициирования деформаций сдвига в условиях сжатия пласта по напластованию давление гидроимпульсного воздействия должно составлять  $70 - 10$  МПа, а частота следования импульсов  $1 - 7$  кГц соответственно.

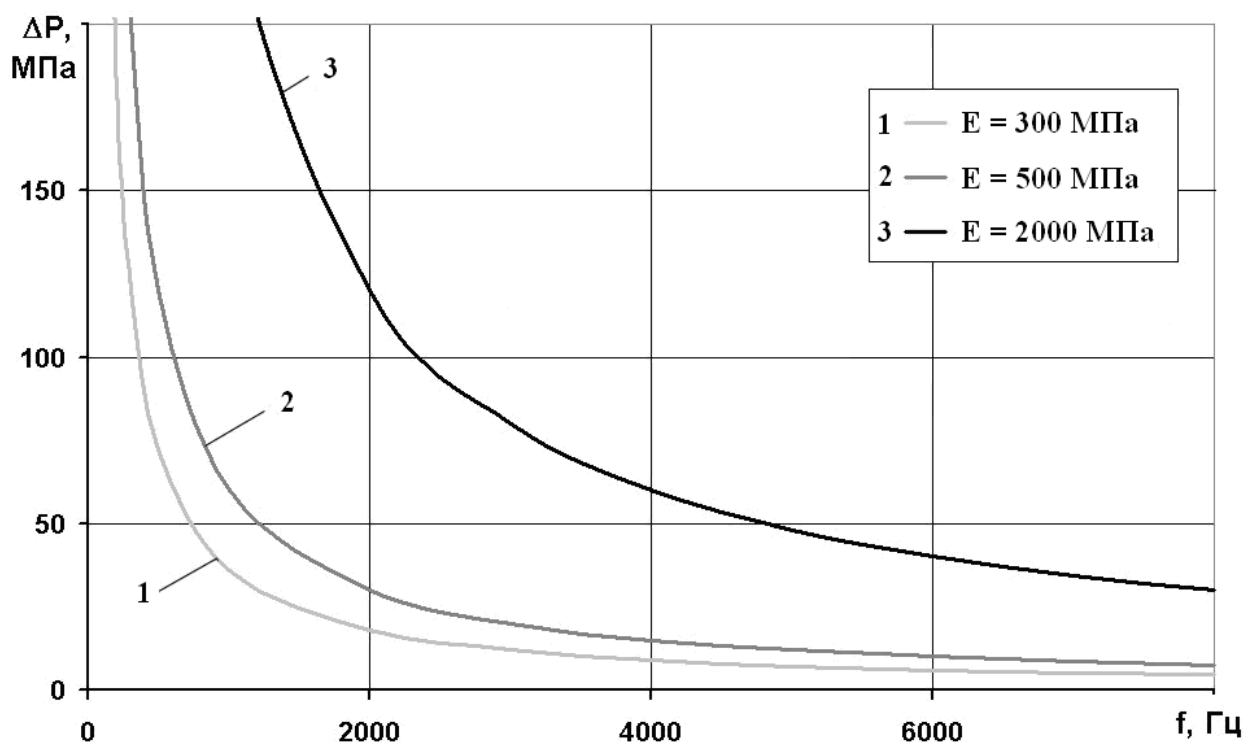


Рис. 4. Теоретические зависимости величин импульсов давления  $\Delta P$  от частоты их следования  $f$  для различных значений модуля упругости  $E$

Здесь необходимо отметить, что в настоящее время технические средства импульсного воздействия, способные реализовать такие значения импульсов в указанном частотном диапазоне отсутствуют. Вместе с тем результаты горно-экспериментальных исследований [4, 6] показали, что применение генераторов упругих колебаний при гидрорыхлении выбросоопасных угольных пластов приводит к быстрому, в течение 3-5 мин, изменению состояния краевой части пласта, перераспределению напряжений и интенсификации газовыделения. Это указывает на то, что необходимы дополнительные теоретические исследования установленных закономерностей (1) и (2).

Анализ условий применения гидроимпульсного воздействия на выбросоопасные угольные пласты и его параметров показали, что проникновению жидкости в пласт на глубинах более 800 м препятствуют силы горного давления  $\gamma H \approx 20,0 \dots 25,0$  МПа, силы трения и сопротивление угля сдвигу  $K = 2,0 \dots 6,0$  МПа, давление газа в пласте  $P_f = 1,0 \dots 12,0$  МПа, а зависимость изменения импульсов давления во времени имеет некоторые отличия. К этим отличиям (см. рис. 1 и 3) следует отнести частоту следования импульсов, которая почти на порядок превышает частоту, полученную ранее и отсутствие скважности импульсов.

С учетом этих особенностей, при отсутствии скважности импульсов выражение для определения скорости деформаций (1) запишется в виде

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\Delta P \cdot f}{E}. \quad (3)$$

Исследованиями [7], связанными с разрушением угля при горных ударах и внезапных выбросах, установлено, что наиболее резкий спад прочности углей

наблюдается в интервале развития деформаций со скоростью от 1 до  $10 \text{ с}^{-1}$ . При скорости развития деформаций более  $10 \text{ с}^{-1}$  инициируется разрушение угля на сдвиг. Тогда для предельного случая скорости развития деформации равной  $\dot{\varepsilon}=10 \text{ с}^{-1}$ , из выражения (3) получим:

$$\Delta P = \frac{10E}{f} \quad (4)$$

Зависимости значений импульсов давления от частоты их следования при различном значении давления на входе генератора  $P_0$ , рассчитанные по выражению (4), приведены на рис. 5.

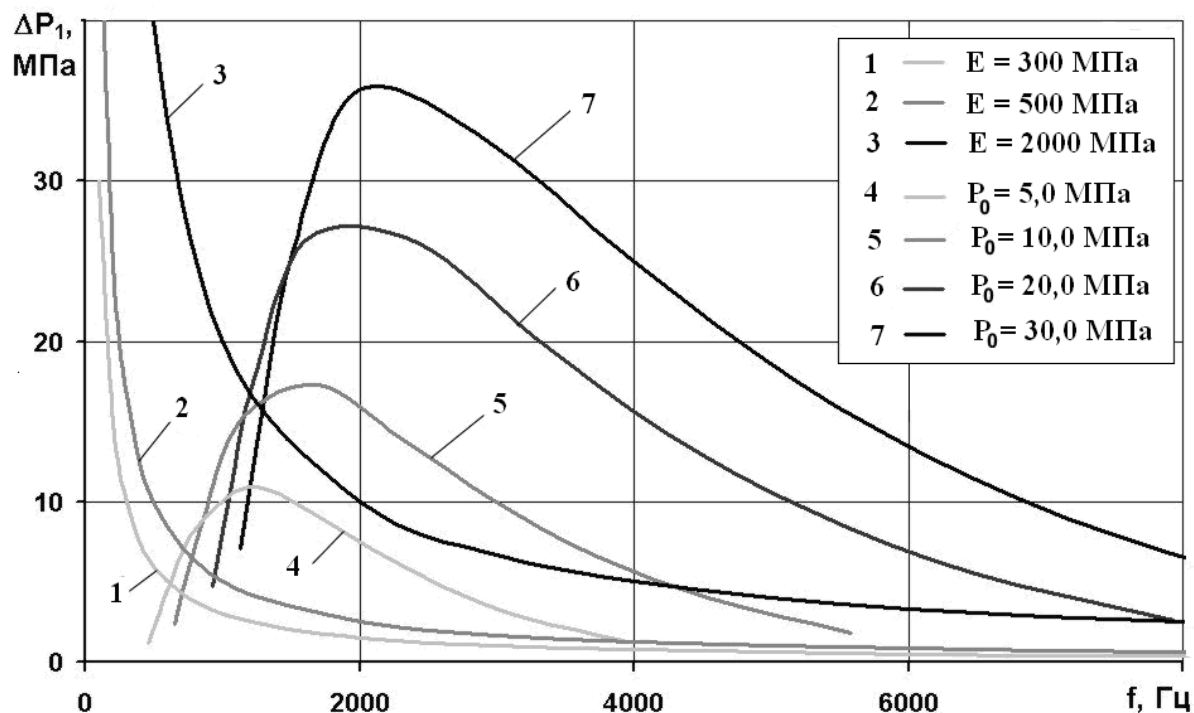


Рис. 5. Теоретические зависимости импульсов давления  $\Delta P$  от частоты их следования  $f$  для различных значений модуля упругости  $E$  и АЧХ генератора упругих колебаний ГК-2,5 при различных значениях давления  $P_0$

Сопоставление теоретических зависимостей значений импульсов давления от частоты их следования (кривые 1-3), приведенных на рисунках 4 и 5 показывает, что для предельного случая скорости развития деформации ( $\dot{\varepsilon}=10 \text{ с}^{-1}$ ), т.е. в условиях выбросоопасных угольных пластов, для инициирования деформаций сдвига требуются более низкие значения импульсов давления.

Как показала многолетняя практика ведения работ по гидрорыхлению угольных пластов, основным недостатком статического нагнетания жидкости является низкая эффективность трещинообразования при нагнетании жидкости в разнонаклонных плоскостях относительно напластования угольных прослоев. Данным условиям соответствует теоретическая зависимость значений импульсов давления от частоты их следования (кривая 3, рис. 5) при  $E = 2 \cdot 10^3 \text{ МПа}$  и  $\dot{\varepsilon}=10 \text{ с}^{-1}$ . На рис. 5 также приведены и амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) ГК-2,5 (теоретические зависимости размаха колебаний давления на выходе генератора  $\Delta P_1$  от частоты  $f$ ) при значениях давления нагнетания  $P_0$  от

5,0 МПа до 30,0 МПа. Эти зависимости построены по результатам их расчетов приведенных в работе [6], в которой обосновано давление нагнетания жидкости  $P_0 = 20$  МПа, как обеспечивающее достаточный уровень импульсного нагружения выбросоопасных пластов от 6 до 28 МПа с частотой  $f = 1 - 7$  кГц в диапазоне значений давления подпора  $P_1 = 2 - 12$  МПа.

При гидроимпульсном воздействии на угольный пласт давление нагнетания жидкости не превышает расчетную величину гидроразрыва угольного пласта  $P_n \leq 0,75\gamma H$ , которая для  $H=1000$  м составляет 22 МПа. При этом достигается эффективное трещинообразование в разнонаклонных плоскостях по мощности пласта, снижается вероятность прорыва жидкости в забой выработки и обеспечивается безопасность ведения горных работ.

Полученные результаты теоретического исследования зависимостей величины импульсов давления  $\Delta P$  от частоты их следования  $f$  при гидроимпульсном воздействии на угольный пласт в направлении малой проницаемости позволили сформулировать следующие выводы:

- теоретически определено, что значения импульсов давления, создаваемых генератором упругих колебаний, должны достигать 6,0...2,0 МПа при частоте их следования в диапазоне от 1,0 до 7,0 кГц соответственно;

- установлено, что амплитудно-частотные характеристики генератора упругих колебаний при давлении на его входе  $P_0 = 20,0$  МПа удовлетворяют требованиям зависимостей рациональных значений импульсов давления от частоты их следования и обеспечивают повышение эффективности гидрорыхления для борьбы с вредными явлениями в шахтах в диапазоне значений давления подпора  $P_1 = 2 - 12$  МПа.

#### Список литературы

1. Правила ведения горных работ на пластах, склонных к газодинамическим явлениям. / Стандарт Минуглепрома Украины СОУ 10.1.00174088-2005.- Киев: Минуглепром Украины. – 2005. – 225 с.
2. Торский П.Н. Импульсный метод как средство повышения эффективности нагнетания / П.Н. Торский, Ю.В. Кузнецов // Борьба с силикозом. – М.: Недра, 1967. – т. 7. – 242 с.
3. Васильев Л.М. Научные основы процесса и создание технических средств нагнетания жидкости в угольные пласты для борьбы с вредными явлениями в шахтах : дис. доктора техн. наук: 05.15.11; 05.05.06 / Васильев Л.М. – Днепропетровск, 1985. – 307 с.
4. Зберовский В.В. Гидроимпульсное воздействие на выбросоопасный угольный пласт / В.В. Зберовский Л.М. Васильев, Д.Л. Васильев, Ю.Е. Поляков // Збірник наукових праць НГУ України. – Дніпропетровськ: РВК НГА, 2012 - № 37.– С. 340-347.
5. Мохначев М.П. Динамическая прочность горных пород / М.П. Мохначев, В.В. Присташ. – М.: Наука. 1982. – 142 с.
6. Ангеловский А.А. Исследование динамических характеристик кавитационного генератора и оценка их соответствия параметрам выбросоопасных угольных пластов струй / А.А. Ангеловский, Ю.А. Жулай // Збірник наукових праць НГУ України. – Дніпропетровськ: РВК НГА, 2012.– № 37. – С.55-64.
7. 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.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Бойком В.О.  
Надійшла до редакції 11.10.2012*