

А.А. Ангеловский  
(ПАО «Краснодонуголь»),  
Д.Л. Васильев, канд. техн. наук, научн. сотр.  
(ИГТМ НАН Украины),  
Ю.А. Жулай, канд. техн. наук  
(Институт транспортных систем и технологий НАН Украины)

## ОБОСНОВАНИЕ РАБОЧЕГО ДАВЛЕНИЯ НАГНЕТАНИЯ ВОДЫ ПРИ ГИДРОИМПУЛЬСНОМ РЫХЛЕНИИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

**Аннотация.** Выполнено теоретическое и экспериментальное исследование динамических характеристик кавитационного генератора упругих колебаний давления жидкости при его автономных испытаниях с давлениями на входе  $P_n = 5, 10$  и  $20$  МПа и в диапазоне значений давления подпора  $P_n = 0,2-16$  МПа. Давление жидкости на входе в кавитационный генератор  $P_n = 20$  МПа и расходе жидкости  $Q = 55$  дм<sup>3</sup>/мин обеспечивает достаточный уровень импульсного нагружения выбросоопасных пластов на глубине залегания до  $1000$  м в диапазоне значений подпорного давления  $P_n = 2-12$  МПа. Амплитудно-частотные характеристики генератора упругих колебаний при давлении на его входе  $P_n = 20,0$  МПа и расходе жидкости  $Q = 55$  дм<sup>3</sup>/мин удовлетворяют требованиям зависимостей минимально необходимых значений импульсов давления от частоты их следования для обеспечения эффективного гидрорыхления угольных пластов.

**Ключевые слова:** кавитационный генератор, импульсное нагнетание, давление, гидроимпульсное воздействие

A.A. Angelovskiy  
(PJSC «Krasnodonugol'»),  
D.L. Vasilyev, Ph. D. (Tech.), Researcher  
(IGTM NASU)  
Yu.A. Zhulai, Ph.D. (Tech.)  
(Institute of Transport Systems and Technologies of NASU)

## GROUND OF WORKING PRESSURE OF FESTERING OF WATER AT GYDROIMPULSIVE LOOSENING OF COAL LAYERS

**Abstract.** The theoretical and experimental researches of the dynamic characteristics of the cavitation generator of elastic fluid pressure vibrations during autonomous tests with the entrance pressures  $P_n = 5, 10$  and  $20$  MPa and in a range of values  $P_n = 0.2-16$  MPa were performed. Pressure at the inlet of cavitation generator  $P_n = 20$  MPa and a flow rate of  $Q = 55$  dm<sup>3</sup>/min provides a sufficient level of impulse loading on outburst formation at the depth of  $1000$  m in the range of breastwall pressure  $P_n = 2-12$  MPa. The amplitude-frequency characteristics of the generator of elastic vibration at its entrance pressure  $P_n = 20$  MPa and a flow rate of  $Q = 55$  dm<sup>3</sup>/min satisfy the requirements of minimum required values dependency of the pulses pressure from the frequency of their following to ensure the effective of hydroimpulsive breaking of coal seams.

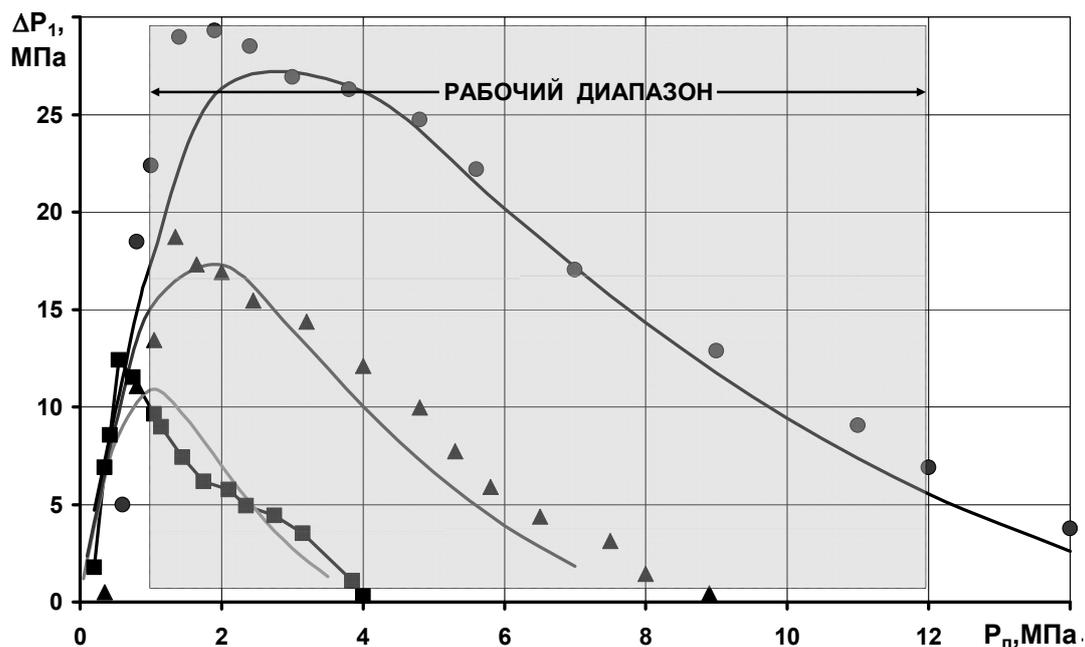
**Keywords:** generator of cavitation, impulsive festering, pressure, hydroimpulsive influence

В угольных шахтах для снижения выбросоопасности применяется несколько способов нагнетания жидкости в пласт. Цель этих способов заключается в снижении несущей способности угольного массива для развития в них системы трещин под действием горного давления, обеспечивающих повышение дегазации разрабатываемого массива. Для повышения эффективности этих способов ИГТМ НАН Украины разработан способ и устройство гидроимпульсного гидрорыхления [1, 2].

В работе [3] дано теоретическое обоснование динамических параметров импульсного нагнетания жидкости в пласт, заключающееся в определении минимально необходимых значений импульсов давления от частоты их следования,

обеспечивающих снижение прочности угля. В данной статье определим, в какой мере динамические характеристики устройства обеспечивают эти параметры.

На основании математической модели [4] расчёта размаха автоколебаний давления жидкости  $\Delta P_1$ , реализуемых генератором кавитационных упругих колебаний в трубке Вентури, проведено теоретическое определение зависимости  $\Delta P_1$  от давления подпора  $P_n$ . Под давлением подпора понимается давление в скважине угольного пласта, необходимое для развития в нём разгрузочных трещин. Эта зависимость была сопоставлена с результатами экспериментальных исследований [5] при значениях давления нагнетания  $P_H = 5, 10$  и  $20$  МПа (и расходах  $Q = 27, 39$  и  $55$  дм<sup>3</sup>/мин соответственно) с выделением рабочего диапазона по давлению подпора (рис. 1).



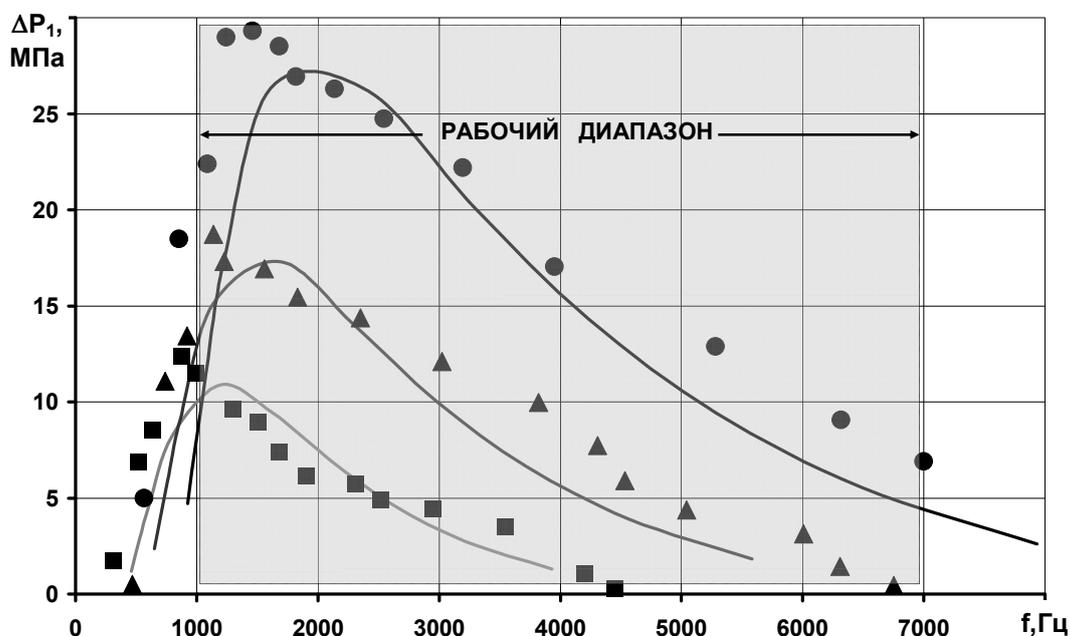
■ –  $P_H = 5$  МПа,  $Q = 27$  дм<sup>3</sup>/мин; ▲ –  $P_H = 10$  МПа,  $Q = 39$  дм<sup>3</sup>/мин; ● –  $P_H = 20$  МПа,  $Q = 55$  дм<sup>3</sup>/мин  
Рис. 1 – Совмещённые теоретические и экспериментальные зависимости размаха колебаний давления  $\Delta P_1$  от давления подпора  $P_n$  при различных давлениях нагнетания  $P_H$  и расходах  $Q$

Из данного рисунка видно, что в рабочем диапазоне изменения давления подпора в проточной части кавитационного генератора реализуется режим периодически-срывной кавитации и возникают колебания давления жидкости  $\Delta P_1$ , которые обусловлены схлопыванием кавитационных каверн. При фиксированном значении давления подпора  $P_n$  увеличение давления на входе в экспериментальный образец кавитационного генератора  $P_H$  приводит к росту колебательной величины давления  $\Delta P_1$ . Так при значении давления подпора  $P_n = 4,0$  МПа и с ростом давления нагнетания  $P_H$  от 10 до 20 МПа величина импульса растёт примерно с 10 до 25 МПа. Зависимости  $\Delta P_1 = F(P_n)$  для разных значений давления  $P_H$  имеют максимум в диапазоне значений давления подпора  $P_n \approx (0,6-3,5)$  МПа. При увеличении давления нагнетания  $P_H$  максимум значения  $\Delta P_1$  смещается в сторону больших значений давления подпора  $P_n$ . Максимальное значение размаха  $\Delta P_1$  колебательной величины давления приблизительно в 1,5-2,5 раза превышает давление  $P_H$  на входе в экспериментальный образец кавитационного генератора. Заметна тенденция, что при увеличении давления нагнетания  $P_H$  отношение  $\Delta P_1/P_H$  уменьшается.

Из рис. 1 видно, что при давлении жидкости на входе в кавитационный генератор  $P_n = 20$  МПа в необходимом диапазоне значений давления подпора  $P_n = (1-12)$  МПа устанавливается достаточно высокий уровень импульсного нагружения (6-28) МПа угольных пластов.

Сопоставление теоретических, полученных по математической модели [4], и экспериментальных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) кавитационного генератора [5], приведенных на рис. 2, указывает, что:

- как по результатам испытаний, так и по расчётам получены АЧХ с ярко выраженным нелинейным характером зависимостей размаха колебаний давления жидкости  $\Delta P_1$  от частоты их следования  $f$ . Максимумы размаха колебаний давления  $\Delta P_{1\max}$  (примерно от 2,5 до 1,5 $P_n$ ) наблюдаются в частотном диапазоне  $f$  от 1000-2000 Гц;
- расчётные зависимости размаха колебаний давления жидкости  $\Delta P_1$  от частоты их следования  $f$ , несмотря на сложную гидродинамическую картину течения в проточной части кавитационного генератора и сложности его математического описания, удовлетворительно согласуются с соответствующими экспериментальными данными.



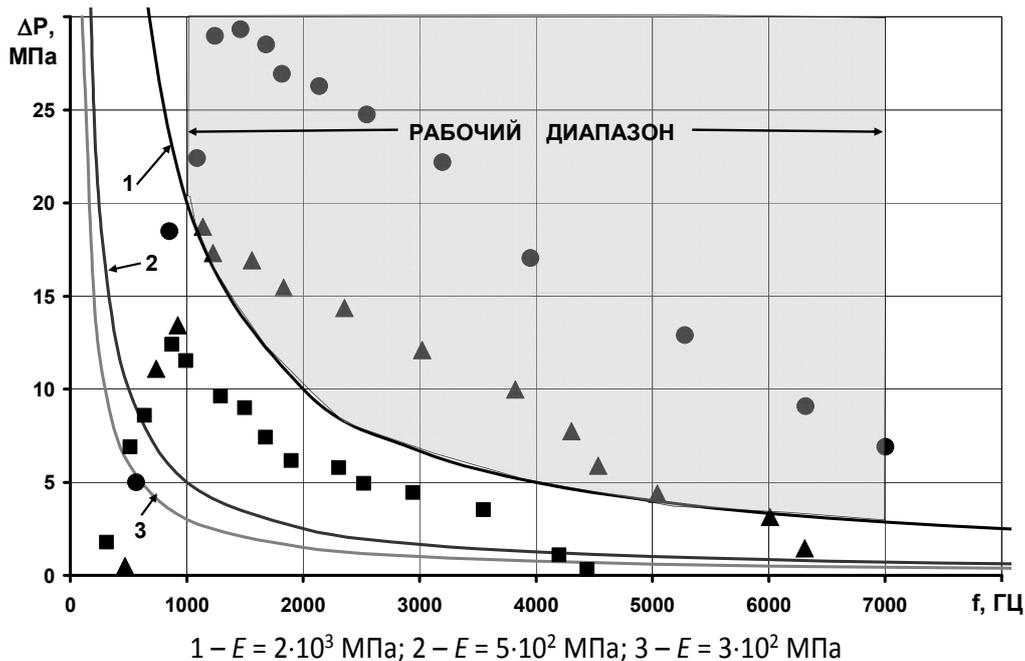
■ —  $P_n = 5$  МПа,  $Q = 27$  дм<sup>3</sup>/мин; ▲ —  $P_n = 10$  МПа,  $Q = 39$  дм<sup>3</sup>/мин; ● —  $P_n = 20$  МПа,  $Q = 55$  дм<sup>3</sup>/мин  
Рис. 2 — Расчетные и экспериментальные амплитудно-частотные характеристики генератора при давлениях на входе в кавитационный генератор при различных давлениях нагнетания  $P_n$  и расходах  $Q$

Рассмотрение зависимостей, представленных на рис. 1 и рис. 2, позволяет обосновать давление жидкости на входе в генератор упругих колебаний давления жидкости  $P_n = 20$  МПа как обеспечивающее достаточный уровень импульсного нагружения (6-28) МПа выбороопасных пластов в диапазоне значений давления подпора  $P_n = (2-12)$  МПа с частотой  $f = (1-7)$  кГц. Аналогичные теоретические зависимости получены в виде закономерностей  $\Delta P_1 = F(f)$ , которые были сопоставлены с экспериментальными [5]. Получено довольно высокое согласование (90-95) % этих зависимостей.

В работе [3] приведены минимальные необходимые значения параметров импульсного гидрорыхления угольного пласта в виде зависимости размаха давления от частоты воздействия, полученные из условия разрушения угля при им-

пульсном нагрюженні при різних значеннях модуля епругості  $E$ . Их сопоставление с експериментальними АЧХ [5] (зависимостями размаха колебаний давления жидкости  $\Delta P_1$  от частоты их следования  $f$ ) при давлениях нагнетания  $P_H = 5, 10$  и 20 МПа приведены на рис. 3.

Представленные данные подтверждают, что генератор эпругих колебаний давления жидкости при давлениях нагнетания  $P_H = 20$  МПа в диапазоне изменения давления подпора  $P_n$  от 1 до 12 МПа полностью удовлетворяет требованиям зависимости минимально необходимых значений импульсов давления от частоты гидроимпульсного воздействия для разупрочнения угольного пласта и снижения его несущей способности.



■ –  $P_H = 5$  МПа,  $Q = 27$  дм<sup>3</sup>/мин; ▲ –  $P_H = 10$  МПа,  $Q = 39$  дм<sup>3</sup>/мин; ● –  $P_H = 20$  МПа,  $Q = 55$  дм<sup>3</sup>/мин  
 Рис. 3 – Теоретические зависимости минимально необходимых значений импульсов давления  $\Delta P$  от частоты их следования  $f$  для различных значений модуля эпругости  $E$  и экспериментальные АЧХ кавитационного генератора при различных значениях давления нагнетания  $P_H$  и расходах  $Q$

### Выводы

1. Выполнено теоретическое и экспериментальное исследование динамических характеристик кавитационного генератора эпругих колебаний давления жидкости при его автономных испытаниях с давлениями на входе  $P_H = 5, 10$  и 20 МПа и в диапазоне значений давления подпора  $P_n = (0,5-16)$  МПа.

2. Давление жидкости на входе в кавитационный генератор  $P_H = 20$  МПа и расходе жидкости  $Q = 55$  дм<sup>3</sup>/мин обеспечивает достаточный уровень импульсного нагрюжения выбросоопасных пластов на глубине залегания до 1000 м в диапазоне значений подпорного давления  $P_n = (1-12)$  МПа.

3. Амплитудно-частотные характеристики генератора эпругих колебаний при давлении на его входе  $P_H = 20$  МПа и расходе жидкости  $Q = 55$  дм<sup>3</sup>/мин удовлетворяют требованиям зависимостей минимально необходимых значений импульсов давления от частоты их следования для обеспечения эффективного гидрорыхления угольных пластов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 87038 Україна, МПК E21F 5/02. Пристрій для гідроімпульсного впливу на вугільний пласт / Л.М.

- Васильев, Ю.О. Жулай, В.В. Зберовський, П.Ю. Моїсеєнко, М.Я. Трохимец; заявник і патентовласник ІГТМ НАН України. – № а 200710209/9822; Заявл. 13.09.07; Опубл. 10.06.09, Бюл. № 11.
2. Пат. 73023 Україна, МПК Е21В 43/2. Спосіб гідроімпульсного розпушування вугільних пластів / В.В. Зберовський, Ю.О. Жулай, Д.Л. Васильев, О.В. Никифоров, Г.И. Колчин, О.А. Ангеловський, І.Ф. Чугунков, О.Н. Ніскевич; заявник і патентовласник ІГТМ НАН України. –№ и 201201719; Заявл.16.02.12; Опубл.10.09.12, Бюл. № 17.
  3. Жулай, Ю.А. Теоретическое обоснование динамических параметров импульсного нагнетания жидкости в угольных пласт / Ю.А. Жулай, Д.Л. Васильев, А.А. Ангеловский // Науковий вісник НГУ. – Днепропетровск: НГУ, 2012. – № 3. – С. 26-30.
  4. Пилипенко, В.В. Кавитационные автоколебания / В.В. Пилипенко. – К.: Наук. думка, 1989. – 316 с.
  5. Ангеловский, А.А. Исследование динамических характеристик кавитационного генератора и оценка их соответствия параметрам выбросоопасных угольных пластов / А.А. Ангеловский, Ю.А. Жулай // 36. наук. пр. НГУ України. – Дніпропетровськ, 2012. – № 37. – С. 55-64.

---

#### Об авторах

**Ангеловский Александр Анатольевич**, генеральный директор, Публичное акционерное общество «Краснодонуголь», г. Краснодон, Украина

**Васильев Дмитрий Леонидович**, канд. техн. наук, научн. сотр., Институт геотехнической механики Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), г. Днепропетровск, Украина

**Жулай Юрий Алексеевич**, канд. техн. наук, ст. научн. сотр., вед. научн. сотр., Институт транспортных систем и технологий Национальной академии наук Украины (ИТСТ НАНУ), г. Днепропетровск, Украина, e-mail: zhulay@westa-inter.com

---

#### About the authors

**Angelovskiy Aleksander Anatolyevich**, CEO of Public Joint Stock Company «Krasnodonugol'», Krasnodon, Ukraine

**Vasilyev Dmitry Leonidovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Researcher, Institute of geotechnical mechanics of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine

**Zhulay Yuriy Alekseevich**, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, Principal Researcher, Institute of Transport Systems and Technologies of National Academy of Sciences of Ukraine (ITST NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine

С.Л. Давыдов, магистр, вед. инженер  
(ИГТМ НАН Украины)

## РАСЧЁТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕЙ И ОТХОДОВ ИХ ОБОГАЩЕНИЯ МЕТОДОМ ПАРОПЛАЗМЕННОЙ ГАЗИФИКАЦИИ

**Аннотация.** В работе приведены расчёты параметров термодинамики процесса пароплазменной переработки углей основных регионов Украины и отходов углеобогащения. Расчёт термодинамики проведён с помощью программы термодинамического моделирования ASTRA-4. Показано, что практическая реализация этих процессов может обеспечить комплексную переработку сырья при наибольшем выходе качественного продукта в газовой фазе и полезных компонентов минеральной составляющей. Полученный синтез-газ можно использовать как высококалорийное топливо, сырьё для химической промышленности при производстве жидкого топлива, контроль атмосферы для металлургической промышленности. Твёрдую фазу можно использовать в строительстве для производства строительных материалов.

**Ключевые слова:** термодинамика, пароплазменная переработка угля, отходы углеобогащения, синтез-газ

Davydov S.L., Master of Science (Tech.), Engineer  
(IGTM NASU)

## ESTIMATES OF PROCESSING OF COAL AND WASTE THEIR ENRICHMENT METHOD STEAM-PLASMA GASIFICATION

**Abstract.** This paper presents calculations of the thermodynamics process parameters of steam-plasma processing of coal of major regions of Ukraine and coal waste. Thermodynamics calculation performed using the thermodynamic simulation program ASTRA-4. It is shown that the implementation of these processes can provide comprehensive processing of raw materials at the highest output of quality product in the gas phase and useful components of the mineral part. The resulting synthesis gas can be used as high-energy fuel, raw material for chemical industry for production of fuel oil, controlled atmosphere for the steel industry. The solid phase can be used in construction materials production.

**Keywords:** thermodynamics, vapor plasma processing of coal, waste coal, the synthesis gas

Непрерывное удорожание на мировом рынке лёгких энергетических ресурсов, нефти и газа, перспектива ограничения их добычи, экологическая угроза от всевозрастающего их потребления вызывает серьёзное беспокойство мирового, в том числе украинского, сообществ, побуждая к поиску альтернативных источников энергии. Естественно, уголь различной степени метаморфизма, отходы углеобогащения, другие углеродсодержащие отходы являются наиболее перспективными для восстановления энергетического баланса.

По многим прогнозам запасов угля в мире хватит на несколько столетий. Уже в настоящее время 25 % энергии производится из угля и его значение возрастает. Однако непрерывно снижающееся качество угля, прямое сжигание, структура его потребления промышленностью, порождают целый ряд проблем – экологического, технического характера, баланса его потребления и другие.

Так, при непосредственном сжигании угля образуется большое количество вредных выбросов загрязняющих окружающую среду: диоксид серы  $SO_2$ , окиси азота  $NO$ , образующих кислоты при контакте с атмосферной влагой; диоксид углерода  $CO_2$ , на долю которого приходится 50 % выбросов в атмосферу, создающих парниковый эффект.

В Украине запасы угля сосредоточены в трёх угольных бассейнах. В самом большом, Донбассе, запасы угля составляют примерно 240 млрд. т, здесь сосре-