

УДК 622.831.322:532.528

**Л.М. Васильев, Н.А. Дзоз, Ю.А. Жулай,
П.Ю. Моисеенко**

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
КАВИТАЦИОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИМЕНИТЕЛЬНО
К ТЕХНОЛОГИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕТАНА
ИЗ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА**

Семинар № 4

Представлена инженерная методика определения динамических параметров пульсирующего потока жидкости за погружным кавитационным генератором колебаний давления жидкости, используемого в технологическом процессе гидрорыхления угольного массива. Методом линейного регрессивного анализа получены коэффициенты эмпирических формул по определению частоты и размаха кавитационных автоколебаний.

Создание безопасных условий добычи угля путем применения различных режимов напорного нагнетания жидкости в угольные пласты многократно проверено практикой ведения горных работ в шахтах. Вместе с тем, освоение углегазовых месторождений на больших глубинах, приводит к снижению эффективности мероприятий по извлечению метана из угольного пласта и снижению пылеобразования. По характеру воздействия напорное нагнетание не позволяет закачать необходимое количество жидкости в пласт и создать равномерную и дегазированную зону вокруг скважины, предусмотренную инструкцией [1].

Качественно нового уровня эффективности гидрорыхления можно достичь путем обработки угольного пласта дискретно-импульсным нагне-

танием с применением в технологической схеме погружного кавитационного генератора колебаний давления [2], представляющего собой трубку Вентури специальной геометрии [3] (см. рис. 1).

Генератор преобразует статическое течение жидкости в дискретно-импульсное. Это происходит за счет образования оседлой каверны в критическом сечении генератора, её роста и распространения в диффузорную часть, с последующим её отрывом (диффузорной части) и сносом в зону повышенного давления, где она схлопывается. При этом размах колебаний $\Delta P_2 = P_{2\max} - P_{2\min}$ (где $P_{2\max}$ и $P_{2\min}$ – максимальные и минимальные значения давления за генератором в импульсе) превышает значение давления нагнетания в 1,342,7 раза, с частотой следования импульсов, лежащей в звуковом диапазоне. Эффективность такого воздействия характеризуется развитием сети трещин, которая определяется соотношением прочностных показателей угля и энергетических характеристик нагнетаемой жидкости [4]. Учитывая, что скорость деформации при дискретно-импульсном нагружении

$$v_d = \frac{\Delta P \cdot f}{E},$$

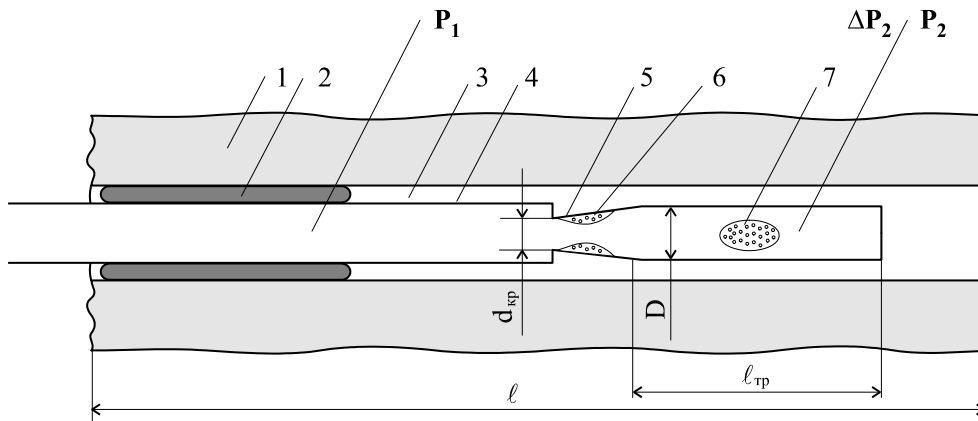


Рис. 1. Схема гидорыхления угольного массива: 1 – угольный пласт; 2 – герметизатор скважины; 3 – напорный трубопровод; 4 – кавитационный генератор; 5 – седлая каверна; 6 – оторвавшаяся и снесенная по потоку каверна

где ΔP – величина импульса давления жидкости, f – частота следования импульсов, а E – модуль Юнга, определение величин ΔP и f является важной задачей в оценке эффективности гидроимпульсного рыхления угольного пласта.

Значения этих параметров определяется экспериментально, как это было показано в работе [2], или путем сложных математических расчетов [5, 6].

Целью настоящей работы является разработка инженерной методики определения динамических параметров кавитационного генератора применительно к технологическому процессу извлечения метана из газового пласта.

В работе [5] на основе анализа экспериментальных зависимостей частот кавитационных колебаний от параметра кавитации для трубок Вентури с углами раскрытия диффузора 20 и 30°, предложена формула в виде:

$$f = \frac{v_{c,кр} \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}{r_{кр} \sqrt{\mu}} \cdot (1 - \sqrt{1 - \tau}), \quad (1)$$

где $v_{c,кр}$ – скорость жидкости в критическом сечении генератора, β – угол раскрытия диффузора генератора, $r_{кр}$ – радиус критического сечения, μ – коэффициент расхода, τ – параметр кавитации, равный соотношению давления подпора P_2 к давлению питания P_1 .

Скорость жидкости в критическом сечении сопла определяется по формуле

$$v_{c,кр} = \sqrt{2(P_1 - P_k)/\rho}, \quad (2)$$

где P_k – давление в кавитационной каверне; ρ – плотность жидкости. Формула для расчетов комплексных амплитуд высокочастотных кавитационных колебаний давления была получена в работе [6] в виде:

$$|\delta P_2| = \rho v_{cк.р}^2 (2\pi)^2 S h_M^2 \times \frac{I_d}{\sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 \cdot v_{cк.р}^2 \cdot I_d^2 \cdot F_2^2}{l_k^2 \cdot c^2}}} \cdot \frac{|\delta V_k|}{l_k^2}, \quad (3)$$

где I_d – коэффициент инерционного сопротивления участка диффузора трубки Вентури, расположенного между осевой каверной и выходом диффузора; $|\delta V_k|$ – объем оторвав-

шейся части каверны; c – скорость звука в жидкости; F_2 – площадь выходного сечения диффузора генератора, l_k – длина кавитационной каверны, Sh_m – модифицированное число Струхалия.

I_d определяются по формуле

$$I_d = \frac{1}{\pi \cdot tg \frac{\beta}{2}} \times \left[\frac{1}{r_{кр} + l_k tg \frac{\beta}{2}} - \frac{1}{r_{кр} + l_d tg \frac{\beta}{2}} \right],$$

где l_d – длина диффузорной части генератора.

Формулы (1 и 3) дают удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных значений частот и амплитуд колебаний от параметра τ для разных давлений на входе в трубку Вентури с углом раскрытия диффузора $\beta = 20$ ч 30° . Ими можно пользоваться при расчете размаха колебаний давления, создаваемых генератором, при этом число Струхалия необходимо рассчитывать, как было показано в [6], по формуле

$$Sh_m = \sqrt{1 - \sqrt{1 - \tau}} - \frac{1}{\sqrt{\mu}} (1 - \sqrt{1 - \tau}).$$

Выражения для теоретического определения частоты (1) и амплитуды (3) высокочастотных кавитационных колебаний вызывают определенную сложность их применения в инженерных расчетах.

На основе проведенного анализа формулы (1), а также большого количества экспериментальных данных для инженерных методов расчета частоты кавитационных колебаний за генератором предложена более упрощенная формула

$$f = 0,5\tau \frac{V_{с.кр}}{r_{кр}} \frac{tg \beta / 2}{\sqrt{\mu}}. \quad (4)$$

Для угла раскрытия диффузора генератора $\beta = 20^\circ$ формула (4) запишется в виде:

$$f = 0,09 \frac{V_{с.кр}}{r_{кр}} \cdot \tau, \quad (5)$$

которая дает удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных частот.

На рис. 2 приведены расчетные по формуле (5) и экспериментальные зависимости частоты кавитационных автоколебаний за генератором от параметра кавитации τ , с углом $\beta = 20^\circ$ и $d_{кр} = 4$ мм для различных значений давления на входе P_1 . Экспериментальные значения частоты получены при испытании кавитационного генератора на гидравлическом стенде [2].

Из приведенных зависимостей видно удовлетворительное не только качественное, но и количественное согласование расчетных и экспериментальных данных. Это подтверждает возможность применения формулы (5) в инженерных расчетах по определению ожидаемых частот, за кавитационным генератором.

Из анализа зависимостей размаха высокочастотных колебаний давления жидкости, обусловленных режимом периодически-срывной кавитации, при разных значениях давления на входе в генератор с разными углами раскрытия диффузора и разными диаметрами критического сечения вытекает, что значение размаха колебаний определяется параметром τ , давлением на входе P_1 , углом диффузора β и отношением диаметра D входного сечения диффузора к диаметру $d_{кр}$ критического сечения $D/d_{кр} = \bar{D}$. При этом зависимости размаха колебаний давления от τ и β нелинейна.

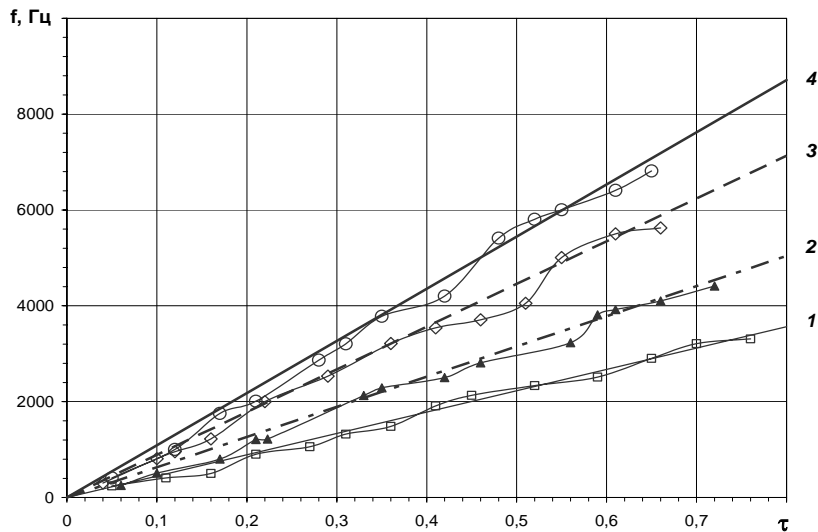


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные зависимости частоты кавитационных колебаний f от параметра кавитации τ :
Расчетные данные: 1 – $P_1 = 5$ МПа; 2 – $P_1 = 10$ МПа; 3 – $P_1 = 20$ МПа; 4 – $P_1 = 30$ МПа;
Экспериментальные данные: \square – $P_1 = 5$ МПа; Δ – $P_1 = 10$ МПа; \diamond – $P_1 = 20$ МПа; \circ – $P_1 = 30$ МПа

Кривые относительного размаха колебаний давления $\Delta P_2/P_1 = f(\tau)$ и $\Delta P_2/P_1 = f(\text{tg } \beta/2)$ описываются уравнением вида

$$y = a_0 \cdot x^{a_1} \cdot e^{a_2 x},$$

где в качестве переменной x используется τ или $\text{tg } \beta/2$.

Зависимость $\Delta P_2/P_1 = f(\bar{D})$ имеет вид $y = x^k$. Итак, зависимость $\Delta P_2/P_1 = f(\tau; \text{tg } \beta/2; \bar{D})$ можно выразить в виде произведения этих функций

$$\frac{\Delta P_2}{P_1} = a_0 (\tau - a_1)^{a_2} e^{a_3 (\tau - a_2)} \times$$

$$\times (\text{tg } \beta/2)^{a_4} e^{a_5 \text{tg } \beta/2} \cdot \bar{D}^{a_6}$$

Если выполнить логарифмирование обеих частей этого уравнения, получим линейное уравнение зависимости

$\ln\left(\frac{\Delta P_2}{P_1}\right)$ относительно переменных $\ln \tau$; τ ; $\ln(\text{tg } \beta/2)$; $\text{tg } \beta/2$; \bar{D} с

коэффициентами $\ln a_0$; a_1 ; a_2 ; a_3 ; a_4 ; a_5 ; a_6 , которые находятся методом линейного регрессивного анализа. С учетом этих обстоятельств получена эмпирическая формула для расчетов величины размаха кавитационных колебаний давления через геометрические и режимные параметры генератора в виде уравнения:

$$\Delta P_2 = \left[a_0 (\tau - a_1)^{a_2} \cdot e^{a_3 (\tau - a_2)} \times \right. \\ \left. \times (\text{tg } \beta/2)^{a_4} e^{a_5 \text{tg } \beta/2} \cdot \bar{D}^{a_6} \right] P_1. (6)$$

Учитывая, что на практике, как правило, используются трубки Вентури с $\beta = 20^\circ$ и $\bar{D} = 4$ уравнение трансформируется в следующем виде:

$$\Delta P_2 = \left[a_0 (\tau - a_1)^{a_2} \cdot e^{a_3 (\tau - a_2)} \right] \cdot P_1 (7)$$

В качестве примера на рис. 3 приведены рассчитанные по формуле (7) значения размаха колебаний для различных значений параметра τ и давлении P_1 для генератора с углом

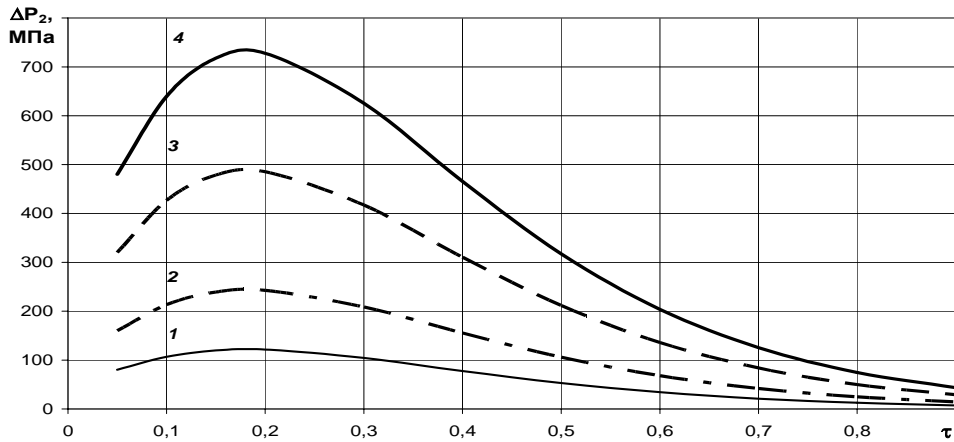


Рис. 3. Расчетные зависимости размаха автоколебаний давления ΔP_2 от параметра кавитации τ : 1 – $P_1 = 5$ МПа; 2 – $P_1 = 10$ МПа; 3 – $P_1 = 20$ МПа; 4 – $P_1 = 30$ МПа

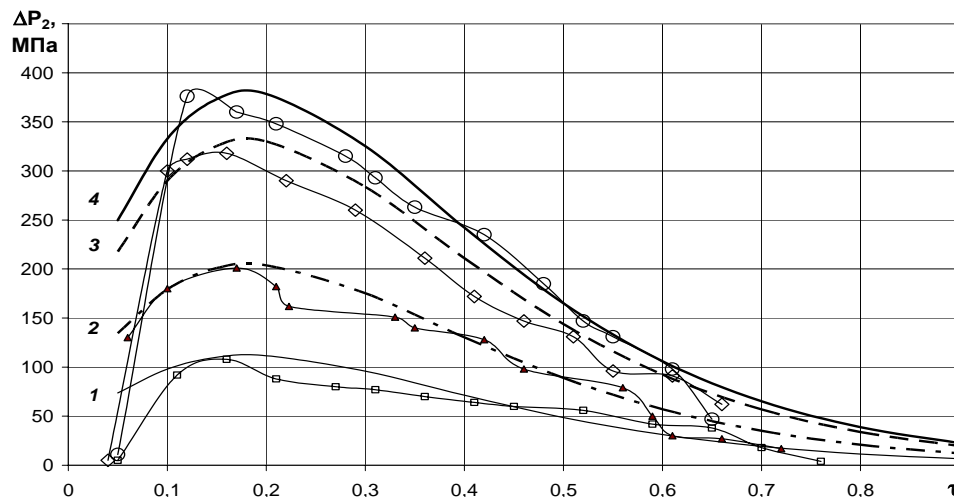


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные зависимости размаха ΔP_2 автоколебаний давления от параметра кавитации τ : Расчетные данные: 1 – $P_1 = 5$ МПа; 2 – $P_1 = 10$ МПа; 3 – $P_1 = 20$ МПа; 4 – $P_1 = 30$ МПа; Экспериментальные данные: \square – $P_1 = 5$ МПа; Δ – $P_1 = 10$ МПа; \diamond – $P_1 = 20$ МПа; O – $P_1 = 30$ МПа

раскрытия диффузора $\beta = 20^\circ$ и $d_{кр} = 4$ мм и значениях коэффициентов $a_0 = 221,2$; $a_1 = 0,07$; $a_2 = 1,9$; $a_3 = -7,5$.

Предложенная формула дает качественное согласование экспериментальных и расчетных значений разма-

ха колебаний давления. Однако расчетные максимальные значения размаха кавитационных колебаний существенно превышают экспериментальные значения с увеличением давления на входе P_1 . Как было установлено, с увеличением давления на входе в ге-

нератор P_1 максимальные относительные значения $\Delta P_2/P_1$ – уменьшаются. Применительно к указанному типу генератора можно принять линейную зависимость максимальных значений ΔP_2 от P_1 . С учетом вышесказанного окончательное выражение для определения размаха кавитационных колебаний получено в виде:

$$\Delta P_2 = \left[a_0(\tau - a_1)^{a_2} \cdot e^{a_3(\tau - a_2)} \right] \times (1 - 0,0016P_1) \cdot P_1 \quad (8)$$

Расчетная зависимость по формуле (8), при следующих значениях коэффициентов: $a_0 = 221,2$; $a_1 = 0,07$; $a_2 = 1,9$; $a_3 = -7,5$, а также экспериментальные данные, представлена на рис. 4. Сравнение расчетных и эксперимен-

тальных зависимостей показывает, что наблюдается удовлетворительная сходимость представленных результатов для диапазона изменения параметра кавитации $0,8 \geq \tau \geq 0,05$ и указывает на возможность использования формулы (10) в инженерных расчетах.

Выводы

Предложенный авторами статьи инженерный метод определения динамических характеристик пульсирующего потока жидкости за генератором кавитационных колебаний давления позволяет определить энергетические характеристики дискретно-импульсного нагнетания жидкости в угольный массив и оценить эффективность такого нагнетания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, склонных к внезапным выбросам угля, породы и газа.* – М., «Недра», 1993, – 192 с.
2. *Жулай Ю.А., Васильев Л.М., Трохимец Н.Я., Зберовский В.В., Моисеенко П.Ю.* Интенсификация газовыделения из угольного массива нагнетанием в него жидкости с применением генератора кавитации // Горный инф.-аналит. бюл.: тем. приложение «Метан». – М., ММГУ, 2007. – С.251-259.
3. *Пилипенко В.В., Задонцев В.А., Манько И.К., Жулай Ю.А., Дзоз Н.А.* Способ получения импульсов давления жидкости и устройство для его осуществления. – А.с. 1248108 (СССР), 1986.
4. *Васильев Л.М., Зберовский В.В., Жулай Ю.А., Моисеенко П.Ю.* Механизм разрушения угольных пластов гидроимпульсным воздействием через шпур или скважины // Материалы XVII Междунар. науч. школы им.Христиановича «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках». – Симферополь. ТАУ, 2007. – С.73-77.
5. *Пилипенко В.В.* К определению частот колебаний давления, создаваемых кавитационным генератором. – В кн. Динамика насосных систем. Сб. науч.тр. – Киев: Наук. думка, 1980. – С.127-131.
6. *Пилипенко В.В.* К определению амплитуд колебаний давления, создаваемых кавитационным генератором. – В кн. Математические модели рабочих процессов в гидropневмосистемах. Сб.науч.тр. – Киев: Наук. думка, 1981. – С.18-24. **УДБ**

Коротко об авторах

Васильев Л.М. – доктор техн. наук, ИГТМ НАН Украины,
Дзоз Н.А. – доктор техн. наук, ЕНПК «Евроколор», Украина,
Жулай Ю.А. – канд. тех. Наук, ИТСТ НАН Украины,
Моисеенко П.Ю. – инженер, ОАО "Краснодонуголь", Украина.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 4 симпозиума «Неделя горняка-2008». Рецензент д-р техн. наук, проф. *С.В. Сластунов.*