



**Л. М. ВАСИЛЬЕВ,**  
доктор техн. наук



**В. В. ЗБЕРОВСКИЙ,**  
канд. техн. наук

*Представлены результаты лабораторных исследований параметров генераторов упругих колебаний на модели скважины и горно-экспериментальных работ по гидроимпульсному воздействию на выбросоопасные угольные пласты при проведении выработок комбайнами в условиях шахт ПАО «Краснодонуголь».*

Разработка выбросоопасных угольных пластов неразрывно связана с решением сложных геомеханических задач, направленных на предотвращение газодинамических явлений (ГДЯ). В практике ведения горных работ для решения данной проблемы используется ряд способов и средств воздействия на выбросоопасные угольные пласты [1]. Однако, несмотря на их применение, выбросы угля и газа, в том числе с катастрофическими последствиями, по-прежнему доминируют.

В условиях больших глубин углепородный массив находится в запредельном квазистатическом состоянии. Фильтрация газа и жидкости

в нем практически отсутствует. Поэтому применение в забоях подготовительных выработок нормативных способов гидрорыхления и гидроотжима краевой части пласта не всегда дает желаемые результаты.

Как показала практика, если фильтрационная камера расположена в разгруженной зоне, нагнетаемая жидкость фильтруется по трещинам в выработанное пространство, что не позволяет создать рабочее давление нагнетания и сформировать систему трещин для дегазации пласта, если находится в зоне с повышенным горным давлением, то из-за низкой водопроницаемости угля бывают случаи спонтанного прорыва воды по одному из прослоев или преждевременного гидроотжима с угрозой провоцирования газодинамического явления. Исходя из этого, в условиях неразгруженных угольных пластов единственным безопасным способом проведения выработок остается применение буровзрывных работ в режиме сотрясательного взрывания. Однако при провоцировании взрывными работами выбросов угля, породы и газа скорость проведения выработок снижается более чем в 2 раза, при этом в забое появляется дополнительный источник воспламенения метановоздушной смеси.

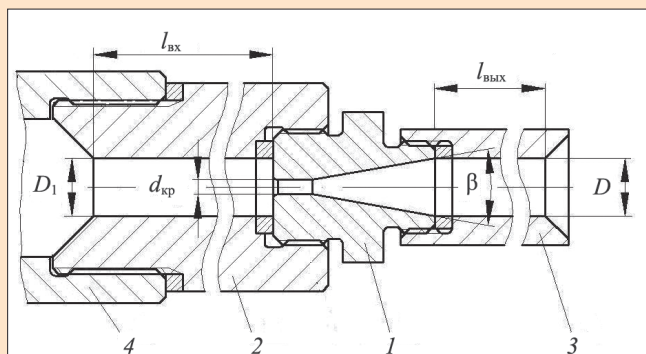
Эффективное решение указанной проблемы стало возможно после ряда экспериментальных исследований импульсного нагнетания жидкости. Наиболее значимые результаты в этом направлении получены в ИГТМ НАН Украины при разработке способов и средств гидроимпульсного воздействия, основанного

на явлении периодически срывной кавитации в потоке жидкости. Для увлажнения угольных пластов в целях пылеподавления учеными института были созданы насосные установки УНР, УНИ и генератор импульсов давления. В настоящее время на базе этого оборудования ведется разработка способа гидроимпульсного рыхления выбросоопасных угольных пластов при проведении выработок комбайнами.

Отличительная особенность гидроимпульсного воздействия – расположение импульсного устройства [2] непосредственно в фильтрационной части шпура или скважины. Устройство, состоящее из генератора упругих колебаний (ГК) 1 с входным прочным каналом 2 и последиффузорным каналом 3, устанавливается в герметизаторе скважины 4 (рис. 1).

Жидкость, протекая через генератор упругих колебаний, установленный в наконечнике герметизатора, приобретает высоконапорный кавитационный характер течения. При этом генератор, преобразуя стационарный поток в пульсирующий, стабилизирует расход жидкости. В пространстве, окружающем скважину, на поверхности трещин и дефектов угля высоконапорные кавитационные автоколебания проявляются в виде высокочастотной гидроимпульсной вибрации, что приводит к снижению сил контактного и внутреннего трения, концентрации и росту эффективных касательных напряжений, вызывающих интенсивное трещинообразование в массиве.

В результате нарушается равновесие сил внутреннего и внешнего



**Рис. 1.** Схема устройства гидроимпульсного воздействия:  $D_1, l_{вх}$  – диаметр и длина входного проточного канала;  $d_{кр}$  – критическое сечение;  $\beta$  – угол раскрытия диффузора;  $D, l_{вых}$  – диаметр и длина последидиффузорного проточного канала.

трения горных пород и, как следствие, вертикальной и горизонтальной составляющих сил горного давления. Под воздействием высокочастотной гидроимпульсной вибрации по разнонаклонно растущим трещинам жидкость продавливается в глубину массива, смачивает поверхность угля и блокирует в его микродефектах сорбированный газ. Свободный и генерируемый на острие растущей трещины газ выдавливается из массива в направлениях к краевой части пласта и к смежным скважинам.

Однако для практической реализации режима кавитационного течения жидкости в фильтрационной части шпура или скважины потребовалось:

- теоретически исследовать нестационарное кавитационное течение жидкости в трубке Вентури для генераторов импульсов давления [3];
- изучить геометрические и гидродинамические параметры ГК, изготовить опытные образцы и определить их параметры при автономном испытании;
- разработать и испытать устройство гидроимпульсного воздействия (УГИВ) в имитаторе скважины;
- провести горно-экспериментальные работы в забоях подготовительных выработок;
- сопоставить результаты исследований гидроимпульсного воздействия с нормативным способом гидрорыхления угольных пластов и оценить его эффективность.

В качестве исходных данных для обоснования параметров и разработки УГИВ приняты параметры серийно изготавливаемых и используемых на шахтах насосных установок, учтены горно-геологические и горнотехнические условия, а также физико-механические свойства угольных пластов.

Основные условия для обоснования исходных данных следующие:

по параметрам насосных установок – давление подачи жидкости на вход генератора  $5 \text{ МПа} \leq P_0 \leq 30 \text{ МПа}$ ; расход жидкости  $Q = 40 \dots 90 \text{ л/мин}$ ;

по горно-геологическим условиям и свойствам угля – давление газа в пласте (давления подпора)  $P_1 = 1 \dots 12 \text{ МПа}$ ; сопротивление угля на сдвиг  $k = 2 \dots 6 \text{ МПа}$ ; глубина герметизации скважины – не менее 3,5 м;

по параметрам генератора – угол раскрытия диффузора  $\beta = 25 \dots 45^\circ$ ; диаметр критического сечения  $d_{кр} = 1,7 \dots 3 \text{ мм}$ ; диаметр входного канала  $d_{вх} \geq 10d_{кр}$ ; рабочий диапазон по параметру кавитации  $\tau = P_1/P_0$  от 0,015 до 0,8.

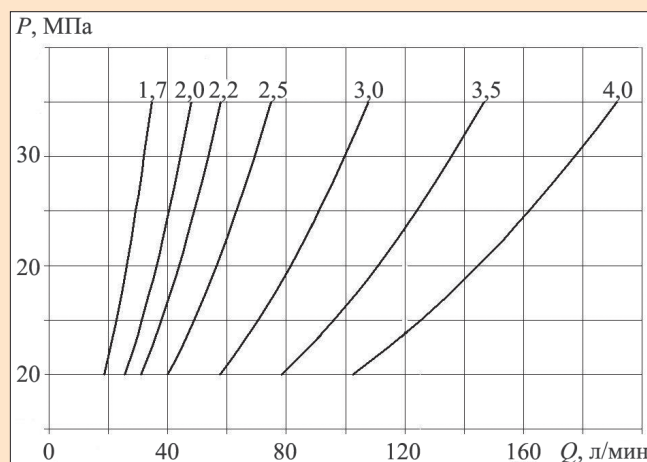
Тип генератора и его соответствие принятым условиям определяются по номограмме (рис. 2).

Для проведения лабораторных исследований опытных образцов генераторов имитатор скважины гидравлического стенда был оборудован манометрами для контроля давления жидкости на входе генератора  $P_0$  и выходе из имитатора скважины  $P_1$  индуктивными датчиками давления ДДИ-20 и подпорным дросселем.

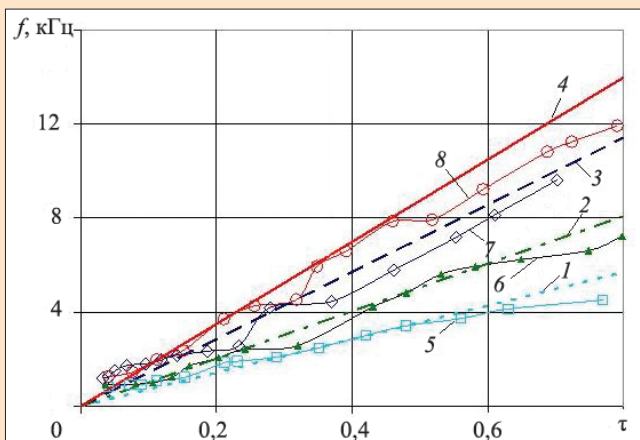
Генераторы изучали под давлением 5, 10, 20, 30 МПа. При постоянном давлении  $P_0$  подпорным дросселем на выходе модели скважины менялось давление  $P_1$  с интервалом от 0,025 до  $0,1P_0$ . На каждом установленном режиме делались замеры динамических параметров, которые регистрировались ПЭВМ. Время регистрации составляло 10 – 15 с.

На рис. 3 и 4 показаны теоретические и экспериментальные зависимости, установленные для генератора с  $d_{кр} = 2,5 \text{ мм}$  и углом раскрытия диффузора  $\beta = 20^\circ$ . Теоретические зависимости определены условиями модели [3], а экспериментальные – стендовыми испытаниями.

Анализ теоретических и экспериментальных зависимостей свидетельствует, что удовлетворительно не только качественное, но и количественное согласование расчетных и экспериментальных данных. При установившемся давлении  $P_0$  на входе генератора 5; 10; 20; 30 МПа в диапазоне параметра кавитации  $0,02 \leq \tau \leq 0,8$  на выхо-



**Рис. 2.** Номограмма соответствия критического сечения генератора упругих колебаний расходу и давлению жидкости: 1,7, ..., 4,0 – диаметры критического сечения генератора, мм.



**Рис. 3.** Зависимости частоты колебаний  $f$  от параметра кавитации  $\tau$  при давлении  $P_0$ : 1, 2, 3 и 4 – расчетные, равные 5, 10, 20 и 30 МПа; 5, 6, 7 и 8 – экспериментальные, равные 5, 10, 20 и 30 МПа.

де из устройства наблюдаются устойчивые колебания давления жидкости, обусловленные схлопыванием кавитационных каверн. При значениях  $\tau$ , близких к 0,9, явление кавитации прекращается.

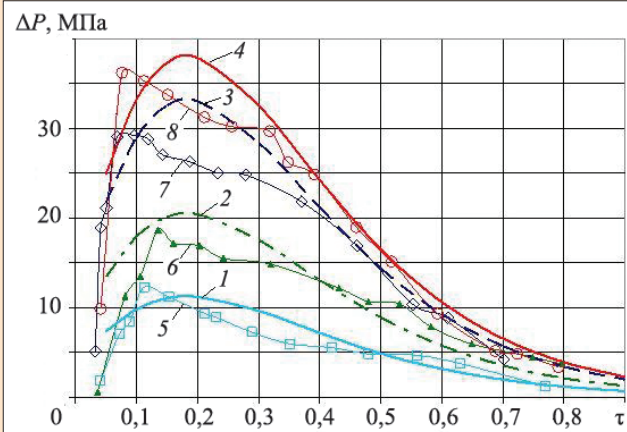
Частотный диапазон существования кавитационных автоколебаний (см. рис. 3) возрастает с увеличением давления на входе в генератор. Например, при параметре кавитации 0,212 рост давления  $P_0$  нагнетания от 5 до 30 МПа увеличивает частоту более чем в 2 раза, т. е. с 1800 до 3700 Гц. При постоянном давлении на входе  $P_0$  частота колебаний с ростом параметра кавитации повышается практически по линейному закону и описывается эмпириоаналитической зависимостью

$$f = 0,18(v_{с.кр}/d_{кр})\tau, \quad (1)$$

где  $v_{с.кр}$  – скорость течения жидкости в критическом сечении генератора.

При давлении нагнетания 5 МПа диапазон существования кавитационных автоколебаний находится в пределах от 810 до 4500 Гц; при  $P_0 = 10$  МПа – от 900 до 7200 Гц; при  $P_0 = 20$  МПа – от 1200 до 9600 Гц; при  $P_0 = 30$  МПа от 1250 до 11900 Гц. Таким образом, исходя из частотных характеристик, при давлении на входе в устройство 5 – 30 МПа диапазон работоспособности генератора по параметру кавитации от 0,02 до 0,80 составляет 0,8 – 12 кГц, что соответствует условию развития трещины, пересекающей пласт по мощности в зоне фильтрации под разными углами относительно оси скважины.

Из зависимостей размаха  $\Delta P_1$  колебаний давления на выходе из генератора от параметра кавитации  $\tau$  для различных давлений  $P_0$  на входе (см. рис. 4) видно, что при всех значениях давления  $P_0$  размах  $\Delta P_1$  с ростом значения параметра  $\tau$  резко повышается, достигает максимума при определенном значении  $\tau$  и в дальнейшем умень-



**Рис. 4.** Зависимости размаха автоколебаний давления  $\Delta P_1$  от параметра кавитации  $\tau$  при давлении  $P_0$ : 1, 2, 3 и 4 – расчетные, равные 5, 10, 20 и 30 МПа; 5, 6, 7 и 8 – экспериментальные, равные 5, 10, 20 и 30 МПа.

шается. Зависимости  $\Delta P_1 = f(\tau)$  для разных давлений питания  $P_0$  имеют максимум в диапазоне значений параметра  $\tau$  от 0,07 до 0,15. При увеличении давления  $P_0$  максимум значений  $\Delta P_1$  смещается в сторону меньших значений параметра кавитации  $\tau$ . Максимальный размах  $\Delta P_1$  превышает давление питания  $P_0$  примерно от 1,2 до 2,4 раза. При этом заметна тенденция: если давление на входе в генератор  $P_0$  увеличивается, отношение  $\Delta P_1/P_1$  уменьшается. Исследование размаха автоколебаний давления жидкости и сопоставление расчетных и экспериментальных данных позволили получить следующее эмпириоаналитическое решение:

$$\Delta P_1 = [a_0(\tau - a_1)^{a_2} \cdot e^{a_3(\tau - a_2)}](1 - a_4\bar{P}_0)P_0, \quad (2)$$

где  $\bar{P}_0 = P_0/P_a$  – относительное давление;

$P_a$  – атмосферное давление;

$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$  – эмпирические коэффициенты.

Значения частоты и размаха автоколебаний давления жидкости, установленные по формулам (1) и (2), и значений, полученных экспериментальным путем, подтверждает удовлетворительное согласование данных, которые характеризуются коэффициентом корреляции от 0,7 до 0,85 при доверительной оценке вероятности не ниже 0,95. Это доказывает возможность применения формул в инженерных расчетах по определению значений ожидаемых параметров, частоты и размаха автоколебаний от параметра кавитации.

Таким образом, лабораторные исследования опытных образцов генераторов упругих колебаний на модели скважины показали, что режим периодически срывной кавитации при давлении на входе генератора от 5 до 30 МПа и расходе жидкости 40 – 60 л/мин в рабочем диапазоне параметра кавитации  $\tau = 0,02 \dots 0,8$  обеспечивает частоту автоколебаний до 12 кГц.



Результаты лабораторных исследований устройства для гидроимпульсного воздействия позволили принять решение о проведении горно-экспериментальных работ.

Проверка технических средств, контроль и оценка эффективности гидроимпульсного воздействия выполнены в забоях подготовительных выработок (при проведении комбайнами) шахт «Дуванная», «Суходольская-Восточная» и «Молодогвардейская» (ПАО «Краснодонуголь»). Для выполнения горно-экспериментальных исследований в соответствии с Правилами [1] в установленном порядке была разработана и согласована (решение бюро Центральной комиссии по вопросам вентиляции, дегазации и борьбы с ГДЯ на угольных шахтах Украины) методика проведения горно-экспериментальных работ. Работы проводились по нормативной технологической схеме гидрорыхления первоначально в статическом режиме, а затем в режиме периодически срывной кавитации. Контроль и оценка эффективности осуществлялись нормативными способами – по начальной скорости газовыделения из контрольных шпуров и по акустическому сигналу с помощью аппаратуры АПСС-1. Среднестатистические данные результатов исследований основных параметров гидрорыхления угольных пластов приведены в таблице.

| Показатели                                            | Режим нагнетания min/max |            |
|-------------------------------------------------------|--------------------------|------------|
|                                                       | статический              | импульсный |
| Давление нагнетания жидкости, МПа                     | 10/27                    | 10/23      |
| Объем жидкости, закачанной в скважину, м <sup>3</sup> | 1,08/4,3                 | 0,3/1,2    |
| Время нагнетания жидкости в скважину, мин             | 18/92                    | 9/33       |
| Безопасная зона разгрузки, м                          | 4                        | 6          |

**Выводы.** Импульсное нагнетание жидкости в режиме периодически срывной кавитации в целях предотвращения внезапных выбросов угля и газа позволяет снизить продолжительность гидрорыхления угольных пластов более чем в 2 раза, а расход жидкости – в 3 раза.

Разработанное устройство гидроимпульсного воздействия удовлетворяет условиям применения технических

средств, используемых для гидрорыхления угольных пластов, и обеспечивает темп нагнетания жидкости от 40 до 60 л/мин под давлением от 10 до 23 МПа.

Нормативными способами контроля и оценки эффективности установлено, что при гидроимпульсном воздействии зона разгрузки впереди забоя выработки увеличивается в 1,5 – 1,7 раза по сравнению со статическим гидрорыхлением. Скорость газовыделения из контрольных шпуров, пробуренных по ходу и в бока выработки, на глубине 3 м характеризуется показанием «следы».

Рабочий режим кавитационного генератора в диапазоне параметра кавитации  $0,02 \leq \tau \leq 0,8$  с частотой от 0,8 до 12 кГц и размахом автоколебаний от 1,4 до 1,8 давления нагнетания жидкости обеспечивает гидрорыхление угольных пластов без признаков проявления спонтанного гидроотжима или гидроразрыва по площади сечения пласта в забое выработки.

Гидроимпульсное воздействие дает возможность путем регулирования давления жидкости, подаваемой на вход устройства, в соответствии с физико-механическими свойствами угля, горно-геологическими и горнотехническими условиями управлять интенсивностью разрушения (трещинообразования) пласта в прискважинной зоне. При этом изменение фильтрационных свойств угля в зависимости от горного давления и водопроницаемости пласта, т. е. давления подпора, будет влиять на частоту и размах автоколебаний в кавитационном потоке жидкости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Правила ведения горных работ на пластах склонных к газодинамическим явлениям: СОУ 10.1.00174088.011–2005. – К.: Минуглепром Украины, 2005. – 224 с.
2. Пат. 87038 Україна, МПК E21F 5/02. Пристрій для гідроімпульсного впливу на вугільний пласт / Л. М. Васильєв, Ю. О. Жулай, В. В. Зберовський, М. Я. Трохимець (Україна); заявник і патентовласник ІГТМ НАН України. – № u 2007 10209; заявл. 13.09.07; пріоритет від 10.06.09; опубл. 10.06.09, Бюл. № 11.
3. Пилипенко В. В. Кавитационные автоколебания / В. В. Пилипенко. – К.: Наукова думка, 1989. – 316 с.