

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАВИТАЦИОННОГО ГЕНЕРАТОРА И ОЦЕНКА ИХ СООТВЕТСТВИЯ ПАРАМЕТРАМ ВЫБРОСООПАСНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

В работе приведены результаты экспериментального определения динамических характеристик кавитационного генератора и их сравнение с расчетными зависимостями при разных значениях давлений нагнетания и подпора. Определено соответствие режимов гидроимпульсного воздействия параметрам выбросоопасных угольных пластов.

В роботі наведені результати експериментального визначення динамічних характеристик кавітаційного генератора і їхнє порівняння з розрахунковими залежностями при різних значеннях тисків нагнітання й підпора. Визначено відповідність режимів гідроімпульсного впливу параметрам викидонебезпечних вугільних пластів.

The results of experimental definition of dynamic characteristics of the cavitation generator and their comparison with calculated dependencies at different values of forcing and backup pressures are given in the paper. The compliance of modes of hydropulse influence to the parameters of outburst-prone coal layers is defined.

Единственным принципиальным способом увлажнения угольных пластов, реализованным в широких масштабах на практике, является закачка воды или водных растворов химреактивов (ПАВ или ХАВ) статическим нагнетанием. Статическое нагнетание является нормативным и применяется для предотвращения внезапных выбросов угля и газа [1].

Однако практикой ведения горных работ выявлен ряд существенных недостатков, которые заключаются в следующем: при сложном строении угольного пласта или наличии слоев и пропластков угля с низкими фильтрационными свойствами, непрерывное (статическое) нагнетание воды сопровождается прорывом жидкости в трещины напластования и по ним в забой выработки. Свободная фильтрация жидкости не позволяет закачать необходимое количество жидкости в пласт и провести эффективную гидрообработку по всей его мощности для создания равномерной дегазированной зоны вокруг скважины. В результате в угольном пласте формируются локальные зоны пригрузки, которые при проведении работ по выемке угля являются инициаторами газодинамических явлений. Это приводит к снижению эффективности мероприятий по извлечению метана из угольного пласта и пылеподавлению, особенно при освоении углегазовых месторождений на больших глубинах.

Одним из перспективных направлений, позволяющих исключить эти недостатки, является создание высокоамплитудных гидродинамических волн в скважине за погружным кавитационным генератором, реализующим режим периодически-срывного течения, и передача энергии импульсов угольному массиву, подлежащему гидрорыхлению. Кавитационный генератор (КГ) представляет собою трубку Вентури специальной геометрии с углом раскрытия диффузора $\beta > 15^\circ$ и более.

В последние годы значимые результаты в этом направлении получены Институтом геотехнической механики (ИГТМ) НАН Украины совместно с ПАО

«Краснодонуголь». Авторами работы [2] разработано новое устройство гидроимпульсного воздействия (УГИВ) на угольный пласт. Оно прошло комплекс исследований в лабораторных условиях на модели скважины и опытную проверку в промышленных условиях, которые показали перспективность УГИВ.

Схема расположения УГИВ в скважине забоя подготовительной выработки приведена на рис.1.

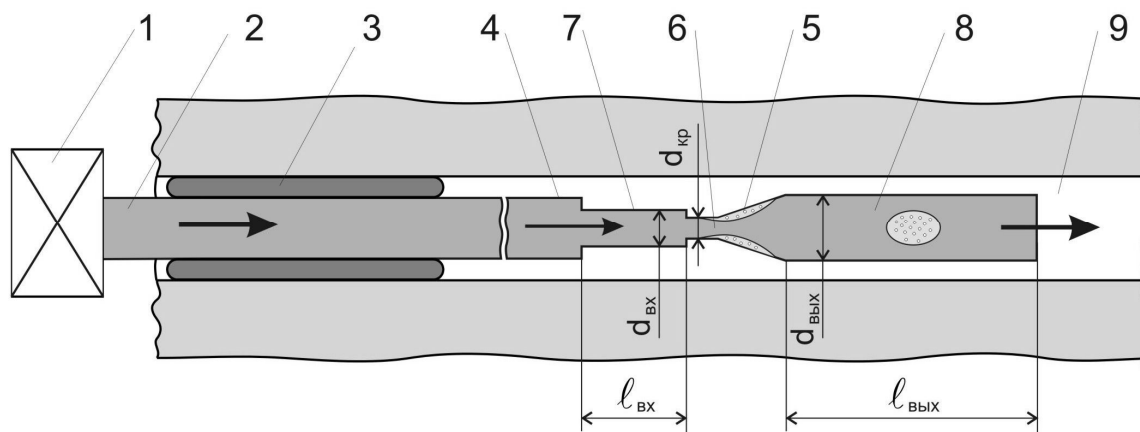


Рис.1. Схема устройства для гидроимпульсного воздействия на угольный пласт: 1 – насосная установка; 2 – напорный трубопровод; 3 – герметизатор; 4 – наконечник герметизатора; 5 – КГ; 6 – критическое сечение генератора; 7,8 – входной и выходной каналы; 9 – скважина

Однако при исследовании такого импульсного воздействия остались не решенными следующие задачи:

- не определен диапазон давления нагнетания жидкости, обеспечивающий развитие трещин, наклонных к напластованию слоев и пропластков, и как следствие, формирование коллекторной зоны в условиях выбросоопасных пластов;
- не исследовано влияние давления подпора на динамические характеристики КГ и не определено их соответствие параметрам выбросоопасных угольных пластов. Под параметрами выбросоопасных угольных пластов здесь понимаются давление газа (давление подпора), которое в среднем составляет 2-6 МПа, а в некоторых случаях достигает 12,0 МПа, и расчетная величина давления нагнетания $P_n \leq 0,75\gamma H$, которая должна обеспечить безопасность ведения горных работ и для глубины шахты $H=1000\text{м}$ составляет 21 МПа;
- не определены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) КГ.

Это определяет **цель работы**: исследование динамических характеристик КГ при разных значениях давлений нагнетания и подпора и определение их соответствия параметрам выбросоопасных угольных пластов.

Основные геометрические размеры КГ (с диаметром критического сечения $d_{кр} = 2,5\text{мм}$, углом раскрытия диффузора $\beta = 20^\circ$ и диаметром диффузора на выходе $D = 10\text{мм}$) определены для реально действующей насосной установки, используемой на практике шахтами Донецкого бассейна.

Схема автономных испытаний кавитационного генератора по определению его динамических параметров приведена на рисунке 2.

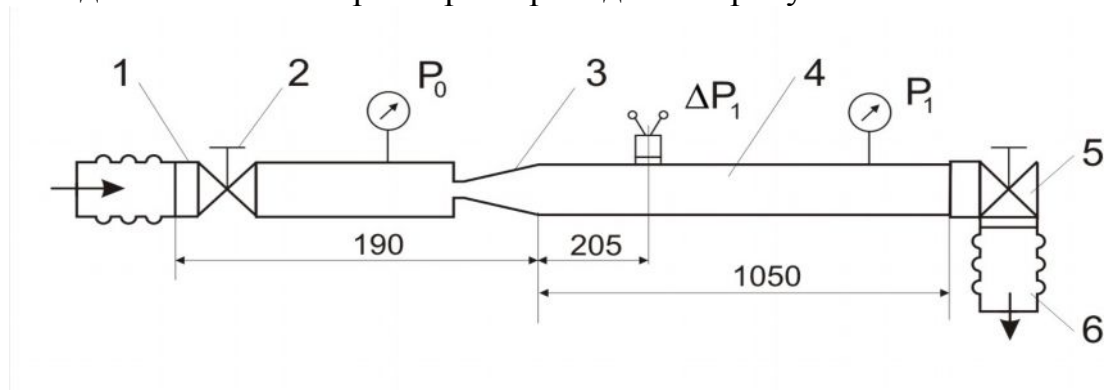


Рис. 2. Схема испытаний КГ: 1 – входной трубопровод с регулируемым дросселем – 2; 3 – КГ; 4 – выходной трубопровод с бобышкой для установки датчика давления и подпорным дросселем – 5; 6 – сливной трубопровод

Исследование зависимостей размаха колебаний давления ΔP_1 и частоты их следования f от давления подпора P_1 и определение АЧХ КГ проводилось следующим образом. При открытых регулируемых дросселях 2 и 5 осуществлялось заполнение системы водою. После чего производился запуск подкачивающего насоса и после появления воды на сливе через 10–30с основного насоса УНР-01[3]. Входным дросселем 2 задавалось установившееся значение давления на входе $P_0 \approx 5, 10; 20; 30$ МПа. При каждом установившемся давлении на входе P_0 выходным дросселем 5 дискретно изменялось давление на выходе P_1 с шагом $\approx 0,1-2$ МПа.

При измерении статических параметров давления использовались манометры со значением приведенной погрешности 0,6 %, которые разрешают получить среднее значение давления в месте установки манометров.

Измерения колебаний давления ΔP_1 и частоты их следования f производилось индуктивным датчиком полного давления типа ДДИ-20, который дает возможность измерять значение давления до $\approx 120,0$ МПа в импульсе. Принцип работы датчика основан на изменении индуктивности катушки в зависимости от прогиба мембраны при воздействии статико-динамического давления. Собственная частота мембраны составляет не меньше 20000 Гц, гистерезис не более 2 %, не линейность тарировочной характеристики в диапазоне от 0 до P_{\max} не более 5 %.

Сигнал от датчика ДДИ-20 через преобразователь ИВП-2 поступает в многоканальную плату ввода аналоговой информации типа L-1250, в которой аналогово-цифровым преобразователем (АЦП-12) превращается в цифровой вид и подается в аппаратно программный комплекс на базе ПЭВМ. Суммарная приведенная погрешность измерений давления датчиком ДДИ-20 с преобразователем ИВП-2 составляет 5,19 %.

Частота пульсаций давления на выходе из КГ определяется из осциллограммы по формуле $f = n \cdot (1/t)$, где n – количество периодов пульсаций, а t – длительность n -периодов пульсаций в секундах.

Размах колебательной величины $\Delta P_1 = \Delta P_{1\max} - \Delta P_{1\min}$ представляет собой разницу между максимальным $P_{1\max}$ и минимальным $P_{1\min}$ значениями давления в импульсе.

В качестве примера на рис. 3 представлена осциллограмма записи величины размаха давления ΔP_1 во времени на выходе из КГ при его испытании с давлением на входе $P_0 = 20$ МПа и значении давления подпора $P_1 = 1,0$ МПа.

Из приведенного рисунка видно, что на выходе из КГ наблюдаются периодические колебания давления P_1 , которые имеют ударный характер с крутым фронтом нарастания и падения давления. При этом колебания давления ΔP_1 не симметричны относительно среднего значения давления P_1 .

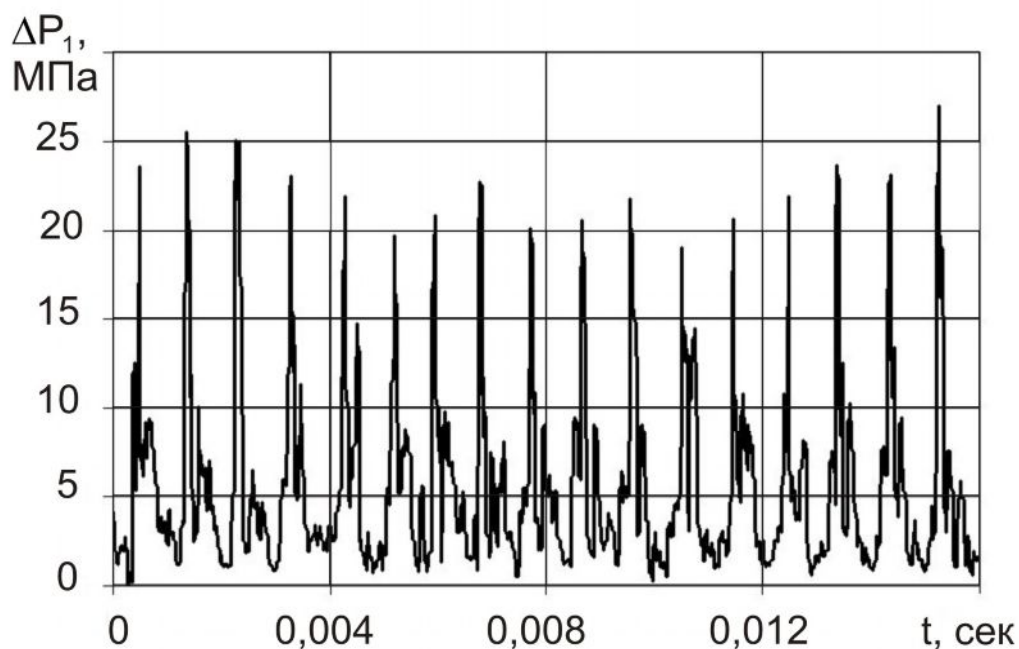


Рис. 3. Фрагмент осциллограммы записи пульсаций давления жидкости во времени: $P_0 = 20$ МПа, $P_1 = 1,0$ МПа ($\Delta P_1 \approx 22$ МПа, $f \approx 1090$ Гц)

Такой вид колебаний в гидродинамике имеет название пульсаций давления и характеризуется частотой и размахом колебательной величины давления. Это говорит о не акустической природе этих колебаний и дает основания утверждать, что наблюдаемые колебания обусловлены возникновением в проточном канале КГ режима периодически-срывной кавитации, который и предопределяет эти колебания. Этот вывод подтверждается тем, что при постоянном давлении на входе P_0 расход жидкости Q остается постоянным в широком диапазоне изменения давления подпора P_1 .

Экспериментальные зависимости частоты f и размаха колебаний давления ΔP_1 от давления подпора P_1 при давлениях нагнетания $P_0 = 5, 10, 20,$ и 30 МПа и расходах через генератор $Q = 29,9; 38,7; 54,7;$ и $67,9$ дм³/мин. соответственно приведены на рис. 4 и 5. На этих же рисунках выделен рабочий диапазон по давлению подпора газа для выбросоопасных угольных пластов.

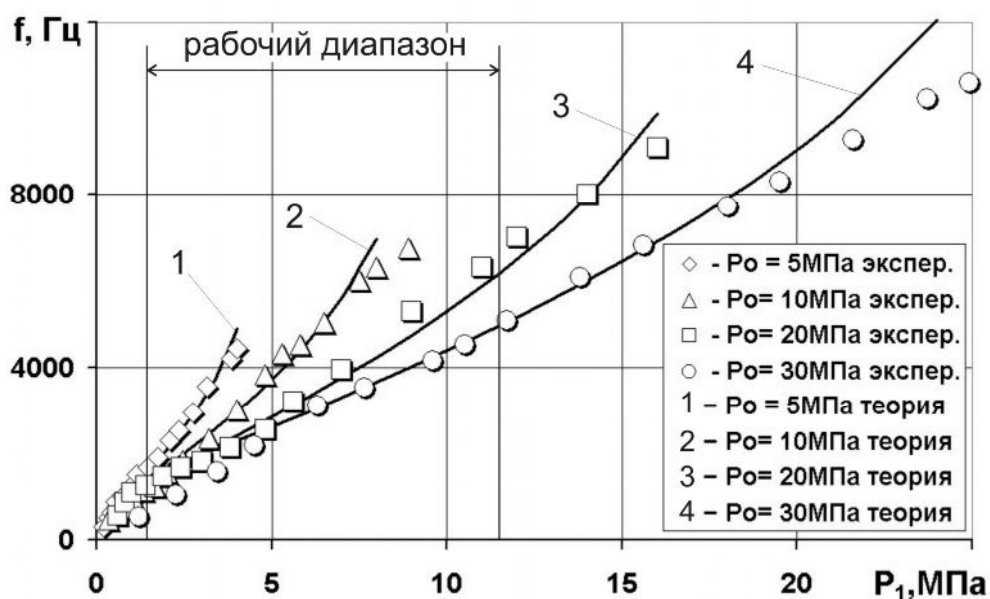


Рис. 4. Совмещенные экспериментальные и теоретические зависимости частоты f от давления подпора P_1 для различных давлений питания P_0

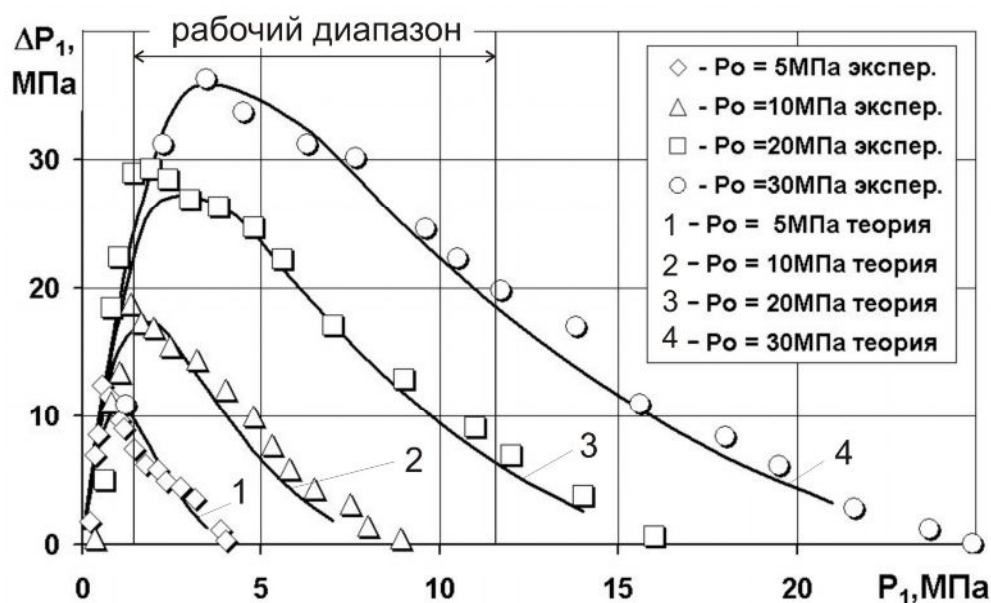


Рис. 5. Совмещенные экспериментальные и теоретические зависимости размаха колебаний давления ΔP_1 от давления подпора P_1 при различных давлении питания P_0

Из рассмотрения рисунков видно, что с ростом давления подпора P_1 частота f растет практически по линейному закону. Характер зависимости размаха колебательной величины ΔP_1 от давления подпора P_1 нелинейный. При фиксированном значении давления подпора P_1 увеличение давления на входе в КГ P_0 приводит к снижению частоты f . Так, при значении давления подпора $P_1 = 5,0$ МПа и с ростом давления нагнетания P_0 от 10,0 до 30,0 МПа частота кавитационных автоколебаний падает с ≈ 4000 до ≈ 2200 Гц. Увеличение давле-

ния на входе P_0 приводит к росту размаха ΔP_1 колебательной величины давления. При давлениях на входе $P_0 = 5, 10, 20,$ и 30 МПа максимальные значения размаха $\Delta P_1 = 12,4; 18,7; 29,3$ и $36,3$ МПа и наблюдаются при давлениях подпора $P_1 \approx 0,6; 1,4; 1,9$ и $3,5$ МПа соответственно. В то же время установлена тенденция снижения относительных значений $\Delta P_1 / P_0$ с увеличением давления нагнетания P_0 , так при $P_0 = 5$ МПа $\Delta P_1 / P_0 = 2,4$, а при $P_0 = 30$ МПа $\Delta P_1 / P_0 = 1,2$.

В процессе экспериментального исследования размаха колебаний давления и частоты следования импульсов в зависимости от режимных параметров работы КГ (давления нагнетания и подпора) были определены его АЧХ, которые потребуются при установлении соответствия режимов импульсного нагнетания жидкости рациональным параметрам гидрорыхления угольных пластов. На рис.6 представлены совмещенные экспериментальные АЧХ КГ при значениях давления нагнетания $P_0 = 5; 10; 20; 30$ МПа с указанным рабочим диапазоном по частоте импульсного воздействия на выбросоопасные угольные пласты.

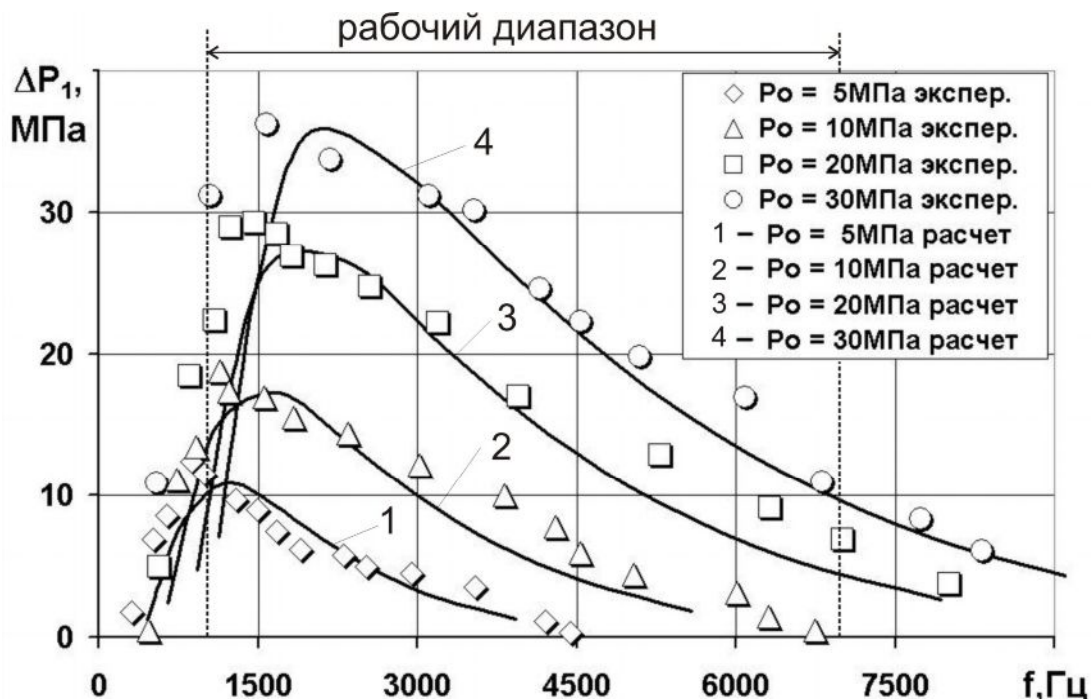


Рис. 6. Расчетные и экспериментальные АЧХ КГ при давлениях на входе $P_0 = 5; 10; 20$ и 30 МПа

Эти зависимости имеют четко выраженный нелинейный характер с максимумом размаха колебаний давления ΔP_1 , существенно превышающим давление на входе в экспериментальный образец кавитационного генератора.

Рассмотрение экспериментальных зависимостей, представленных на рис. 4–6, позволяет обосновать давление жидкости на входе в кавитационный генератор $P_0 = 20$ МПа как обеспечивающее достаточный уровень импульсного нагружения (6–29 МПа, рис. 5) выбросоопасных пластов в диапазоне значений давления подпора $P_1 = 2$ –12 МПа с частотой $f = 1$ –7 кГц (рис. 6) и не превышающее расчетную величину давления нагнетания $P_n \leq 0,75\gamma H$. Напомним, что

расчетная величина давления нагнетания для безопасного ведения горных работ при глубине шахты $H = 1000$ м составляет 21 МПа.

Теоретическое определение размаха колебаний давления и частоты их следования, создаваемых кавитационным генератором, выполним в соответствии с математической моделью, изложенной в работе [4] применительно к зависимости размаха от давления подпора.

Для расчета частот кавитационных колебаний воспользуемся формулой, предложенной в этой работе применительно к зависимости частоты от давления подпора

$$f = \frac{v_{кр} \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}{r_{кр} \sqrt{\mu}} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - P_1/P_0}\right), \quad (1)$$

где $r_{кр}$ – радиус критического сечения генератора;

μ – коэффициента расхода генератора;

отношение P_1 / P_0 – параметр, характеризующий степень развития кавитации и представляющий собой отношение давления подпора, под действием которого происходит захлопывание каверны, к давлению нагнетания, под действием которого каверна возникает и растет.

Скорость жидкости в критическом сечении генератора определяем по известной формуле

$$v_{кр} = \sqrt{2(P_0 - P_к)/\rho}, \quad (2)$$

где ρ – плотность жидкости.

Для расчетов амплитуд высокочастотных кавитационных колебаний давления была получена формула в виде

$$|\delta P_1| = \rho \cdot v_{кр}^2 (2\pi)^2 Sh_M^2 \frac{I_d}{\sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 \cdot v_{с.кр}^2 \cdot I_d^2 \cdot F_2^2}{l_k^2 \cdot c^2}}} \cdot \frac{|\delta V_k|}{l_k^2} \quad (3)$$

где Sh_M – число Струхалия

$$Sh_M = \sqrt{1 - \sqrt{1 - P_1/P_0}} - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \left(1 - \sqrt{1 - P_1/P_0}\right); \quad (4)$$

I_d – коэффициент инерционного сопротивления участка диффузора генератора колебаний, расположенного между новой оседлой каверной и выходом из диффузора, определяются по формуле

$$I_d = \frac{1}{\pi \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}} \cdot \left[\frac{1}{r_{кр} + l_k \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}} - \frac{1}{r_{кр} + l_d \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}} \right]; \quad (5)$$

$r_{кр}$ – радиус критического сечения генератора;

l_d – осевая длина диффузора генератора;

F_2 – площадь выходного сечения диффузора генератора;

δV_k – амплитуды колебаний объема каверны определялись с учетом, что ее объем равен максимальному объему оседлой кавитационной каверны в момент отрыва

$$|\delta \bar{V}_k| = \frac{\pi l_k}{2} \left[3r_{кр}^2 (1 - \mu) + 3r_{кр}^2 l_k \left(\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} - \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) + l_k^2 \left(\operatorname{tg}^2 \frac{\beta}{2} - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \right) \right], \quad l_k \leq l_d, \quad (6)$$

l_k – длина кавитационной полости, определяется по формуле

$$l_k = \frac{r_{\text{сд}}}{\operatorname{tg} \frac{\beta}{2}} \cdot \left(\sqrt{\frac{\mu}{1 - \sqrt{1 - P_1/P_0}}} - 1 \right) \quad (7)$$

α – угол расширения струи жидкости;

F_2 – площадь выходного сечения диффузора генератора.

При решении тестовой задачи формула (3) с учетом выражений (2,4 – 6) дает удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных значений амплитуд колебаний на выходе из генератора с геометрическими и режимными параметрами ($\beta = 20^\circ$, $r_{кр} = 7\text{мм}$, $l_d = 13\text{мм}$, $D = 56\text{мм}$, $\mu = 0,95$ при давлении нагнетания $P_0 = 3,0\text{МПа}$), приведенными в работе [4].

Однако расчеты, выполненные для кавитационного генератора с геометрическими параметрами $\beta = 20^\circ$, $r_{кр} = 1,25\text{мм}$, $l_d = 21,3\text{мм}$, $D = 10\text{мм}$., указали на заметное расхождение теоретических и экспериментальных зависимостей размаха колебаний давления ΔP_1 от давления подпора P_1 , как это видно из рис. 7.

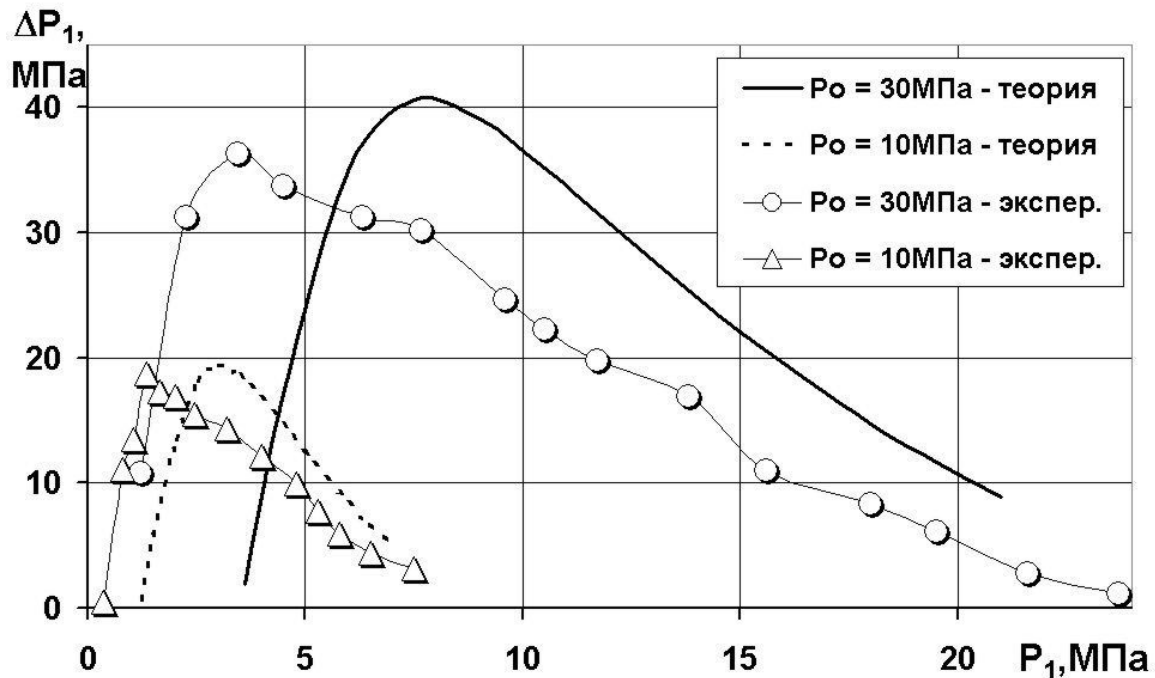


Рис. 7. Расчетные и экспериментальные зависимости размаха колебаний ΔP_1 от давления подпора P_1 при значениях давления нагнетания $P_0 = 10$ и 30МПа

Из сопоставления этих зависимостей видно, что теоретические значения пульсаций по сравнению с экспериментальными данными завышены $\approx 5-20\%$, а их максимальные значения сдвинуты в сторону увеличения давления подпора \approx на 2 МПа для давления нагнетания $P_0 = 10$ МПа и на 5 МПа для $P_0 = 30$ МПа.

Возможно, это связано с тем, что приведенные расчетные формулы были получены на базе анализа экспериментальных исследований колебаний, возбуждаемых генераторами, диаметры критических сечений которых были значительно большими (а, следовательно, и расходы) диаметра исследуемого погружного малорасходного КГ с $d_{кр} = 2,5$ мм. Обстоятельства, которые вызывают расхождения в расчетных и экспериментально полученных зависимостях размаха ΔP_1 от подпора P_1 , были изучены при анализе результатов экспериментального исследования характеристик этого КГ.

Было установлено, что независимо от величины давления подачи жидкости на вход генератора, режим кавитационного течения жидкости в нем возникает при значениях давления подпора P_1 от $0,01P_0$ до $0,015 P_0$ и прекращается при достижении P_1 от $0,85P_0$ до $0,9P_0$. В формулах по определению частоты следования импульсов (1), длины кавитационной полости (7) и модифицированного числа Струхаля (4) входит подкоренное выражение $\sqrt{1 - P_1/P_0}$, т.е. считается, что кавитационный режим течения жидкости прекращается при достижении граничного значения $P_1 / P_0 = 1$ ($P_0 = P_1$), когда течение жидкости отсутствует. Снижение граничного значения P_1 / P_0 обусловлено потерями полного давления при внезапном расширении потока жидкости за кавитационной камерой и потерями по длине трубопровода.

Как показали автономные испытания генератора, кавитационно-срывное течение жидкости за ним прекращается при $P_1/P_0 \approx 0,88$. Следовательно, в расчетах подкоренное выражение $\sqrt{1 - P_1/P_0}$ следует поменять на выражение $\sqrt{0,88 - P_1/P_0}$. Исходя из вышеизложенного, выражения для определения частоты, длины кавитационной полости и модифицированного числа Струхаля приобретают вид:

$$f = \frac{v_{кр} \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}{r_{кр} \sqrt{\mu}} \cdot \left(1 - \sqrt{0,88 - P_1/P_0}\right), \quad (8)$$

$$l_k = \frac{r_{кр}}{\operatorname{tg} \frac{\beta}{2}} \cdot \left(\sqrt{\frac{\mu}{1 - \sqrt{0,88 - P_1/P_0}}} - 1 \right), \quad (9)$$

$$\operatorname{Sh}_m = \sqrt{1 - \sqrt{0,88 - P_1/P_0}} - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \left(1 - \sqrt{0,88 - P_1/P_0}\right) \quad (10)$$

Использование в расчетах зависимостей (8 – 10) при определении размаха кавитационных автоколебаний давления (3) и их частоты от давления подпора и теоретических АЧХ позволило получить удовлетворительное согласование с экспериментальными данными, как показано рис.4 – 6 настоящей работы.

Из сопоставления экспериментальных и теоретических АЧХ следует (рис.6), что как по результатам испытаний, так и по расчетам получены АЧХ с четко выраженным нелинейным характером зависимостей размаха колебаний давления жидкости ΔP_1 от частоты их следования f . Максимумы размаха колебаний давления ΔP_{1max} от $\approx 2,5 P_0$, до $\approx 1,2P_0$ наблюдаются в частотном диапазоне $f \approx 800 - 1600$ Гц и смещаются вправо по частоте с ростом давления на входе.

Выполненное исследование динамических характеристик малорасходного КГ с выбранными геометрическими размерами проточного канала позволяют сформулировать следующие **выводы**:

– обосновано давление жидкости на входе в кавитационный генератор $P_0 = 20$ МПа, как обеспечивающее достаточный уровень импульсного нагружения от 6 до 29 МПа выбросоопасных пластов в диапазоне значений давления газа $P_1 = 2-12$ МПа и частоты $f = 1-7$ кГц. Давление нагнетания не превышает расчетную величину $P_n \leq 0,75\gamma H$, которая должна обеспечить безопасность ведения горных работ и для $H=1000$ м составляет 21 МПа;

– установлено, что амплитудно-частотные характеристики КГ имеют нелинейный характер с четко выраженным резонансом. Максимум размаха колебаний давления ΔP_1 , $\approx 1,2-2,5$ раза превышает давление на входе в КГ. Резонансные значения размаха колебаний давления ΔP_1 смещаются вправо по частоте с ростом давления на входе;

– несмотря на сложную гидродинамическую картину течения в проточной части КГ и трудности ее математического описания, получено удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных. Это позволит в дальнейшем значительно сократить объем экспериментальных исследований по определению динамических характеристик погружных малорасходных кавитационных генераторов для обеспечения повышения эффективности предварительного увлажнения угольных пластов и борьбы с вредными явлениями в шахтах.

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. Пат. 87038 Украина, МКИ E21F 5/02. Устройство для гидроимпульсного воздействия на угольный пласт/ Л.М. Васильев, Ю.А. Жулай, В.В. Зберовський, П.Ю. Моисеенко, Н.Я. Трохимец; заявитель и патентообладатель ИГТМ НАН Украины. – № а 2007 10209/9822; заявл.13.09.07; опубл.10.06.09, Бюл. № 11.
3. Зберовський В.В. Стендовая установка для моделирования работы кавитационного генератора в скважине. / В.В. Зберовський В, Ю.А. Жулай, А.А. Ангеловский, И.Ф.Чугунков // Геотехническая механика. Сб. науч. трудов ИГТМ НАН Украины. Днепропетровск. Вып. № 82, 2009. – С. 190-198.
4. Пилипенко В.В. Кавитационные автоколебания: монография / В.В. Пилипенко. – К: Наук. думка, 1989. – 316 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Кузьменком О.М.
Надійшла до редакції 07.05.2012*