

В.В. Зберовский, ст.науч.сотр.  
(ИГТМ НАН Украины),

Ю.А. Жулай, вед. науч. сотр.  
(ИТСТ НАН Украины),

А.А. Ангеловский, И.Ф. Чугунков, инж.  
(ОАО «Краснодонуголь»)

## **СТЕНДОВАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ КАВИТАЦИОННОГО ГЕНЕРАТОРА В СКВАЖИНЕ**

У роботі дано опис стенової установки для моделювання та дослідження конструктивних і гідродинамічних параметрів кавітаційного генератора в свердловині.

## **THE BENCH PLANT FOR MODELING OF CAVITATION GENERATOR IN MINING HOLE**

In this work was given the description of the bench plant for modeling and researching of structural and hydrodynamic parameters of cavitation generator in a mining hole.

Исследование параметров высоконапорного нагнетания жидкости через шпурь или скважины при проведении профилактических мероприятий по предотвращению газодинамических явлений (ГДЯ) в забоях подготовительных выработках является сложной горно-экспериментальной задачей. Параметры нагнетания определяются падением давления и объемом закачанной в пласт жидкости, а напряженное состояние и зона разгрузки массива – параметрами сейсмоакустического сигнала и глубиной герметизации скважин.

Однако, применение технических средств, обеспечивающих высоконапорное нагнетание жидкости в статическом режиме, не исключает вероятность проявления гидроразрыва и гидроотжима краевой части пласта с провоцированием ГДЯ. При этом прорыв жидкости в забой выработки по напластованию пласта приводит к резкому падению давления и невозможности оценить эффективность нагнетания.

Как показали горно-экспериментальные исследования гидроимпульсного воздействия, его применение позволяет устранить вышеотмеченные недостатки, однако для оценки и контроля эффективности этого способа используются параметры гидрорыхления, которые не в полной мере соответствуют параметрам импульсного нагнетания.

Учитывая, что методики контроля гидроимпульсного воздействия по акустическому сигналу в настоящее время еще не разработаны, для исследования импульсного нагнетания создана стендовая установка, которая представляет собой замкнутую систему и включает в себя: емкость для жидкости; систему насосов и трубу, имитирующую скважину; регулирующую и регистрирующую аппаратуру (рис. 1).

Стенд представляет собой замкнутую систему и включает следующие основные узлы: 1 – открытая емкость объемом 8 м<sup>3</sup>; 2 – подпиточный насос; 4 – входной трубопровод; 5-7 – три насоса высокого давления; 9 – объект испы-

тания; 10 – вентиль запорный; 11 – фильтр; 12 – расходомер жидкости; 13 – регулируемые дроссели для задания давлений на входе и выходе испытуемого объекта; 14 – трубопровод слива; 15 – электрический щит; 16 – трубопровод.

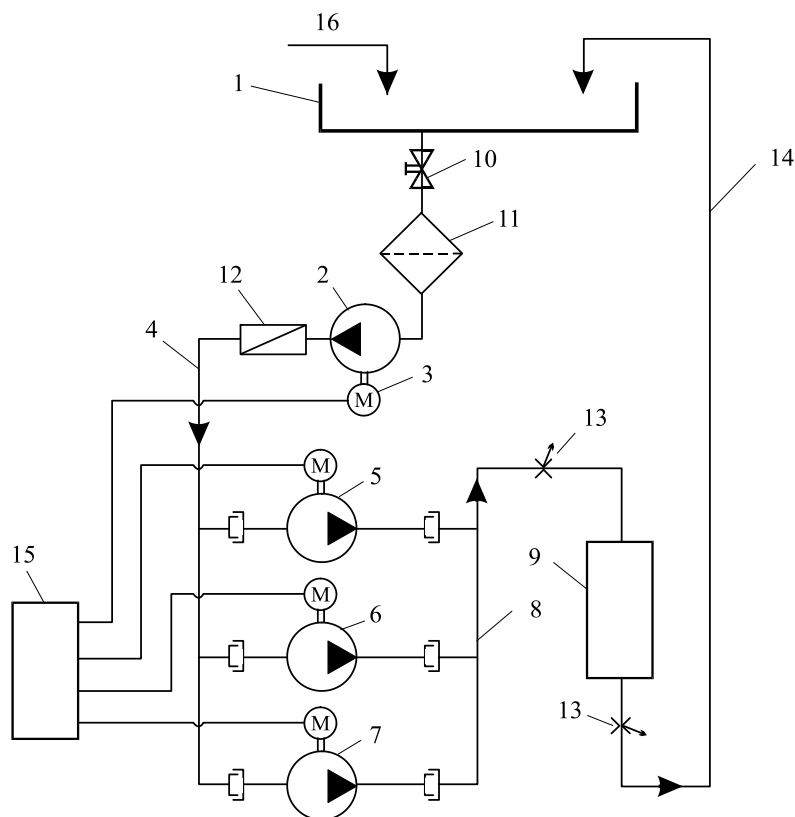


Рис. 1 – Структурная схема гидравлического стенда

К стендовой установке подключена система датчиков давления и визуальная аппаратура, регистрирующая расход и рабочее давление жидкости с подачей сигналов через усилитель на персональный компьютер. Вдоль насосов расположен входной коллектор 4, который имеет ниппельное соединение с входным патрубком каждого насоса. Выходные патрубки насосов параллельно подключены к напорному трубопроводу 8, который выходит на участок объекта испытания. Емкость для жидкости 1 расположена на специальном каркасе на высоте 1,5 м от пола. Емкость с помощью вентиль 10 через фильтр 11 соединена с входом подпиточного насоса ( $Q = 160$  л/мин,  $P_n = 7,0$  МПа), обеспечивающим бесперебойное функционирование насосной установки. Электропитание системы осуществляется от распределительного щита 15. Для обеспечения необходимого расхода воды через испытуемый объект пульта управления насосами позволяет включать от одной до трех насосных установок одновременно.

Исходя из технических средств и серийного оборудования используемого на шахтах, а так же горно-геологических условий залегания и свойств выбросоопасных угольных пластов установка для стендовых испытаний обеспечивает моделирование условий работы кавитационного генератора в скважине и

достоверность инструментальных измерений его характеристик.

Гидродинамическая система стенда позволяет при расходе жидкости от 30 л/мин до 120 л/мин поддерживать давление на входе в кавитационный генератор до 32 МПа и плавно регулировать давление подпора в диапазоне от 0,05 до 0,9 значения давления подачи жидкости. При работе стенда предусмотрены различные варианты расположения кавитационного генератора в модели скважины (рис. 2).

Модель скважины (имитатор скважины) включает в себя входной гидравлический канал 1, соединенный посредством ниппельного соединения с гибким шлангом высокого давления стенда, кавитационный генератор 2, переходник 3, трубопровод-имитатор скважины 4, на выходе из которого установлен подпорный дроссель 5, соединенный со сливным трубопроводом стенда 6. Технологические возможности стенда позволяют проводить испытания как автономного генератора (рис. 3.2, а), так и с его расположением до трубопровода-имитатора скважины без переходника 3 (рис. 3.2, б) и с ним (рис. 3.2, в), а также с погружением устройства непосредственно в трубопровод-имитатор (рис. 3.2, г).

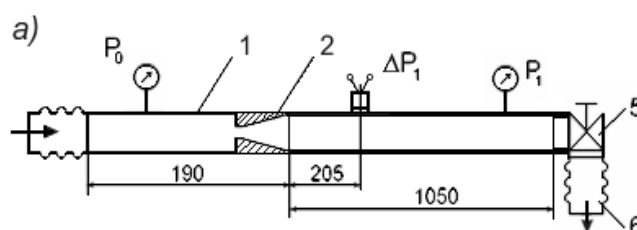
Исходными данными для разработки стенда и испытаний генератора кавитации являются параметры серийно выпускаемого оборудования и физико-механические свойства угля.

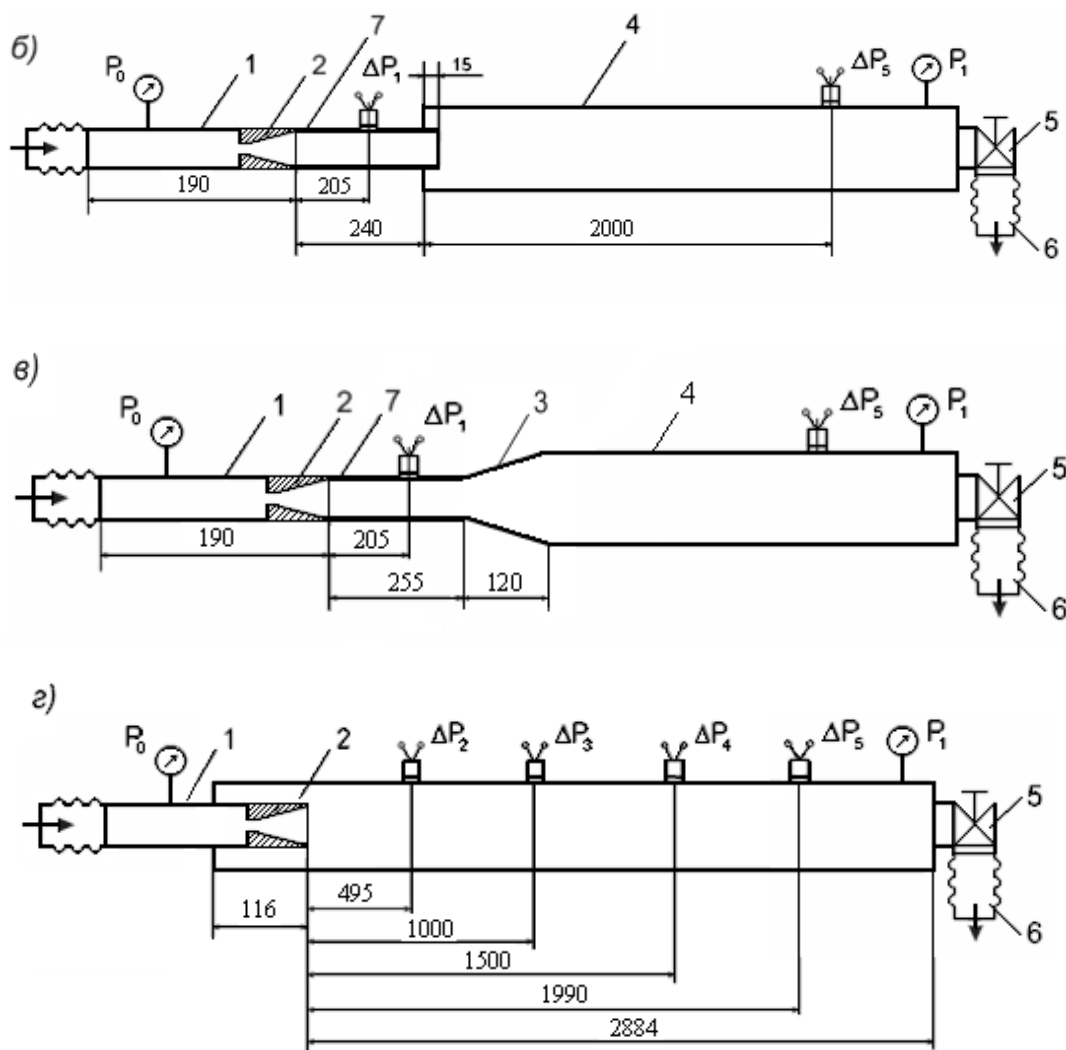
По параметрам насосных установок: давление жидкости от 1,0 МПа до 32 МПа; расход жидкости от 35 л/мин до 120 л/мин.

По свойствам угольного пласта: давления подпора (давление газа в пласте) от 1,0 МПа до 20,0 МПа; сопротивление угля на сдвиг от 2,0 МПа до 6,0 МПа.

Физическими величинами, которые характеризуют гидроимпульсное воздействие, являются значения давления жидкости на входе и выходе из генератора и средний расход жидкости через него. Величины импульсов давления жидкости за генератором  $\Delta P_1$  и в трубопроводе-имитаторе скважины  $\Delta P_2$ ,  $\Delta P_3$ ,  $\Delta P_4$  и  $\Delta P_5$  на различных расстояниях от среза генератора (рис. 2, г).

Все измерительные параметры распределяются по динамическому диапазону изменения на две категории – статические параметры, изменение которых во времени происходит с частотами менее чем 4 Гц, и динамические параметры, изменение которых во времени происходят с большими частотами. Все стендовые параметры являются статическими.





1 – входной гидравлический канал; 2 – кавитационный генератор; 3 – переходник;  
 4 – трубопровод-имитатор скважины; 5 – подпорный дроссель; 6 – сливной трубопровод  
 стенда; 7 – последиффузорный канал

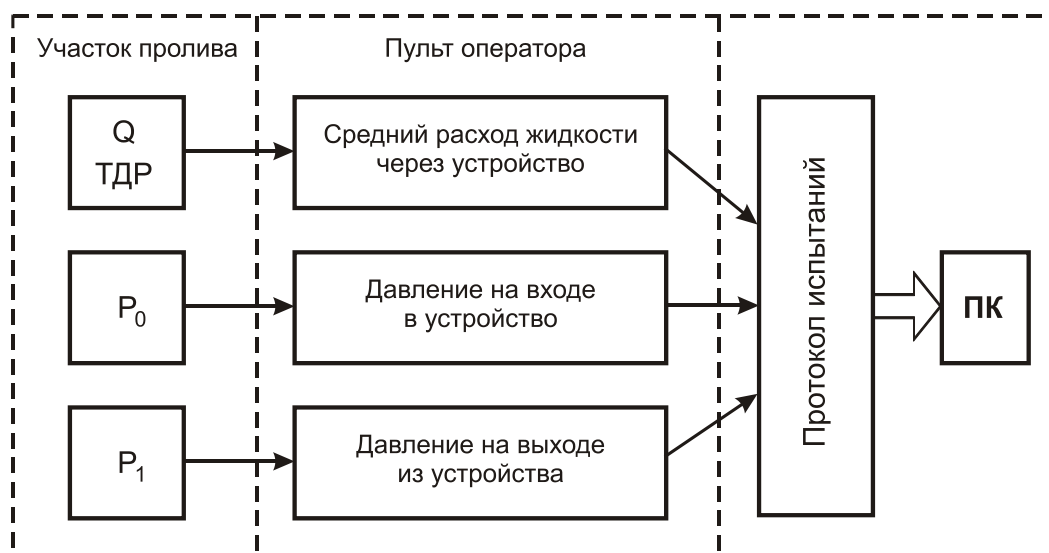
Рис. 2 – Схемы испытаний кавитационного генератора

Динамическими параметрами являются значения пульсаций давления жидкости на выходе из кавитационного генератора и в трубопроводе-имитаторе скважины. Для измерения статических параметров давления используются технические манометры со значением приведенной погрешности 0,6%, что позволяет получить среднее значение давления в месте установления манометров.

Методика измерения объемного значения расхода жидкости через устройство основана на преобразовании скорости потока жидкости в мерном трубопроводе, который устанавливается непосредственно перед входным коллектором насосов, в частоту оборотов специальной турбинки датчика расхода. Физическое значение расхода жидкости определяется по показаниям датчика со значением приведенной погрешности 1%. Измерение динамических параметров давления жидкости основано на прямой регистрации полных значений параметра с использованием соответствующих датчиков давления путем пре-

образования физической величины в электрический сигнал.

Структурная схема системы измерения для статических параметров при измерении параметров устройства в стендовых условиях приведенная на рисунке 3. Она включает в себя первичные преобразователи физических величин (расходомер и манометры), регистрацию значений приборов в протокол и их занесение в персональный компьютер (ПК).

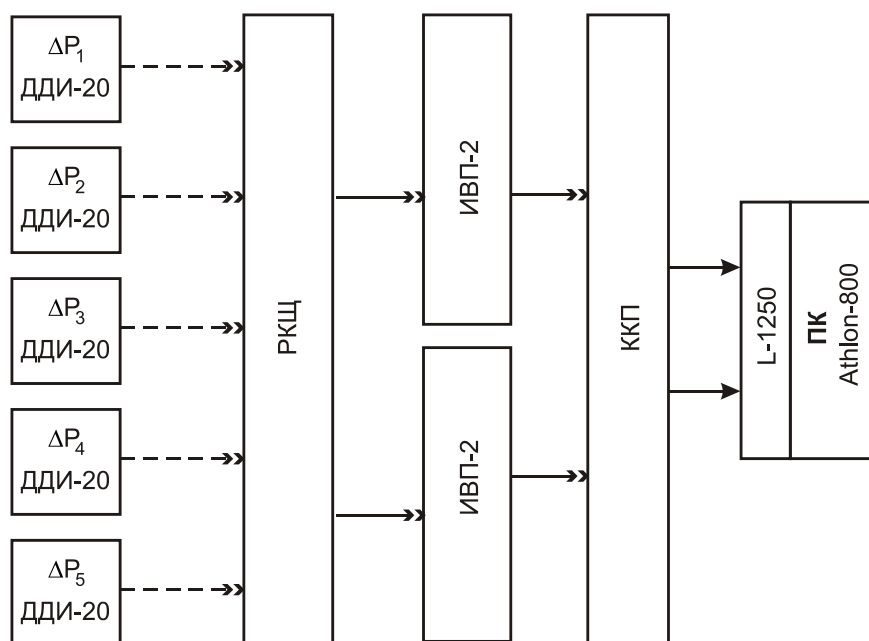


ТДР – турбинный датчик расхода жидкости;  $P_0$  и  $P_1$  – технические манометры класса 0,6  
Рис. 3 – Структурная схема измерений статических параметров устройства

Структурная схема системы измерения динамических параметров кавитационного генератора при стендовых испытаниях приведена на рис. 4.

В качестве первичных преобразователей используются индуктивные датчики полного давления типа ДДИ-20, которые дают возможность измерять значение давления до 120,0 МПа в импульсе. Датчик имеет чувствительную мембрану, на заданном расстоянии от которой установлена индуктивная катушка. 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 %, нелинейность тарировочной характеристики в диапазоне от 0 до  $P_{\max}$  не более 5 %.

Датчик включается в одно плечо высокочастотного индуктивного моста, который находится в преобразователе ИВП-2. Индуктивный высокочастотный двухканальный преобразователь ИВП-2 – является вторичным преобразователем в системе измерения быстроизменяемых давлений и предназначен для преобразования комплексного сопротивления датчика в электрическое напряжение. Изменение индуктивности датчика, обусловленное давлением, действующим на мембрану, превращается в отклонение исходного напряжения ИВП-2.



РКЩ – распределительный кабельный щит; ИВП-2 – двухканальный индуктивный преобразователь; ККП – коммутируемый кабельный пульт; L-1250 – многоканальный АЦП формата PCI, ПК – персональный компьютер класса Athlon-800

Рис. 4 – Структурная схема системы измерений динамических параметров

Краткая характеристика ИВП-2:

- несущая частота - 40000Гц;
- измерение пульсаций давления в диапазоне частот от 0 до 10000Гц;
- неравномерность амплитудно-частотной характеристики в диапазоне частот до 8000 Гц составляет не более 10 %, а в диапазонные частот от 8000 Гц до 10000 Гц – не более 20 %.

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 Athlon-800. Суммарная приведенная погрешность измерений давления датчиком ДДИ-20 с преобразователем ИВП-2 составляет 5,19 %.

Программное обеспечение для управления работой платы L-1250 и записи на магнитные носители информации при проведении испытаний обеспечивает специализированный программный пакет “DASYLAB” и отдельные библиотеки и драйверы программного пакета “GemisWIN”. Эти программы разрешают устанавливать отдельный коэффициент усиления сигналов по каждому измерительному каналу, включать в работу любое количество из 16 имеющихся каналов, задавать частоту дискретизации аналогового сигнала до 500 кГц и проводить запись входной информации в объемах, определенных свободной емкостью винчестера компьютера.

Обработка результатов испытаний также делится на два вида. Статические параметры рассчитываются по разработанному шаблону в пакете Excel. Для

динамических параметров проводится перерасчет первичных записей с АЦП в физическую величину и выдача их в виде графика во временной области для дальнейшего анализа средствами Excel.

Для снижения основной относительной погрешности проводится сквозное тарирование измерительного канала от датчика до ПК. Относительные погрешности при такой методике измерений в основном обусловлены погрешностью датчиков. Перечень использованных при проведении работ на стенде средств измерения и их основные относительные погрешности приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень средств измерения

№ п/п	Параметр	Название измерителя	Тип датчика	Рабочий диапазон		Основная погрешность, %
				по амплитуде	по частоте Гц	
1	Q	Турбинный датчик расхода жидкости	ТДР-17	4,0-12,0 л/с	0 – 1	± 0,5
2	P <sub>0</sub>	Манометр технический класса 0,6	МТ60	0-450 кгс/см <sup>2</sup>	0 – 1	± 0,6
3	P <sub>1</sub>	Манометр технический класса 0,6	МТ60	0-450 кгс/см <sup>2</sup>	0 – 1	± 0,6
4	ΔP <sub>1</sub>	Датчик пульсаций давления	ДДИ-20	0,05-130 МПа	20-60000	± 5,2
5	ΔP <sub>2</sub>	Датчик пульсаций давления	ДДИ-20	0,05-130 МПа	20-60000	± 5,2
6	ΔP <sub>3</sub>	Датчик пульсаций давления	ДДИ-20	0,05-90 МПа	20-60000	± 5,2
7	ΔP <sub>4</sub>	Датчик пульсаций давления	ДДИ-20	0,05-90 МПа	20-60000	± 5,2
8	ΔP <sub>5</sub>	Датчик пульсаций давления	ДДИ-20	0,05-90 МПа	20-60000	± 5,2

Полученные во время испытаний сигналы от датчиков ДДИ-20 и записанные с шагом дискретизации 20 мкс в виде отсчетов АЦП, пересчитываются в физическую величину по формуле

$$P_i = N_i/K_m,$$

где  $N_i$  – текущее значение отсчета датчика в  $i$ -й момент времени;  $K_m$  – тарировочная чувствительность датчика.

Данные испытания формируются в виде файлов первичных значений пульсирующего давления в аппаратно-программном комплексе Athlon-800 и представлены в виде осциллограммы для дальнейшей обработки по определению частоты  $f$  и размаха  $\Delta P_1$  колебательной величины давления на выходе из устройства и в трубопроводе-имитаторе скважины  $\Delta P_2 - \Delta P_5$ .

Как пример оценки применения методики измерений и обработки результатов исследований на рисунке 5 представлена осциллограмма записи вели-

чины давления  $\Delta P_1$  во времени на выходе из генератора с  $d_{кр} = 2,5$  мм при давлении на входе  $P_0 = 10$  МПа и значении параметра кавитации  $\tau \approx 0,16$ .

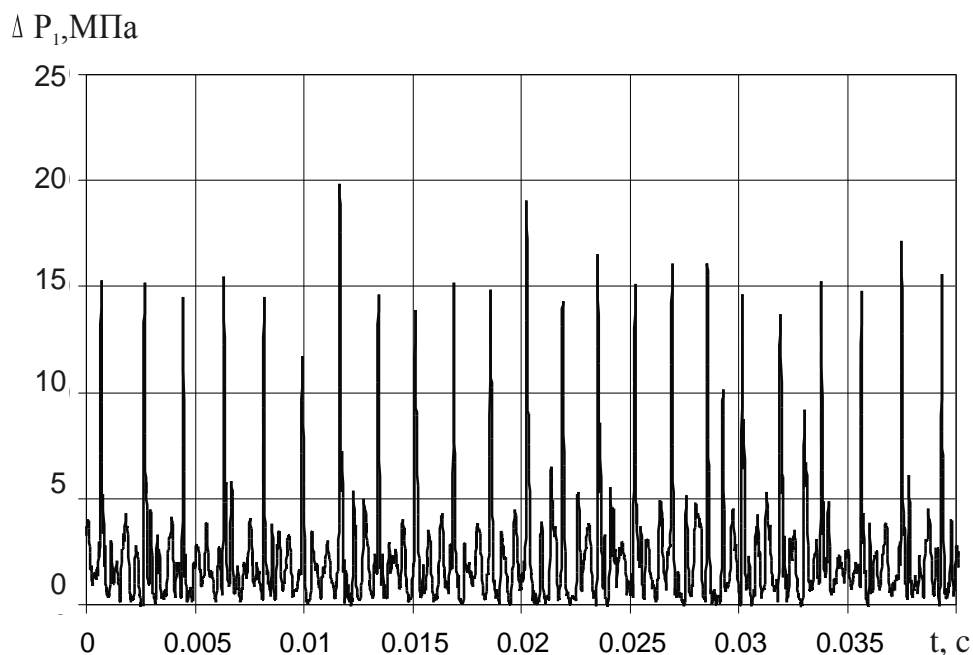


Рис. 5 – Фрагмент осциллограммы записи давления  $\Delta P_1$  во времени на выходе из кавитационного генератора с  $d_{кр} = 2,5$  мм и  $P_0 = 10$  МПа

Из рисунка видно, что на выходе из кавитационного генератора наблюдаются периодические колебания давления  $P_1$ , которые имеют ударный характер с крутым фронтом нарастания и падения давления. Такой вид колебаний в гидродинамике имеет название пульсаций давления и характеризуется частотой и размахом автоколебаний давления.

Частота пульсаций автоколебаний давления на выходе из генератора обусловлена возникновением режима периодически срывной кавитации и определяется из осциллограммы по формуле

$$f = n \cdot (1/t),$$

где  $n$  – количество периодов пульсаций;  $t$  – длительность  $n$ -периодов пульсаций в секундах.

Размах автоколебаний давления  $\Delta P_1$  на выходе из экспериментального образца кавитационного генератора представляет собой разницу между максимальным  $P_{1max}$  и минимальным  $P_{1min}$  значениями давления в импульсе

$$\Delta P_1 = \Delta P_{1max} - \Delta P_{1min}.$$

Также определяется и величина пульсаций в трубопроводе-имитаторе



скважины  $\Delta P_2 - \Delta P_5$ .

При исследовании характеристик экспериментального образца генератора кавитации ГК-2,5 проводилось при задании входным дросселем (рис. 1) установившегося значения давления на входе  $P_0 = 5; 10; 20; 30$  МПа. При каждом установившемся давлении на входе  $P_0$  выходным дросселем дискретно изменялось давление на выходе (в трубопроводе-имитаторе скважины)  $P_1$  с шагом  $0,025P_0$  при  $P_1 = (0,05 - 0,3)P_0$  и с шагом  $0,05P_0$  при  $P_1 = (0,3 - 0,8)P_0$ . Одновременно, при установившихся значениях давлений на входе  $P_0$  и выходе  $P_1$ , по команде «Замер» осуществляется контроль и измерения динамических параметров со временем регистрации не менее 10 секунд на каждой частоте.

Таким образом, разработанный гидравлический стенд и методика определения динамических характеристик кавитационного генератора позволяют имитировать процесс гидроимпульсного воздействия на угольный пласт через шпур или скважины и проводить исследование конструктивных и режимных параметров генераторов импульсов давления. Применение при лабораторных исследованиях серийно выпускаемого оборудования позволяет отметить адекватность стендовых испытаний режимов работы кавитационного генератора условиям его работы в скважине при нагнетании жидкости в угольные пласты.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Л.М. Васильевим 18.08.09.*