

В.В. Зберовский, к.т.н.,  
Р.Н. Наривский, м.н.с.,  
Т.М. Уколова, вед. инж.,  
Ю.Е. Поляков, инж. I.  
(ИГТМ),  
А.Н. Нискевич,  
А.А. Ангеловский  
(ПАО «Краснодонуголь»)

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕЖИМА КАВИТАЦИИ ГЕНЕРАТОРА УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ**

Наведено результати лабораторних досліджень генераторів пружних коливань на гідравлічному стенді з метою виявлення робочого діапазону при різних гідродинамічних режимах, модельованих в імітаторі свердловини.

## **RESULTS OF LABORATORY RESEARCHES OF CAVITATION MODE OF GENERATOR OF RESILIENT VIBRATIONS**

The results of laboratory researches of generators of resilient vibrations are resulted on a hydraulic stand with the purpose of exposure of working range at different hydrodynamic modes designed in the imitator of mining hole.

Ранее проведенными исследованиями [1-3] установлено, что наиболее перспективным решением проблемы газодинамического фактора в забоях подготовительных выработок является проведение профилактических мероприятий по гидрорыхлению выбросоопасных угольных пластов в режиме импульсного нагнетания жидкости. Однако до настоящего времени рабочие диапазоны генераторов упругих колебаний (ГК), используемых в устройстве гидроимпульсного воздействия, изучены не достаточно.

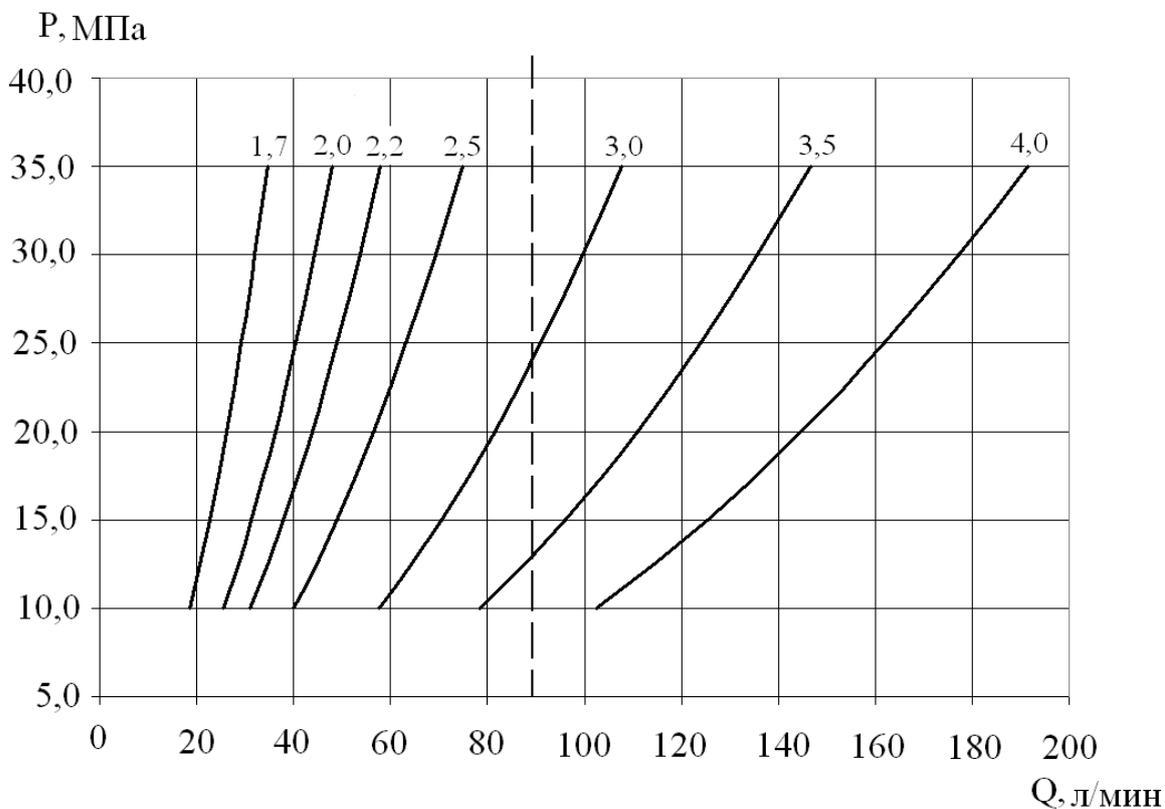
Поэтому целью данной работы является исследование гидродинамических характеристик и определение рабочего диапазона генератора упругих колебаний, используемого при гидроимпульсном воздействии.

Расчетным значениям давления нагнетания жидкости при гидрорыхлении угольных пластов (до 25,0 МПа) и применяемым на шахтах насосным установкам УНИ-01 или УНР, производительностью 60 л/мин, наиболее соответствует генератор с критическим сечением 2,5 мм (рис.1).

Исходя из поставленной цели, была разработана методика испытаний и проведены исследования гидродинамических характеристик генератора упругих колебаний ГК-2,5. Стендовая установка представляет собой замкнутую систему и включает в себя: емкость для жидкости; систему насосов и имитатор скважины; регулирующую и регистрирующую аппаратуру. К имитатору скважины подключена система датчиков ДДИ-20 с передачей сигналов через первичный преобразователь ИВП-2 на персональный компьютер и визуальная аппаратура, регистрирующая расход давления жидкости (рис. 2).

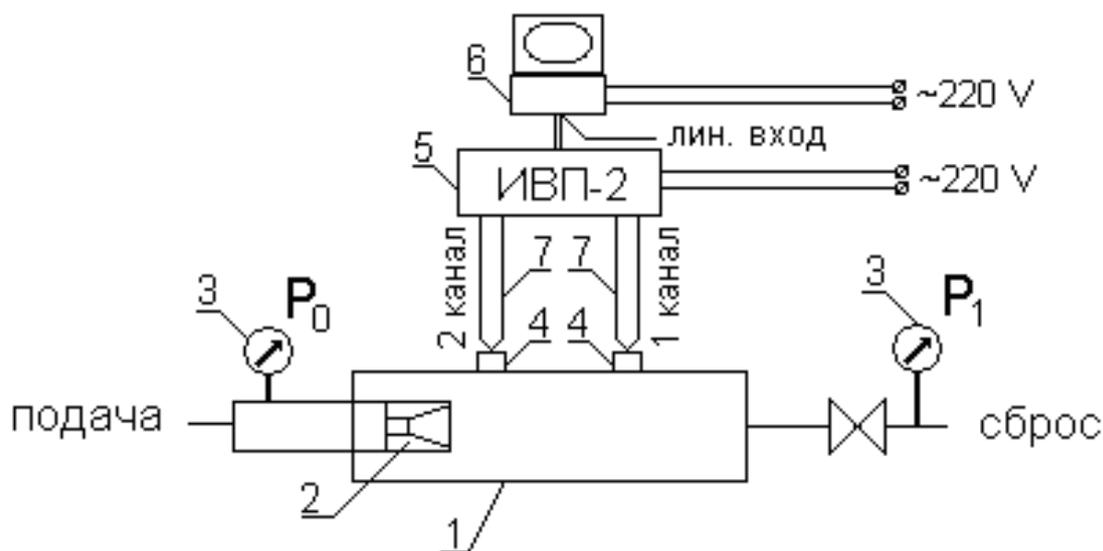
Учитывая, что при проведении исследований используются технические средства и серийное оборудование применяемые на шахтах, а в имитаторе

скважины создаются условия идентичные промышленным, стендовые испытания позволяют с достаточной точностью смоделировать условия работы генератора в скважине и получить достоверные результаты инструментальных измерений.



1,7 ÷ 4,0 – диаметр критического сечения генератора, мм

Рис. 1 – Номограмма определения типа генератора



1 – имитатор скважины; 2 – генератор ГК-2,5; 3 – манометр и МТ;  
4 – датчик ДДИ-20; 5 – ИВП; 6 – ПЭВМ

Рис. 2 – Схема инструментальных измерений гидродинамических характеристик генератора в имитаторе скважины

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 на вход генератора. Технологические возможности стенда позволяют проводить испытания, как автономного генератора, так и с его расположением на входе в имитатор скважины или при его погружении в имитатор. Давление подпора в гидравлической системе позволяет моделировать фильтрационные свойства угольного пласта, которые соответствуют сопротивлению угля на сдвиг от 2,0 МПа до 6,0 МПа и давлению газа в пласте от 1,0 МПа до 20,0 МПа.

Расход жидкости в системе определяется по показаниям расходомера, установленного в сливной части трубопровода. Измерение динамических характеристик генератора осуществляется датчиками давления ДДИ-20 путем преобразования импульсов давления жидкости в электрический сигнал.

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) преобразуется 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 %.

Обработка результатов испытаний 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.

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:

$$P_i = N_i / K_T,$$

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

Данные испытания формируются в виде файлов первичных значений пульсирующего давления в аппаратно-программном комплексе Athlon-800 и отображаются в виде осциллограмм для дальнейшей обработки по определению частоты  $f$  и размаха  $\Delta P_1$  автоколебаний давления на выходе из устройства и в имитаторе скважины.

Как пример оценки применения методики измерений и обработки результатов исследований на рисунке 3 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  $\tau \approx 0,16$ . Параметр кавитации  $\tau$  определяется отношением давления на выходе генератора к давлению на входе  $\tau = P_1/P_0$ .

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.

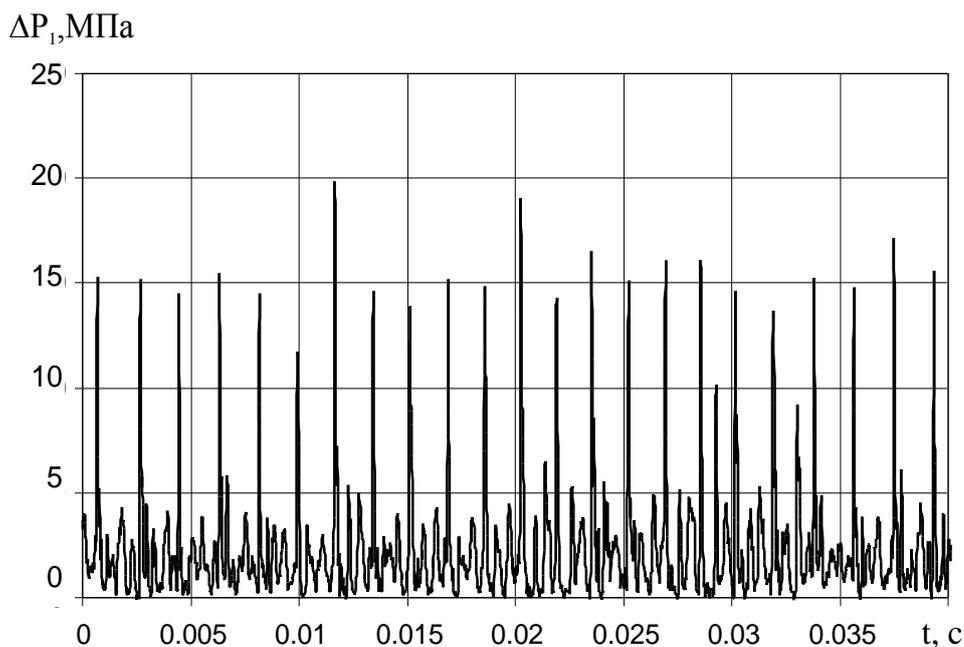


Рис. 3 – Фрагмент оциллограммы записи давления  $\Delta P_1$  во времени на выходе из кавитационного генератора с  $d_{кр} = 2,5$  мм и  $P_0 = 10$  МПа

Частота пульсаций автоколебаний давления на выходе из генератора обусловлена возникновением режима периодически срывной кавитации и определяется из оциллограммы 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 генератора упругих колебаний представляет собой разницу между максимальным  $P_{1max}$  и минимальным  $P_{1min}$  значениями давления в импульсе:

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

Исходя из изложенного, разработанная методика определения динамических характеристик генератора упругих колебаний позволяет проводить исследование рабочего диапазона генератора упругих колебаний при имитации

процесса гидроимпульсного воздействия на угольный пласт на гидравлическом стенде.

Учитывая, что на глубинах от 600 м до 1300 м диапазон давления нагнетания жидкости при гидрорыхлении пластов находится в пределах от 10,0 МПа до 25 МПа, а при гидроимпульсном воздействии в пределах от 10,0 МПа до 20 МПа, исследование характеристик генератора ГК-2,5 проводилось при установившемся значении давления на входе генератора  $P_0 = 5$  МПа; 10 МПа; 20 МПа; 30 МПа. При каждом установившемся давлении на входе  $P_0$  выходным дросселем дискретно изменялось давление на выходе имитатора 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  $P_1$ , осуществлялся контроль и измерения динамических параметров со временем регистрации не менее 10 секунд на каждой частоте.

Один из примеров результатов лабораторных исследований генератора ГК-2,5 приведен в протоколах испытаний № 1 - № 4 (табл. 1).

Анализ результатов исследований в диапазоне  $5,0 \text{ МПа} \leq P_0 \leq 30,0 \text{ МПа}$  позволяет отметить следующее.

Зависимости частоты  $f$  и размаха  $\Delta P_1$  автоколебаний давления жидкости на выходе из генератора от параметра кавитации  $\tau$  для различных давлений на входе  $P_0$ , наблюдаются в диапазоне параметра кавитации  $0,012 \leq \tau \leq 0,86$ . При давлении на входе генератора  $P_0 = 5$  МПа частотный диапазон существования кавитационных автоколебаний находится в пределах от 810 Гц до 4500 Гц; при  $P_0 = 10$  МПа от 900 Гц до 7200 Гц; при  $P_0 = 20$  МПа от 1200 Гц до 9600 Гц; при  $P_0 = 30$  МПа от 1250 Гц до 11900 Гц.

В наших исследованиях наибольший интерес представляет рабочий диапазон генератора при давлении нагнетания жидкости от 10,0 МПа до 20,0 МПа (рис. 4).

Анализ установленных закономерностей показывает, что при кавитационном течении жидкости и постоянном давлении на входе генератора  $P_0$  частота колебаний с ростом параметра кавитации  $\tau$  растет практически по линейному закону. Размах автоколебаний давления  $\Delta P_1$  с увеличением параметра кавитации  $\tau$  изменяется не линейно. Кривая зависимости  $\Delta P_1 = f(\tau)$  при различных давлениях  $P_0$  сначала возрастает, а потом снижается, достигая максимума в диапазоне значений параметра  $\tau$  от 0,07 до 0,15. При этом увеличение давления  $P_0$  приводит к смещению максимума значений  $\Delta P_1$  в сторону меньших значений  $\tau$ .

Таблица 1 – Результаты исследований рабочего диапазона генератора ГК-2,5.

Испытание №1			Испытание №2			Испытание №3			Испытание №4		
$P_0 = 5$ МПа			$P_0 = 10$ МПа			$P_0 = 20$ МПа			$P_0 = 30$ МПа		
$Q = 28,3$ л/мин			$Q = 39,9$ л/мин			$Q = 56,5$ л/мин			$Q = 69,2$ л/мин		
$\tau$	$f$ ,	$\Delta P_1$ ,	$\tau$	$f$ ,	$\Delta P_1$ ,	$\tau$	$f$ ,	$\Delta P_1$ ,	$\tau$	$f$ ,	$\Delta P_1$ ,

	Гц	МПа		Гц	МПа		Гц	МПа		Гц	МПа
0,041	810	1,83	0,036	918	0,56	0,032	1190	5,12	0,041	1260	9,84
0,072	905	7,08	0,081	937	11,21	0,041	1245	18,91	0,076	1440	36,21
0,089	912	8,38	0,106	988	13,48	0,0502	1489	21,12	0,112	1981	35,28
0,112	1086	12,26	0,135	1231	18,62	0,068	1733	29,04	0,151	2368	33,74
0,153	1219	11,18	0,160	1712	17,18	0,096	1806	29,22	0,211	3707	31,24
0,212	1862	9,32	0,203	2056	16,87	0,119	1977	28,83	0,256	4262	30,18
0,231	1910	8,86	0,242	2424	15,48	0,142	2172	27,05	0,318	4525	29,68
0,289	2083	7,24	0,320	2581	14,81	0,187	2343	26,28	0,348	5941	26,23
0,351	2481	5,93	0,431	4218	12,17	0,233	2563	25,02	0,391	6589	24,84
0,420	3010	5,51	0,480	4811	10,61	0,279	4199	24,8	0,460	7860	18,95
0,480	3417	4,79	0,531	5613	10,42	0,370	4453	21,82	0,518	7920	15,12
0,560	3731	4,64	0,582	5938	7,82	0,461	5781	16,88	0,593	9211	9,28
0,630	4128	3,72	0,649	6231	5,92	0,553	7180	10,33	0,688	10810	5,12
0,770	4512	1,21	0,749	6612	4,43	0,610	8130	8,84	0,724	11240	4,81
0,84	4620	0,64	0,798	7213	3,64	0,702	9609	4,18	0,791	11920	3,34
0,921	-	-	0,830	7310	1,25	0,821	9720	2,14	0,858	-	-

Таким образом, исходя из результатов проведённых исследований установлено, что максимальное значение размаха  $\Delta P_1$  превышает давление на входе генератора  $P_0$  примерно от 1,2 до 2,4 раза. Уровень размаха автоколебаний в последиффузорном канале генератора на удалении от него  $\approx 100 d_{кр}$  составляет  $(1,3 \dots 1,8) P_1$ , а в имитаторе скважины на удалении 2,0 м и более  $P_2 = 0,3 \cdot P_1 \pm \bar{P}_2$ , где  $\bar{P}_2$  - установившееся среднее давление подпора жидкости. Исходя из полученных результатов, получены следующие результаты.

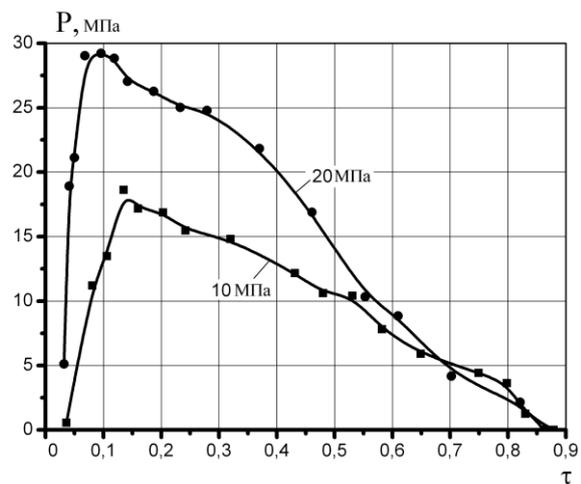
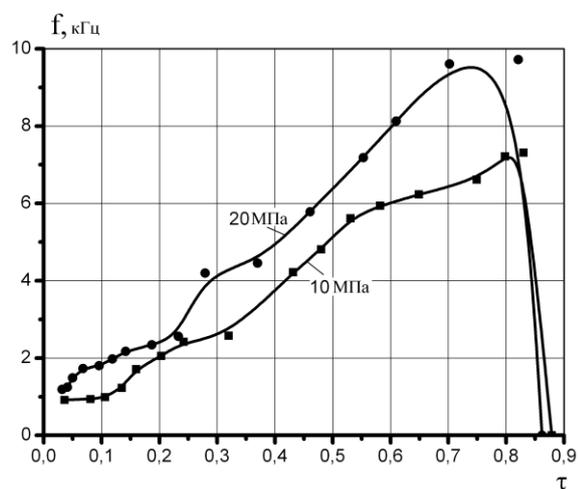


Рис. 4 – Рабочий диапазон генератора ГК-2,5 по частоте  $f$  и размаху автоколебаний  $\Delta P_1$  при  $P_0$  от 10,0 МПа до 20,0 МПа

В рассмотренном нами диапазоне подачи давления жидкости на вход генератора ГК-2,5 кавитационный характер течения возникает при параметре кавитации  $\tau = 0,012$ , устойчиво проявляется в диапазоне  $0,03 \leq \tau \leq 0,6$ , затухает в диапазоне  $0,8 \leq \tau \leq 0,85$  и прекращается при  $\tau = 0,86$ .

Максимальная эффективность режима кавитации достигается при  $0,07 \leq \tau \leq 0,2$  с частотой от 1,0 кГц до 2,5 кГц и размахом автоколебаний давления  $\Delta P_1 = (1,5 \dots 1,6) P_0$ .

В качестве рабочего диапазона ГК-2,5 по установленным зависимостям можно выделить участок развития и затухания режима кавитационного течения жидкости при параметре кавитации  $0,03 \leq \tau \leq 0,6$  с частотой от 0,8 кГц до 11,9 кГц и размахом автоколебаний давления  $\Delta P_1 = (1,3 \dots 1,8) P_0$ .

Соответствие рабочего диапазона ГК-2,5 горно-геологическим условиям при нагнетании жидкости в угольный пласт проверяется опытными нагнетаниями, при необходимости параметры корректируются на испытательном стенде.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила ведения горных работ на пластах, склонных к газодинамическим явлениям. Киев: Минуглепром Украины, 2005.-224 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 информационно-аналитический бюллетень МГГУ. - М.: Мир горной книги, 2007. - №13. - С. 251-259.
3. Зберовский В.В., Жулай Ю.А., Ангеловский А.А., Чугунков И.Ф. Стендовая установка для моделирования работы кавитационного генератора в скважине // Геотехническая механика. Межвед. сб. научн. трудов. - Дн-вск: - 2009. - № 82. – С.190-198.