

УДК 621.313.12-752.001.5:532.528

Зберовский В.В. , канд. техн. наук, ст.науч.сотр.,
Поляков Ю.Е. , аспирант,
Наривский Р.Н. , магистр
(ИГТМ НАН Украины)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ, РЕАЛИЗУЕМЫХ
ГЕНЕРАТОРОМ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ЗАРОЖДЕНИИ И
ЗАТУХАНИИ КАВИТАЦИОННОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ**

Зберовський В.В. , канд. техн. наук, ст.наук.співр.,
Поляков Ю.Є. , аспірант,
Наривський Р.М. , магістр
(ІГТМ НАН України)

**ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ, РЕАЛІЗОВАНИХ
ГЕНЕРАТОРОМ ПРУЖНИХ КОЛИВАНЬ ПРИ ВИНЕКНЕННІ ТА
ЗАТУХАННІ КАВІТАЦІЙНОЇ ТЕЧІЇ РІДИНИ**

Zberovskiy V.V., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,
Polyakov Yu.E. , Doctoral Student,
Narivskiy R.N. , M.S. (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine)

**INVESTIGATION OF DYNAMIC PARAMETERS IMPLEMENTED BY THE
GENERATOR OF ELASTIC VIBRATIONS AT INITIATION AND
DAMPING OF CAVITATION LIQUID FLOW**

Аннотация: В данной статье рассматривается взаимосвязь закономерности формирования частоты и размаха автоколебаний жидкости в имитаторе скважины при низких давлениях подпора, а именно до 1,6 МПа. Эти исследования проводились с целью определения процессов зарождения кавитационного течения жидкости на ранних стадиях, которые происходят до установившегося рабочего режима. Анализ полученных результатов доказывает, что изменение угла раскрытия диффузора приводит к изменению размаха и частоты автоколебаний, однако характер и качественная картина их изменения остаются прежними. Так при включении насосной установки и отсутствии давления подпора независимо от угла раскрытия диффузора наблюдаются установившейся размах и частота автоколебаний. Эти значения соответствуют начальным (собственным) значениям генератора, которые можно обозначить как нулевой или холостой режим работы генератора. В ходе проведенных испытаний было выявлено, что наиболее устойчивым и эффективным является процесс преобразования статического течения жидкости в импульсный при конструктивных параметрах генератора ГК-2,5 с $l_{кр} = 3,0$ мм и $\beta = 20^\circ$.

Ключевые слова: генератор кавитации, жидкость, низкое давление подпора, параметр кавитации, конструктивные параметры, угол раскрытия диффузора.

Актуальность задачи. Одной из нерешенных задач при гидрорыхлении выбросоопасных угольных пластов при статическом нагнетании жидкости

является прорыв жидкости в выработку при нарушении зоны герметизации скважины.

Основной причиной проявления этого процесса является невозможность контроля давления подпора жидкости в скважине и его соответствия гидросопротивлению пласта. Используемая при расчете давления нагнетания эмпирическая формула [1] $P_n=(0,75...1,0) \gamma H$, как показали наши исследования [2, 3], в условиях больших глубин не соответствует параметрам нагнетания жидкости в сложных горно-геологических условиях. Это приводит к тому, что высоконапорное нагнетание под расчетным давлением приводит к гидроотжиму краевой части пласта и неэффективности противовыбросных мероприятий. Эта проблема была решена при нагнетании жидкости в импульсном режиме [3, 4].

Однако, несмотря на достигнутые результаты и эффективность гидроимпульсного воздействия в целом, остается достаточно много неисследованных и неизученных процессов, протекающих за кавитационными устройствами, в нашем случае это процессы, протекающие в фильтрационной части скважины и в краевой части угольного пласта. К этому следует добавить, что во всех исследованиях, рассматривается установившийся процесс кавитации или суперкавитации, в котором оценка динамических параметров (размаха и частоты автоколебаний) производится по параметру кавитации $\tau=P_n/P_n$, где P_n – давление подпора, P_n – давление нагнетания. Однако, как показала практика, этот параметр, приемлемый для теоретических и лабораторных исследований, использовать в технологическом цикле гидрорыхления угольных пластов не возможно.

Поэтому возникла необходимость в проведении дополнительных исследований [5], которые позволили установить, что закономерности развития частоты и размаха автоколебаний от давления подпора в диапазоне $0,1 \leq P_n \leq 14,0$ МПа, вместо параметра кавитации, имеют высокую достоверность и могут быть использованы при контроле гидроимпульсного воздействия.

В результате проведенных исследований при моделировании импульсного нагнетания жидкости в имитаторе фильтрационной части скважины, в кавитационном потоке жидкости, реализуемом генератором упругих колебаний ГК-2.5, были установлены зоны развития и завершающей стадии явления кавитации. Исходя из этого, была поставлена задача: исследовать характер развития автоколебаний и частоты их следования в процессе зарождения и затухания кавитационного течения жидкости. Это позволило установить границы начальной и завершающей стадии явления кавитации в потоке жидкости и обосновать рабочий диапазон устройства гидроимпульсного воздействия.

Основное содержание работы. Результаты исследований [5] позволили установить, что процесс устойчивого кавитационного течения жидкости наблюдается при $\tau=0,07$ ($P_n=0,07P_n$) и завершается при $\tau=0,82$ ($P_n=0,82P_n$). Поэтому решение поставленной задачи следует искать в диапазоне давления подпора жидкости на стадии развития процесса кавитации $P_n=(0,02...0,2)P_n$ МПа и его затухания при $P_n=(0,7...1,0)P_n$.

В основу данной работы положены результаты исследований генератора ГК-2.5, выполненные в соответствии с методикой моделирования процесса им-

пульсного нагнетания жидкости [6], с различными углами раскрытия диффузора $\beta=20, 30, 35, 40, 45$ градусов (рис.1) и длиной критического сечения $l_{кр}=3,0; 6,0$ и $30,0$ мм. При этом были учтены горно-геологические особенности условий залегания выбросоопасных пластов на глубинах до 700 м и от 700 до 1300 м, которые обоснованы результатами горно-экспериментальных работ, проведенных на шахтах ПАО «Краснодонуголь» на глубинах от 500 до 1200 м [7].

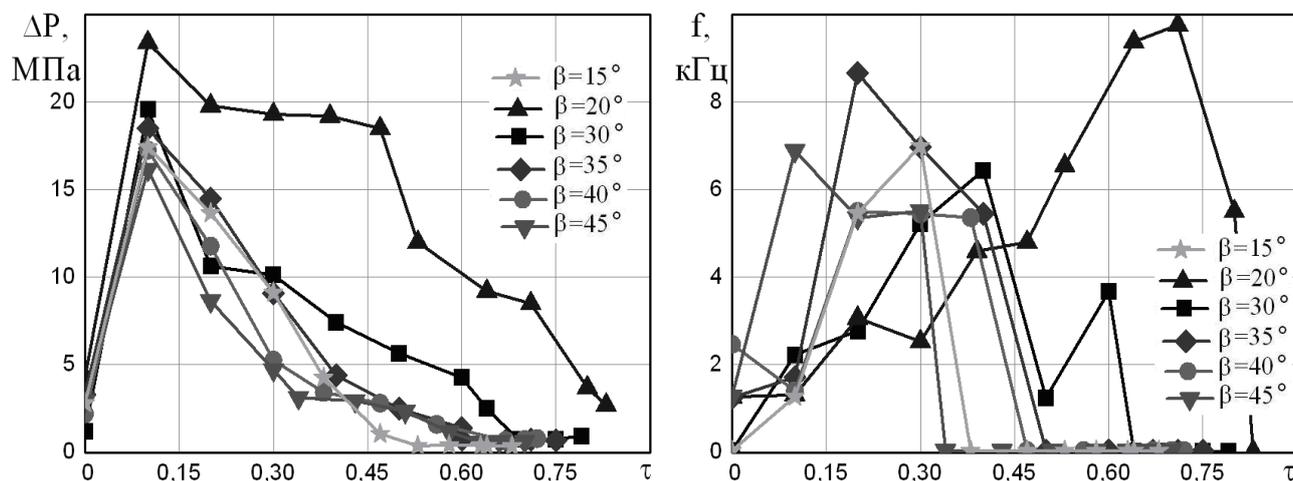


Рисунок 1 – Зависимости амплитуды размаха автоколебаний ΔP и частоты f их следования от параметра кавитации τ при различных конструктивных параметрах генератора

Исходя из принятых нами условий, все результаты моделирования разделены на две составные части. Первая – при давлении нагнетания до 15 МПа, что соответствует глубине залегания до 700 м, вторая – более 15 МПа, что соответствует глубинам более 700 м.

Из результатов исследований (рис.1) видно, что наиболее устойчивый, с максимальными значениями размаха автоколебаний ΔP и частотой их следования f , характер развития периодически-срывного течения жидкости соответствует ГК-2,5 с углом раскрытия диффузора $\beta=20^\circ$. Также известно, что рабочий диапазон этого генератора по параметру кавитации составляет $0,15 \leq \tau \leq 0,82$ [5] или по давлению подпора – $0,15P_n \leq P_n \leq 0,82P_n$. Поэтому для решения поставленной задачи рассмотрим диапазоны стадии развития $P_n=(0,02 \dots 0,2)P_n$ МПа и затухания $P_n=(0,7 \dots 1,0)P_n$ периодически-срывного течения жидкости.

Анализ установленных закономерностей развития частоты и размаха автоколебаний (рис.1) позволяет отметить, что на его начальной стадии наблюдается резкий рост значений размаха автоколебаний при нестабильных значениях частоты их следования. В верхней границе диапазона, наоборот, при плавном снижении значений размаха автоколебаний наблюдается резкое падение значений частоты. При этом изменение геометрических параметров генератора снижает верхнюю границу диапазона с 0,6 до 0,3, то есть практически в два раза. Воспользуемся этим, экспериментально установленным фактом, и рассмотрим характер изменения размаха и частоты автоколебаний на нижней и верхней

границе рабочего диапазона устройства.

Для этого рассмотрим результаты моделирования и расчета динамических параметров, полученные в имитаторе скважины высоконапорного гидравлического стенда. Отметим, что эти исследования были проведены с использованием измерительной аппаратуры и модуля аналогово-цифрового преобразования (АЦП) общего назначения E14-140. Модуль E14-140 предназначен для построения многоканальных измерительных систем ввода/вывода аналоговых и цифровых данных в составе IBM-совместимых компьютеров. Для сбора и обработки данных использовалась программа PowerGraph [8].

Использование вышеперечисленных средств позволило сформировать базу данных режимных и динамических параметров гидроимпульсного воздействия. Это позволило более детально, с шагом измерения 0,02 МПа, исследовать характер изменения динамических параметров генератора и установить неизвестные ранее результаты развития и затухания явления кавитации.

В качестве примера в таблицах 1-5 приведены данные экспериментальных исследований ГК-2.5 с углом раскрытия диффузора $\beta=20^\circ$ и длиной критического сечения $l_{кр}=3,0$ мм при давлении нагнетания $P_n=5; 10; 15; 20; 23$ МПа и давлении подпора до 1,6 МПа.

Таблица 1 – Протокол результатов испытаний генератора ГК-2.5 с $\beta=20^\circ$, $l_{кр}=3$ мм при $P_n=5$ МПа и $Q=15$ л/мин

№	P_n	ΔP	f	τ	№	P_n	ΔP	f	τ
1	0,24	0,92	9075	0,048	22	0,58	13,91	3454	0,116
2	0,26	0,83	9078	0,052	23	0,59	16,26	1144	0,118
3	0,27	0,95	9078	0,054	24	0,61	15,1	3417	0,122
4	0,29	2,77	24	0,058	25	0,63	16,79	1110	0,126
5	0,31	4,04	24	0,062	26	0,64	15,1	1123	0,128
6	0,32	2,52	24	0,064	27	0,66	15,25	1144	0,132
7	0,34	4,96	1065	0,068	28	0,67	17,22	1290	0,134
8	0,35	11,44	1107	0,07	29	0,69	14,77	1312	0,138
9	0,37	10,44	1321	0,074	30	0,71	15,07	1358	0,124
10	0,39	12,27	1562	0,078	31	0,72	15,37	1373	0,144
11	0,4	12,6	1336	0,08	32	0,74	16	1373	0,148
12	0,42	13,73	1394	0,084	33	0,75	15,57	1483	0,15
13	0,43	12,96	1391	0,086	34	0,77	15,53	1565	0,154
14	0,45	14,32	1620	0,09	35	0,79	14,39	1556	0,158
15	0,47	14,26	1321	0,094	36	0,8	14,51	1708	0,16
16	0,48	14,89	1318	0,096	37	0,88	14,11	1696	0,176
17	0,5	14,41	1345	0,1	38	0,96	13,32	1934	0,192
18	0,51	14,15	1452	0,102	39	1,04	13,5	1983	0,208
19	0,53	14,59	1556	0,106	40	1,12	12,9	1977	0,224
20	0,55	13,33	2984	0,11	42	1,28	11,9	2182	0,256
21	0,56	15,77	1141	0,112	43	1,36	11,71	2194	0,272

Таблица 2 – Протокол результатов испытаний генератора ГК-2.5
с $\beta=20^\circ$, $l_{кр}=3$ мм при $P_n=10$ МПа и $Q=35$ л/мин

№	P_n	ΔP	f	τ	№	P_n	ΔP	f	τ
1	0,24	0,78	9088	0,024	10	0,96	26,42	1934	0,096
2	0,32	0,8	9088	0,032	11	1,04	27,49	1834	0,104
3	0,4	0,86	9088	0,04	12	1,12	26,35	1943	0,112
4	0,48	0,78	9088	0,048	13	1,2	28,33	1293	0,12
5	0,56	0,86	9088	0,056	14	1,28	30,25	1376	0,28
6	0,64	0,89	9088	0,064	15	1,36	31,19	1602	0,136
7	0,72	7,73	24	0,072	16	1,44	30,15	1370	0,144
8	0,8	18,94	2014	0,08	17	1,52	30,66	1660	0,152
9	0,88	23,74	1831	0,088	18	1,6	26,83	1535	0,16

Таблица 3 – Протокол результатов испытаний генератора ГК-2.5
с $\beta=20^\circ$, $l_{кр}=3$ мм при $P_n=15$ МПа и $Q=40$ л/мин

№	P_n	ΔP	f	τ	№	P_n	ΔP	f	τ
1	0,32	0,78	9094	0,021	10	1,04	1,02	9094	0,069
2	0,4	0,92	9094	0,027	11	1,12	11,07	24	0,075
3	0,48	0,92	9094	0,032	12	1,2	28,21	2642	0,08
4	0,56	0,83	9094	0,037	13	1,28	32,83	3979	0,085
5	0,64	0,9	9094	0,043	14	1,36	32,8	2035	0,091
6	0,72	0,8	9094	0,048	15	1,44	34,5	1834	0,096
7	0,8	0,85	9094	0,053	16	1,52	34,78	1797	0,101
8	0,88	0,86	9094	0,059	17	1,6	36,65	2185	0,107
9	0,96	0,82	9094	0,064					

Таблица 4 – Протокол результатов испытаний генератора ГК-2.5
с $\beta=20^\circ$, $l_{кр}=3$ мм при $P_n=20$ МПа и $Q=48$ л/мин

№	P_n	ΔP	f	τ	№	P_n	ΔP	f	τ
1	0,4	0,8	9097	0,02	9	1,04	0,82	9100	0,052
2	0,48	0,82	9100	0,024	10	1,12	0,89	9100	0,056
3	0,56	0,79	9100	0,028	11	1,2	0,93	9100	0,06
4	0,64	0,85	9100	0,032	12	1,28	0,86	9100	0,064
5	0,72	0,83	9100	0,036	13	1,36	0,86	9100	0,068
6	0,8	0,86	9100	0,04	14	1,44	1,15	9100	0,072
7	0,88	0,92	9100	0,044	15	1,52	1,06	9100	0,076
8	0,96	0,95	9100	0,048	16	1,6	1,16	9100	0,08

Аналогичные протоколы испытаний составлены по результатам исследований динамических параметров генератора ГК-2.5 с различными углами раскрытия диффузора $\beta=20, 30, 35, 40, 45$ градусов и длиной критического сечения $l_{кр}=30,0$ мм; 6,0 мм на стадии зарождения и развития кавитационного течения жидкости.

По данным экспериментальных исследований были установленным графические зависимости развития частоты и размаха автоколебаний от давления

подпора в установленном нами диапазоне с шагом измерения давления $P_n=0,02$ МПа. Здесь необходимо отметить, что если в развитии размаха автоколебаний прослеживается закономерность их роста, то частота их следования характеризуется хаотическими пикообразными колебаниями.

Таблица 5 – Протокол результатов испытаний генератора ГК-2.5 с $\beta=20^\circ$, $l_{кр}=3$ мм при $P_n=23$ МПа и $Q=48$ л/мин

№	P_n	ΔP	f	τ	№	P_n	ΔP	f	τ
1	0,48	0,92	9103	0,021	9	1,12	0,99	9103	0,049
2	0,56	0,95	9103	0,024	10	1,2	0,95	9103	0,052
3	0,64	1	9103	0,028	11	1,28	1,08	9103	0,056
4	0,72	0,99	9103	0,031	12	1,36	1,09	9103	0,059
5	0,8	0,85	9103	0,035	13	1,44	1,03	9103	0,063
6	0,88	1,06	9103	0,038	14	1,52	0,92	9103	0,066
7	0,96	1	9103	0,042	15	1,6	1,02	9103	0,069
8	1,04	1,06	9103	0,045					

Аналогичный характер развития размаха автоколебаний и частоты их следования на стадии зарождения и развития кавитационного течения жидкости прослеживается при всех рассмотренных значениях геометрических параметров генератора $\beta=20, 30, 35, 40, 45$ градусов и $l_{кр}=3,0; 6,0$ и $30,0$ мм. В качестве примера полученных результатов на рисунке 2 приведены установленные графические кривые развития размаха автоколебаний.

В результате проведенных исследований были установлены значения размаха автоколебаний и частоты их следования для различных геометрических параметров ГК-2.5. Это позволило сформировать базу данных динамических параметров периодически-срывного течения жидкости от стадии зарождения до затухания, рассмотреть и установить закономерности их развития от давления подпора жидкости в скважине.

Известно, что глубина залегания угольных пластов в значительной мере влияет на их газодинамическое состояние, физико-механические свойства угля и параметры гидравлического воздействия на краевую часть угольного массива. Поэтому, исходя из принятых нами условий, рассмотрим установленные закономерности для условий залегания угольных пластов на глубинах до 700 м, что соответствует давлению нагнетания жидкости до 15 МПа, и более 700 м при давлении нагнетания более 15 МПа.

В качестве примера рассмотрим результаты исследований генератора ГК-2.5 с $l_{кр}=3,0$ мм, $\beta=20^\circ$, который принят в качестве базового с максимально устойчивыми динамическими параметрами периодически-срывного течения жидкости на всех стадиях его развития. На рисунке 3 приведены закономерности развития размаха автоколебаний от давления подпора, реализуемые генератором в имитаторе фильтрационной части скважины.

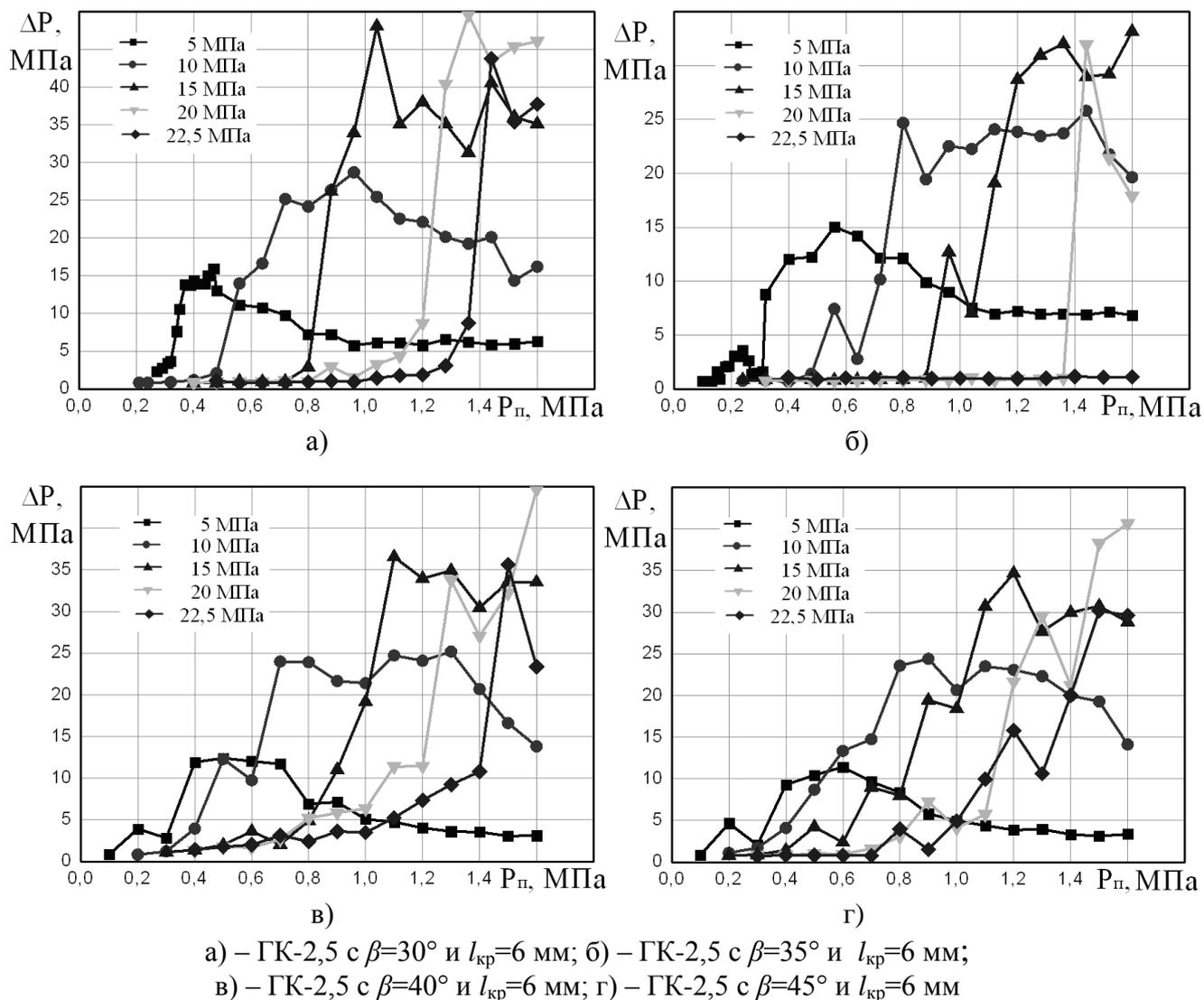


Рисунок 2 – Характер развития размаха автоколебаний периодически-срывного течения жидкости в имитаторе скважины при P_n до 1,6 МПа

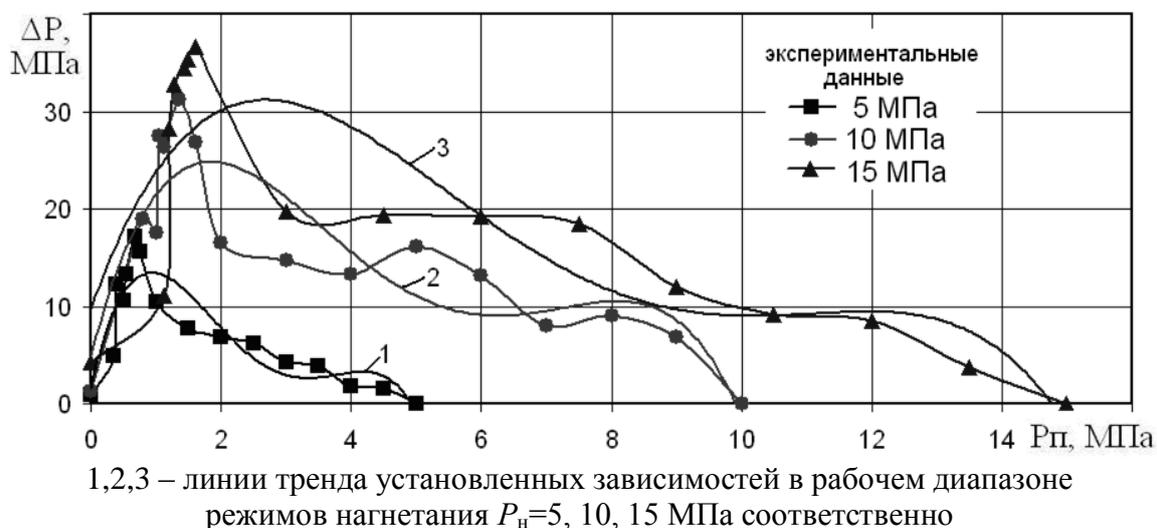


Рисунок 3 – Характер развития и закономерности формирования размаха автоколебаний давления жидкости ΔP в имитаторе скважины при давлении нагнетания $P_n=5; 10; 15$ МПа ГК-2.5 с $l_{кр}=3,0$ мм, $\beta=20^\circ$

Установленные зависимости размаха автоколебаний от давления подпора достаточно точно описываются полиномиальными уравнениями четвертого порядка:

- при $P_n = 5 \text{ МПа}$

$$\Delta P = -0,57P_n^4 + 6,48P_n^3 - 24,14P_n^2 + 30,06P_n + 1,58 \quad R^2 = 0,8 \quad (1)$$

- при $P_n = 10 \text{ МПа}$

$$\Delta P = -0,07P_n^4 + 1,49P_n^3 - 10,63P_n^2 + 25,79P_n + 4,87 \quad R^2 = 0,76 \quad (2)$$

- при $P_n = 15 \text{ МПа}$

$$\Delta P = -0,01P_n^4 + 0,48P_n^3 - 5,21P_n^2 + 18,83P_n + 9,73 \quad R^2 = 0,69 \quad (3)$$

На рис. 4 приведены кривые, характеризующие характер развития частоты следования автоколебаний, от давления подпора жидкости в скважине.

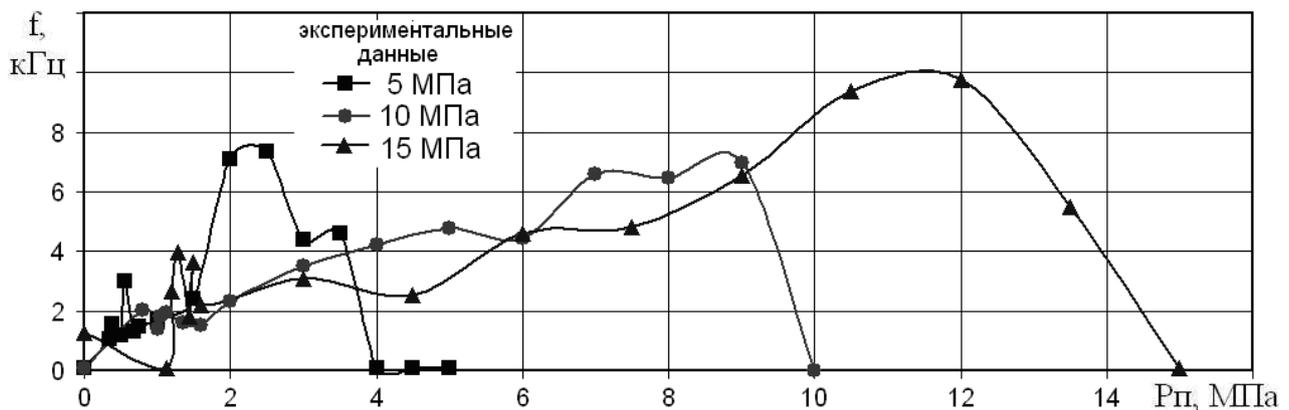


Рисунок 4 – Характер развития частоты следования импульсов f от давления подпора $P_{п}$ при $P_n=5; 10; 15 \text{ МПа}$ ГК-2.5 с $l_{кр}=3,0 \text{ мм}$, $\beta = 20^\circ$

На основании установленных зависимостей можно отметить следующее:

1. Стадии развития кавитационного течения жидкости, от нуля до 1,6 МПа, соответствует скачкообразное изменение частоты следования импульсов;
2. Диапазон роста частоты автоколебаний соответствует устойчивому кавитационному течению жидкости.
3. Стадии затухания кавитационного течения жидкости соответствует диапазон падение частоты пульсаций давления.

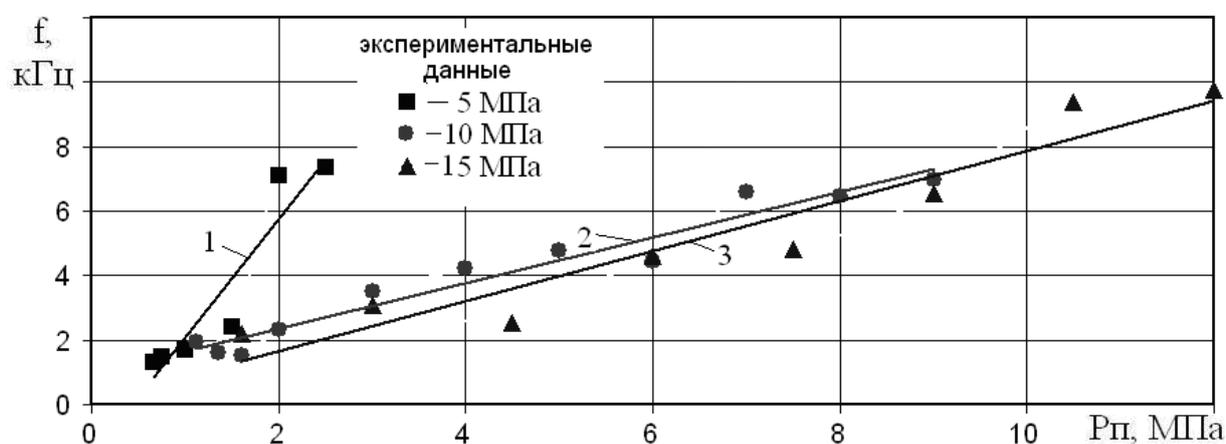
Полученные результаты позволяют установить наиболее устойчивый (рабочий) диапазон периодически срывного течения жидкости, реализуемый генератором ГК2,5 при установившемся режиме нагнетания. Так при исследуемых параметрах генератора ГК-2.5 с $l_{кр}=3,0 \text{ мм}$, $\beta=20^\circ$ при давлении нагнетания 5 МПа процесс зарождения кавитации наблюдается при $P_{п}=0,1 \dots 0,5 \text{ МПа}$, мак-

симум достигается при $P_n \approx 0,9$ МПа, а затухание при $P_n \approx 3,5$ МПа. Рабочий диапазон генератора составляет $0,5 \leq P_n \leq 3,5$ МПа.

При давлении нагнетания 10 МПа процесс зарождения кавитации наблюдается при $P_n = 0,1 \dots 1,0$ МПа, максимум достигается при $P_n \approx 1,7$ МПа, а затухание при $P_n \approx 7,0$ МПа. Рабочий диапазон генератора составляет $1,0 \leq P_n \leq 7,0$ МПа.

При давлении нагнетания 15 МПа стадия зарождения явления кавитации практически отсутствует, устойчивое кавитационное течение жидкости наблюдается практически с момента подачи жидкости на вход генератора. Максимум размаха автоколебаний достигается при $P_n \approx 1,8$ МПа, а затухание процесса начинает проявляться при $P_n \approx 12,0$ МПа. Рабочий диапазон генератора составляет $0,1 \leq P_n \leq 12,0$ МПа.

Вышеотмеченное позволило установить нижнюю и верхнюю границы рабочего диапазона режима нагнетания (рис. 5).



1,2,3 – линии тренда установленных зависимостей в рабочем диапазоне режимов нагнетания $P_n = 5, 10, 15$ МПа соответственно

Рисунок 5 – Закономерности развития частоты следования импульсов f от давления подпора P_n при $P_n = 5; 10; 15$ МПа ГК-2.5 с $l_{кр} = 3,0$ мм, $\beta = 20^\circ$

Установленные зависимости частоты следования размахов автоколебаний при установившемся кавитационном течении жидкости с достаточно высокой точностью описываются линейными уравнениями:

$$\text{- при } P_n = 5 \text{ МПа} \quad f = 3,68P_n - 1,61 \quad R^2 = 0,89 \quad (4)$$

$$\text{- при } P_n = 10 \text{ МПа} \quad f = 0,71P_n + 0,95 \quad R^2 = 0,95 \quad (5)$$

$$\text{- при } P_n = 15 \text{ МПа} \quad f = 0,77P_n + 0,13 \quad R^2 = 0,92 \quad (6)$$

Анализ полученных результатов показывает, что при исследуемых параметрах генератора ГК-2.5 с $l_{кр} = 3,0$ мм, $\beta = 20^\circ$ при давлении нагнетания 5 МПа процесс зарождения кавитации наблюдается при $P_n = 0,1 \dots 0,5$ МПа, максимум достигается при $P_n \approx 0,9$ МПа, а затухание при $P_n \approx 3,5$ МПа. Рабочий диапазон гене-

ратора составляет $0,5 \leq P_n \leq 3,5$ МПа.

При давлении нагнетания 10 МПа процесс зарождения кавитации наблюдается при $P_n = 0,1 \dots 1,0$ МПа, максимум достигается при $P_n \approx 1,7$ МПа, а затухание при $P_n \approx 7,0$ МПа. Рабочий диапазон генератора составляет $1,0 \leq P_n \leq 7,0$ МПа.

При давлении нагнетания 15 МПа стадия зарождения явления кавитации практически отсутствует, устойчивое кавитационное течение жидкости наблюдается практически с момента подачи жидкости на вход генератора. Максимум размаха автоколебаний достигается при $P_n \approx 1,8$ МПа, а затухание процесса начинает проявляться при $P_n \approx 12,0$ МПа. Рабочий диапазон генератора составляет $0,1 \leq P_n \leq 12,0$ МПа.

Таким образом, исходя из приведенных результатов исследований, следует, что глубинам залегания угольных пластов до 700 м соответствуют параметры режима нагнетания жидкости $P_n = 15$ МПа с рабочим диапазоном давления подпора жидкости в скважине $0,1 \leq P_n \leq 12,0$ МПа, в котором частота следования импульсов достигает 10 кГц.

Теперь рассмотрим результаты исследований параметров динамического нагружения угольных пластов, залегающих на глубинах от 700 до 1300 м, что соответствует давлению нагнетания жидкости от 15 до 23 МПа. При этом так же уделим внимание характеру развития периодически-срывного течения жидкости при давлении подпора в фильтрационной части скважины до 1,6 МПа. Для этого сначала рассмотрим результаты исследований базового генератора устройства ГК-2.5 с $l_{кр} = 3,0$ мм, $\beta = 20^\circ$ при $P_n = 15, 20$ и $22,5$ МПа, а затем ГК-2.5 с $l_{кр} = 6$ мм, $\beta = 35^\circ$, т.е. с параметрами отличными от базовой конструкции.

На рис. 6 представлены закономерности формирования размаха автоколебаний ΔP в имитаторе скважины для генератора ГК-2,5 с $l_{кр} = 3$ мм, $\beta = 20^\circ$ при давлении нагнетания $P_n = 15; 20; 22,5$ МПа. Здесь же приведены линии тренда установленных закономерностей, которые достаточно хорошо описываются уравнениями полинома 4-й степени:

- при $P_n = 15$ МПа

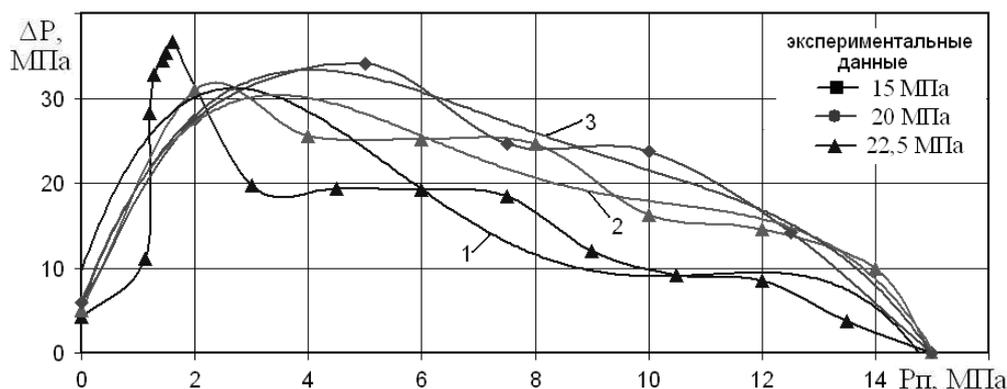
$$\Delta P = -0,014P_n^4 + 0,48P_n^3 - 5,21P_n^2 + 18,83P_n + 9,73 \quad R^2 = 0,69 \quad (7)$$

- при $P_n = 20$ МПа

$$\Delta P = -0,011P_n^4 + 0,36P_n^3 - 4,14P_n^2 + 17,51P_n + 5,99 \quad R^2 = 0,93 \quad (8)$$

- при $P_n = 15$ МПа

$$\Delta P = -0,008P_n^4 + 0,29P_n^3 - 3,59P_n^2 + 17,23P_n + 5,79 \quad R^2 = 0,98 \quad (9)$$



1,2,3 – линии тренда зависимостей при $P_n=15, 20, 22,5$ МПа соответственно

Рисунок 6 – Характер развития и закономерности формирования размаха автоколебаний ΔP , реализуемые генератором ГК-2.5 с $l_{кр}=3$ мм, $\beta=20^\circ$ при $P_n=15; 20; 22,5$ МПа

На рис. 7 приведены результаты, характеризующие частоту следования импульсов автоколебаний f от давления подпора жидкости в имитаторе скважины.

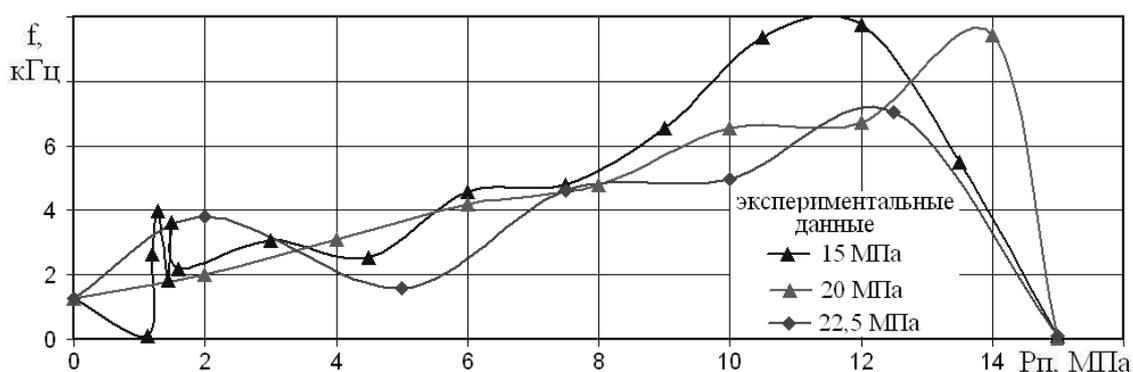
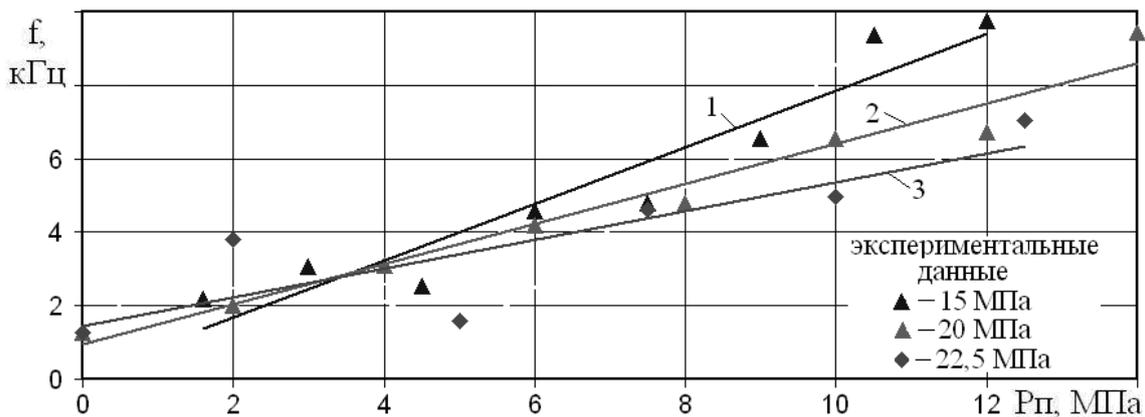


Рисунок 7 – Характер развития частоты следования импульсов f от давления подпора P_n при $P_n=15; 20; 22,5$ МПа ГК-2.5 с $l_{кр}=3$ мм., $\beta=20^\circ$

Анализ установленных закономерностей (см. рис. 6 и 7) показывает, что при увеличении давления нагнетания более 15 МПа явление кавитационного течения жидкости наблюдается сразу при поступлении жидкости на вход генератора. При этом частота следования импульсов автоколебаний уже в начале рабочего диапазона составляют 1,1...1,2 кГц. Это позволяет сделать вывод о том, что при режимах нагнетания под давлением более 15 МПа конструкция генератора, даже при отсутствии давления подпора жидкости в скважине, за счет его работы в затопленной струе жидкости, обеспечивает устойчивый режим холостого хода с амплитудой $\Delta P \approx 5,0$ МПа и частотой $f \approx 1$ кГц, что обеспечивает работу генератора в автономном режиме.

Верхняя граница рабочего диапазона соответствует максимуму частоты следования импульсов (рис. 8), а снижение частоты указывает на затухание явления кавитации и прекращение работы генератора в режиме периодически-сравной кавитации.



1,2,3 – линии тренда зависимостей при $P_n=15, 20, 22,5$ МПа соответственно

Рисунок 8 – Закономерности частоты следования импульсов автоколебаний f от давления подпора при $P_n=15; 20; 22,5$ МПа ГК-2.5 с $l_{кр}=3$ мм, $\beta=20^\circ$

В рабочем диапазоне (рис. 8) закономерность развития частоты автоколебаний от давления подпора описываются линейными уравнениями вида:

- при $P_n=15$ МПа

$$f=0,7P_n+0,13 \quad R^2=0,91 \quad (10)$$

- при $P_n=20$ МПа

$$f=0,55P_n+0,94 \quad R^2=0,97 \quad (11)$$

- при $P_n=22,5$ МПа

$$f=0,39P_n+1,46 \quad R^2=0,73 \quad (12)$$

Теперь проведем анализ результатов исследований генераторов ГК-2.5 с параметрами отличными от его базовой конструкции. Для этого, на примере ГК-2.5 с $l_{кр}=6$ мм, $\beta=35^\circ$ (рис. 9 и 10), рассмотрим изменение динамических параметров периодически-срывного течения жидкости, зарегистрированных в имитаторе скважины.

В качестве примера рассмотрим результаты исследований генератора ГК-2.5 с $l_{кр}=3,0$ мм, $\beta=20^\circ$, который принят в качестве базового с максимально устойчивыми динамическими параметрами периодически-срывного течения жидкости на всех стадиях его развития. На рисунке 3 приведены закономерности развития размаха автоколебаний от давления подпора, реализуемые генератором в имитаторе фильтрационной части скважины.

Как видно из приведенных рисунков, изменение конструктивных параметров генератора приводит к изменению диапазона его рабочего режима. В отличие от базового (рис. 7,8) устойчивый режим холостого хода с амплитудой $\Delta P \approx 5,0$ МПа и частотой $f \approx 1$ кГц переходит в неустойчивый режим развития кавитации с проявлением нижней границы диапазона до 2,0 МПа, а его верхняя

граница снижается с 12 до 8,0 МПа.

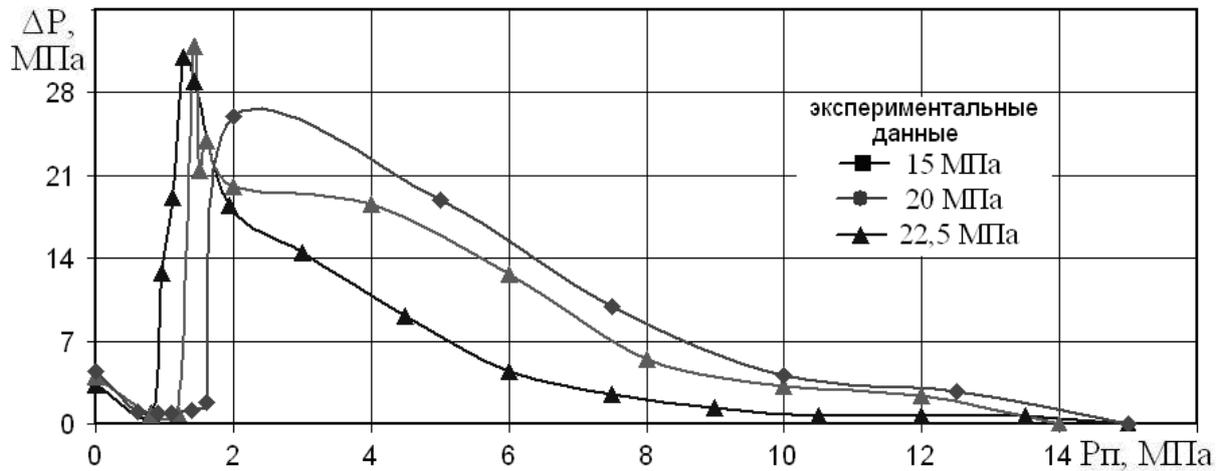


Рисунок 9 – Развитие размаха автоколебаний ΔP при давлении нагнетания $P_{п}=15; 20; 22,5$ МПа за генератором ГК-2.5 с $l_{кр}=6$ мм, $\beta=35^\circ$

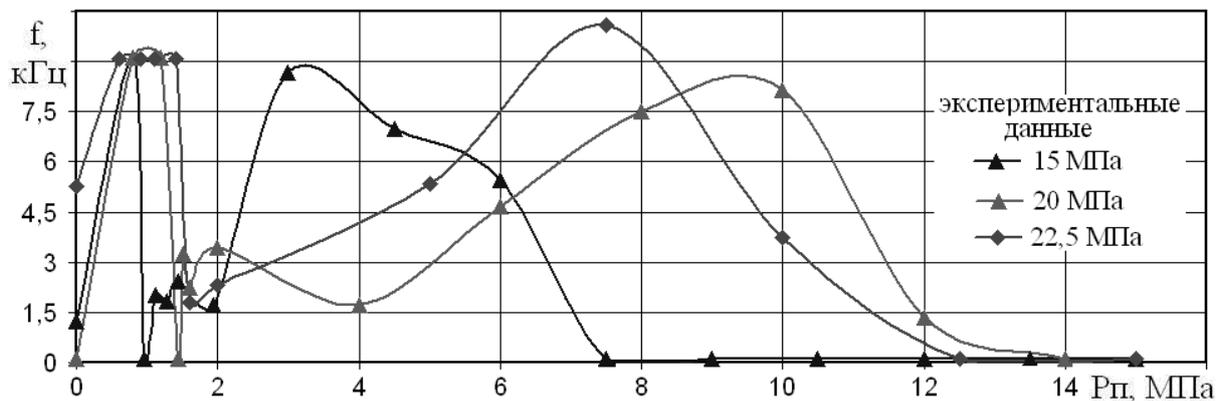


Рисунок 10 – Частота следования импульсов автоколебаний f при давлении нагнетания $P_{п}=15; 20; 22,5$ МПа ГК-2.5 с $l_{кр}=6$ мм., $\beta=35^\circ$

Исходя из полученных результатов исследований параметров динамического нагружения угольных пластов, которые соответствуют условиям их залегания на глубинах от 700 до 1300 м, отметим, что при режимах нагнетания жидкости под давлением 15 МПа и более период зарождения и развития кавитации отсутствует. Устойчивый режим периодически-срывного течения за генератором ГК-2.5 с $l_{кр}=3$ мм, $\beta=20^\circ$ устанавливается сразу при поступлении жидкости на вход генератора, что обеспечивает устойчивый режим холостого хода с амплитудой $\Delta P \approx 5,0$ МПа и частотой $f \approx 1$ кГц. Рабочий диапазон генератора ограничивается только верхней его границей $P_{п} \leq 0,82 P_n$ и составляет $0,01 \leq P_{п} \leq 14,0$ МПа, при этом максимум размаха автоколебаний $\Delta P \approx 32$ МПа достигается при $P_{п} \approx 2,1$ МПа. Затухание процесса кавитации наблюдается при $P_{п} \geq 14,0$ МПа.

Изменение угла раскрытия диффузора генератора и длины его критического сечения, при прочих равных условиях, приводит к резкому снижению эффективности периодически-срывного течения жидкости и параметров динамического нагружения угольного пласта.

Выводы. Исходя из полученных результатов исследования динамических параметров периодически-срывного течения жидкости в имитаторе скважины, при моделировании импульсного нагнетания в условиях залегания угольных пластов на глубинах до 1300 м сделаны следующие выводы.

1. Сопоставление результатов исследований динамических параметров импульсного нагнетания жидкости, реализуемых генератором устройства ГК-2.5 при различных углах раскрытия диффузора ($\beta=20; 30; 35; 40$ и 45 град) и длиной критического сечения ($l_{кр}=3,0; 6,0$ и 30 мм), позволило установить, что наиболее устойчивым и эффективным является процесс преобразования статического течения жидкости в импульсное при конструктивных параметрах генератора ГК-2,5 с $l_{кр}=3,0$ мм и $\beta=20^\circ$.

2. Установлено, что при нагнетании жидкости под давлением 15 МПа, что соответствует условиям залегания угольных пластов на глубинах до 700 м, генератором устройства ГК-2,5 с $l_{кр}=3,0$ мм, $\beta=20^\circ$ в фильтрационной части скважины реализуется периодически-срывное течение жидкости с проявлением стадий развития явления кавитации, устойчивого кавитационного течения жидкости и затухания. Рабочий диапазон генератора составляет $0,1 \leq P_n \leq 12,0$ МПа, так как устойчивое кавитационное течение жидкости наблюдается при $P_n \geq 0,1$ МПа, а затухание при $P_n \geq 12,0$ МПа, при этом максимум размаха автоколебаний $\Delta P \approx 38$ МПа достигается при $P_n \approx 1,8$ МПа;

3. При режимах импульсного нагнетания жидкости под давлением 15...23 МПа, что соответствует условиям залегания угольных пластов на глубинах от 700 до 1300 м, рабочий режим генератора устройства ГК-2,5 с $l_{кр}=3,0$ мм, $\beta=20^\circ$ ограничивается только верхней его границей $P_n \leq 0,82P_n$. Установлено, что этим глубинам соответствует режимы нагнетания 20 МПа. Из условия, что устойчивое кавитационное течение жидкости проявляется непосредственно при подаче жидкости на вход генератора, а затухание при $P_n \geq 14,0$ МПа, рабочий диапазон генератора составляет $0,01 \leq P_n \leq 14,0$ МПа. При этом максимум размаха автоколебаний $\Delta P \approx 32$ МПа достигается при $P_n \approx 2,1$ МПа;

4. Увеличение давления нагнетания жидкости с 15 МПа до 23 МПа приводит к стабилизации периодически-срывного течения жидкости в фильтрационной части скважины, росту значений размаха автоколебаний и верхней границы рабочего диапазона генератора с 10,0 до 14,0 МПа, что повышает эффективность гидровоздействия.

5. Характер развития размаха автоколебаний и частоты их следования показывает, что с увеличением давления нагнетания с 5 до 23 МПа их корреляционная связь с давлением подпора жидкости в фильтрационной части скважины возрастает с $R^2=0,69$ до $R^2=0,98$. При этом параметры динамического нагружения выбросоопасных угольных пластов соответствуют условию $P_n \leq 0,82P_n$, что обеспечивают безопасность ведения горных работ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. СОУ 10.1.001740088-2005. Правила ведения горных работ на пластах, склонных к газодинамическим явлениям: Утв. Минуглепромом Украины. – К.: Минуглепром Украины, 2005. – 225 с.
2. Модель предельного состояния угольного пласта при нагнетании жидкости / В.В. Зберовский, Ю.Е. Поляков, А.В. Пазыннич, А.А. Потапенко, А.А. Ангеловский // Збірник наукових праць НГУ. – Днепропетровск: НГУ, 2011 - № 36, Том № 1. – С. 194-199.
3. Гидроимпульсное воздействие на выбросоопасный угольный пласт / В.В. Зберовский Л.М. Васильев, Д.Л. Васильев, Ю.Е. Поляков // Збірник наукових праць НГУ. – Днепропетровск: НГУ, 2012 - № 37.– С. 47-54.
4. Васильев, Л.М. Гидроимпульсное рыхление угольных пластов при проведении подготовительных выработок / Л.М. Васильев, В.В. Зберовский // Уголь Украины, №2.- 2013. - С. 44-47.
5. Ангеловский, О.А. Обоснование гидродинамических параметров устройства гидроимпульсного рыхления угольных пластов / О.А. Ангеловский: автореферат дис. к-та техн. наук: 05.05.06: защищена 10.04.15: утв. 10.04.15. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2015. – 20 с
6. Методика моделирования процесса импульсного нагнетания жидкости / Л.М. Васильев, В.В. Зберовський, Ю.Е. Поляков [и др.]. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 2014. – 13 с.
7. Провести моделирование процесса импульсного нагнетания жидкости: Отчет НИР, промежуточный (ИГТМ АН УССР); рук. Л.М. Васильев, № ГР 0112U000493; Инв. № 7554. – Днепропетровск, 2014. – 77 с.
8. Цепков, К.В. Программное обеспечения моделирования процесса импульсного нагнетания жидкости в угольные пласты на имитаторе скважины / К.В. Цепков, В.В. Зберовский, А.В. Нечаев // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2005. – 117. –С. 79-87.

REERENCES

1. Ukraine Ministry of Coal Industry (2005), 10.1.001740088-2005. *Pravila vedeniya gornykh robot na plastakh, sklonnykh k gazodinamicheskim yavleniyam: Normativnyu document Minugleproma Ukrainy. Standart* [10.1.001740088-2005 Mining rule in seams prone to gas-dynamic phenomena: Regulatory Document Coal Industry of Ukraine. Standard], Ukraine Ministry of Coal Industry, Kiev, Ukraine.
2. Zberovskiy, V.V., Pazynich, A.V., Polyakov, Yu.E., Potapenko, A.A. and Angelovskiy, A.A.(2011) “The model of a limiting condition of the coal seam at the liquid injection”, *Scientific Collected Works of NMU*, no. 36, Vol. № 1., pp. 194-199.
3. Zberovskiy, V.V., Vasilyev, L.M., Vasilyev, D.L. and Polyakov, Yu.E. (2012) “The hydroimpulsive influence on the outburst coal layer”, *Scientific Collected Works of NMU*, no. 37, Vol. № 1., pp. 47-54/
4. Vasilyev, L.M. and Zberovskiy, V.V. (2013), “Hydropulsive loosening of coal layers in the preparatory developments workings ”, *Coal of Ukraine*, no. 2, pp. 44-47.
5. Angelovskiy, A.A. (2015), “Substantiation of hydrodynamic parameters of hydroimpulsive device of coal seams loosening”, Abstract of Ph.D. dissertation; Geotechnical and mine mechanics, Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine.
6. Vasilyev, L.M., Zberovskiy, V.V., Polyakov, Yu.E. & others (2014), *Metodika modelirovaniay protsesa impulsnogo nagnetaniya zhydkosti* [The methodology of modeling process of impulsive fluid injection], M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine.
7. Vasilyev, L.M. (et) (2014), “Spend modeling of process impulse liquid injection”, Intermediate research report, no. GR 0112U000493, Inv. No. 7554, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine Dnepropetrovsk, Ukraine.
8. Tsepkov, K.V., Zberovskiy, V.V. and Nechayev, A.V.(2014), “Software for simulating impulse fluid injection the coal beds on the borehole simulator”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 117, pp. 79-86.

Об авторах

Зберовский Василий Владиславович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе Проблем разрушения горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, avalansh@ua.fm .

Наривский Роман Николаевич, магистр, младший научный сотрудник в отделе Проблем разру-

шения горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, avalansh@ua.fm.

Поляков Юрий Евгеньевич, аспирант, ведущий инженер в отдел Проблем разрушения горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, ZoRTFA@mail.ru.

About the authors

Zberovskiy Vasyl Vladislavovych, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Rock Breaking Problems, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, avalansh@ua.fm.

Narivskiy Roman Nikolaevich, Master of Sciences, Junior Researcher in Department of Rock Breaking Problems, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine.

Polyakov Yuriy Evgenevich, Master of Sciences, Doctoral Student, principal engineer in Department of Rock Breaking Problems, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, ZoRTFA@mail.ru.

Анотація. У приведеній статті розглядається взаємозв'язок закономірності формування частоти та розмаху автоколивань рідини у імітаторі свердловини при низькому тиску підпору, а саме до 1,6МПа. Ці дослідження проводились з метою виявлення зародження кавітаційної течії рідини на ранніх стадіях, а саме визначення та уточнення процесів, які відбуваються до встановленого робочого режиму. Аналіз отриманих результатів доводить, що зміна кута розкриття дифузора призводить до зміни розмаху та частоти автоколивань, але характер та якісна картина їх зміни залишаються колишніми. Так при вмиканні насосної установки й відсутності тиску підпору, незалежно від кута розкриття дифузора спостерігається встановлене значення розмаху і частоти автоколивань. Ці значення відповідають початковим (власним) значенням генератора, які можна позначити як нульовий або холостий режим роботи генератора. Під час проведених випробувань було виявлено, що найбільш стійким й ефективним є процес перетворення статичної течії рідини в імпульсний при конструктивних параметрах генератора ГК-2,5 з $l_{кр} = 3,0$ мм та $\beta = 20^\circ$.

Ключові слова: генератор кавітації рідини, низький тиск підпору, параметр кавітації, конструктивні параметри, кут розкриття дифузора.

Abstract. This article examines the relationship of patterns of formation of frequency and liquid amplitude of self-oscillation in the simulator borehole at low backup pressure, namely to 1.6 MPa. These studies were carried out to determine the initiation of the cavitation process of liquid flow in the early stages that occur before the steady operating mode. Analysis of the findings shows that the change in the opening angle of the diffuser leads to a change in the range and frequency of self-oscillation, although the nature of quality of the picture changes remains the same. So at startup pumping unit and in the absence of backup pressure, independently of the opening angle of the diffuser there are established range and frequency of self-oscillation. These values correspond to the initial (its own) value of the generator, which can be defined as zero or idling operation of the generator. During conducted tests it was found that the most sustainable and efficient is the process of converting a static flow in a pulse at the constructive parameters of generator GK-2.5 with $l_{кр} = 3,0$ mm and $\beta = 20^\circ$.

Keywords: generator of cavitation, liquid, low backup pressure, cavitation parameter, constructive parameters, the opening angle of the diffuser.

Статья поступила в редакцию 20.10.2015

Рекомендовано к печати д-ром технических наук Васильевым Л.М.