

УДК 622.001.5:621.313.12-752

Зберовский В.В., канд. техн. наук, ст. научн. сотр.
(ИГТМ НАН Украины)

РАЗВИТИЕ ИНЖЕНЕРНОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Зберовський В.В. канд. техн. наук, ст. наук. співр.
(ИГТМ НАН України)

РОЗВИТОК ІНЖЕНЕРНОГО МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГІДРОІМПУЛЬСНОЇ ДІЇ

Zberovskiy V.V. Ph.D. (Tech.), Senior Researcher
(IGTM NAS of Ukraine)

THE DEVELOPMENT OF ENGINEERING METHODS OF CALCULATION OF DYNAMIC PARAMETERS OF HYDROIMPULSIVE INFLUENCE

Аннотация. В статье приведены результаты теоретического и экспериментального методов расчета динамических параметров гидроимпульсного воздействия на выбросоопасные угольные пласты. На основании проведенных исследований обоснованы динамические параметры и рабочие диапазоны импульсных режимов нагнетания жидкости, усовершенствована математическая модель инженерного метода расчета частоты и размаха кавитационных автоколебаний. Установлено, что закономерность изменения максимумов размаха автоколебаний от давления подпора жидкости в скважине, характеризует изменение гидросопротивления угольного пласта в процессе его гидрорыхления и описывается параболической зависимостью второй степени. Определено, что параметры динамического нагружения угольных пластов в импульсном режиме нагнетания удовлетворяют условиям гидрорыхления выбросоопасных пластов.

Ключевые слова: гидроимпульсное воздействие, угольный пласт, режим нагнетания, частота и размах автоколебаний, рабочий диапазон.

Актуальность. В комплексе мер по предотвращению газодинамических явлений (ГДЯ) из локальных мероприятий наибольшее развитие получил способ гидрорыхления. Однако опыт его многолетнего применения, особенно в условиях больших глубин, показывает, что нагнетание жидкости в статическом режиме не исключает вероятность провоцирования ГДЯ [1, 2]. Поэтому в опасных зонах выработки проводятся с помощью буровзрывных работ в режиме сотрясательного взрывания. Это приводит к значительному росту затрат на подготовительные работы и снижению скорости проведения выработок более чем в два раза.

Разработанное в ИГТМ НАН Украины устройство гидроимпульсного воздействия (УГИВ) и его использование в комплексе шахтного оборудования при гидрорыхлении угольных пластов позволило устранить недостатки статического нагнетания жидкости [3]. При гидроимпульсном воздействии кратковремен-

ность действия высокого давления жидкости порождает в упругой среде угольного пласта переменное напряжение, которое, не перегружая массив угля в целом, обеспечивает образование системы разветвленных микротрещин. Развитие дефектов (трещинообразование) происходит только при взаимодействии полей напряжений, концентрирующихся в этих дефектах, с амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ) устройства (размах автоколебаний, их частота и длительность импульса). Поэтому надежность работы УГИВ зависит от достоверности расчета параметров устройства и АЧХ генератора в его рабочем диапазоне. До настоящего времени определение этих параметров затруднительно, так как связано с необходимостью моделирования импульсного нагнетания жидкости на гидравлическом стенде.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований.

1. Обоснование динамических параметров импульсных режимов нагружения угольных пластов.

Одной из нерешенных задач в исследованиях импульсного нагнетания жидкости является определение рабочих режимов динамического нагружения угольных пластов в пределах изменения модуля упругости угля. Под рабочим режимом динамического нагружения понимается импульсный режим нагнетания с постоянным давлением нагнетания и расходом жидкости через генератор устройства, при которых, в диапазоне изменения давления подпора за генератором, в фильтрационной части скважины обеспечиваются минимально необходимые значения импульсов давления и частота их следования.

Теоретическое обоснование параметров импульсного нагружения угольных пластов приведено в работе [4], где с учетом того, что при гидроимпульсном воздействии отсутствует скважность импульсов, скорость развития деформаций выражена в виде

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\Delta P \cdot f}{E}. \quad (1)$$

где ε – линейная деформация угля, с^{-1} ; ΔP – величина импульса, МПа; f – частота следования импульсов, с^{-1} ; E – модуль упругости угля, МПа.

Из исследований несущей способности горных пород [5] известно, что их прочностные свойства определяются сопротивляемостью материала сдвигу, параметрами внутреннего и контактного (внешнего) трения. С изменением угла внутреннего трения меняется и несущая способность хрупкого тела. В углепородном массиве снижение внутреннего трения приводит к нарушению равновесия между силами сцепления горных пород, горизонтальной и вертикальной составляющими горного давления и зарождению предельных касательных напряжений. При достижении критических значений скорости развития деформаций инициируется развитие деформаций сдвига, то есть трещинообразование.

Отличительной особенностью трещин сдвига является то, что они образуются в точке концентрации максимальных касательных напряжений под различными углами наклона к напластованию. Поэтому эффект высокочастотной гидроимпульсной вибрации, возникающий в диапазоне рабочего режима дина-

мического нагружения, приводит к инициированию деформации сдвига и развитию разнонаклонных трещин в пласте.

Известно, что спад прочности углей при горных ударах или внезапных выбросах, наблюдается в интервале развития деформаций $1 \leq \dot{\epsilon} \leq 10 \text{ с}^{-1}$ [6]. При скорости развития деформаций более 10 с^{-1} инициируются деформации сдвига. Тогда для предельного случая при $\dot{\epsilon} = 10 \text{ с}^{-1}$, из выражения (1) получим

$$\Delta P = \frac{10E}{f}. \quad (2)$$

По установленной зависимости (2) для значений модуля упругости угля $E = 3 \cdot 10^2$ МПа; $5 \cdot 10^2$ МПа (по напластованию слоев угля) и $E = 2 \cdot 10^3$ МПа (перпендикулярно напластованию) установлены минимально необходимых значений импульсов давления от частоты их следования (рис.1).

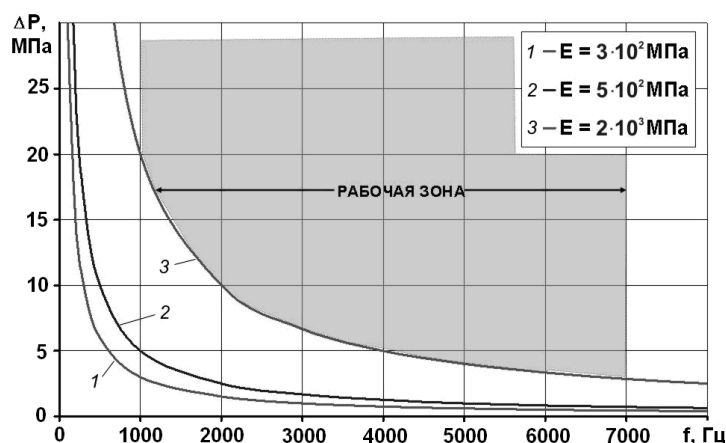


Рисунок 1 – Теоретические зависимости минимальных значений импульсов давления ΔP от частоты их следования f для различных значений модуля упругости угля $E = 3 \cdot 10^2$ МПа; $5 \cdot 10^2$ МПа; и $2 \cdot 10^3$ МПа.

Анализ полученных результатов показывает, что для инициирования развития деформаций сдвига минимально необходимые значения импульсов давления в рабочих режимах импульсного нагнетания должны составлять по величине импульса 20...3 МПа соответственно частоте их следования от 1 до 7 кГц.

Таким образом, исходя из установленных закономерностей, значения частоты и размаха автоколебаний превышающие значения предельного случая развития деформации при $\dot{\epsilon} = 10 \text{ с}^{-1}$ (рис.1. рабочая зона), будут обеспечивать инициирование трещинообразования в наиболее сложных (перпендикулярно напластованию) условиях.

2. Математическая модель инженерного метода расчета частоты и размаха кавитационных автоколебаний.

Первые результаты математических расчетов некоторых динамических параметров кавитационного процесса приведены в работе [7]. В работе [8] при расчетах зависимостей частоты и размаха автоколебаний от параметра кавита-

ции (τ) используется аналитическая модель расчета, в которой при проведении исследований параметр кавитации определялся как отношение давления подпора P_n к давлению жидкости на входе генератора P_H ($\tau=P_n/P_H$).

В практике ведения горных работ при гидрорыхлении выбросоопасных угольных пластов [1] за критерий оценки достаточности гидровоздействия и его эффективности принято падение давления нагнетаемой жидкости не менее чем на 30% от максимально установленного. При импульсном нагнетании таким параметром является падение давления подпора жидкости в фильтрационной части скважины. Учитывая, что при гидровоздействии на угольный пласт проникновению жидкости в массив, кроме гидросопротивления угля препятствуют силы горного давления и давления газа, накопленного в массиве, изменение давления подпора жидкости в скважине будем рассматривать в расширенном диапазоне $P_n=(0,01-0,7)P_H$.

При моделировании импульсного нагнетания на имитаторе скважины с генератором устройства ГК-2,5 при различных режимных параметрах было установлено, что устойчивое периодически-срывное течение жидкости наблюдается в диапазоне $0,012 \leq \tau \leq 0,82$. Ранее, при расчетах параметров [7] считалось, что кавитационный режим течения жидкости прекращается при достижении граничного значения $\tau_{\max}=P_n/P_H=1$ ($P_H=P_n$), т.е. тогда, когда течение жидкости отсутствует. Поэтому, основываясь на результатах моделирования, для достоверности расчета ожидаемых частот и размахов автоколебаний давления жидкости, генерируемых ГК-2.5, вместо граничного значения $\tau_{\max}=1$ в математической модели расчета динамических параметров принимается значение $\tau_{\max}=0,82$. Тогда уравнения по определению частоты, длины кавитационной полости и модифицированного числа Струхалия [7] приобретают вид:

$$f = \frac{v_{кр} \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}{r_{кр} \sqrt{\mu}} \cdot \left(1 - \sqrt{0,82 - P_n/P_H}\right), \quad (3)$$

$$l_k = \frac{r_{кр}}{\operatorname{tg} \frac{\beta}{2}} \cdot \left(\sqrt{\frac{\mu}{1 - \sqrt{0,82 - P_n/P_H}}} - 1 \right), \quad (4)$$

$$Sh_m = \sqrt{1 - \sqrt{0,82 - P_n/P_H}} - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \left(1 - \sqrt{0,82 - P_n/P_H}\right), \quad (5)$$

где $v_{кр}$ – скорость жидкости в критическом сечении генератора, м/с; β – угол раскрытия диффузора генератора, град; $r_{кр}$ – радиус критического сечения генератора, м; μ – коэффициент расхода генератора.

В данном случае число Струхалия (Sh) рассчитывается с учетом развития процесса кавитации.

Используя расчетную схему для определения амплитуд кавитационных автоколебаний давления [7] была получена формула в виде

$$|\delta P_l| = \rho \cdot v_{кр}^2 (2\pi)^2 Sh_m^2 \frac{I_d}{\sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2 \cdot v_{с.кр}^2 \cdot I_d^2 \cdot F_2^2}{l_k^2 \cdot c^2}}} \cdot \frac{|\delta V_k|}{l_k^2}, \quad (6)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³; I_d – коэффициент инерционного сопротивления участка диффузора генератора колебаний, расположенного между новой оседлой каверной и выходом из диффузора, м⁻¹; δV_k – амплитуды колебаний объема оседлой кавитационной каверны в момент отрыва, МПа; l_k – длина кавитационной каверны, м; F_2 – площадь выходного сечения диффузора генератора, м²; c – скорость звука в жидкости, м/с.

3. Обоснование рабочего диапазона динамических параметров режимов импульсного нагружения угольных пластов.

Теоретически было установлено, что значения импульсов давления, создаваемые УГИВ при гидроимпульсном рыхлении угольных пластов должны быть не менее 20...3 МПа соответственно частоте их следования от 1 до 7 кГц. С учетом этого, значения параметров импульсного нагнетания, превышающие их минимальные величины (рис. 1), следует отнести к значениям параметров, которые составляют диапазон рабочей зоны режима нагнетания жидкости.

Таким образом, можно считать, что установленные параметры режимов гидроимпульсного воздействия являются научно обоснованными. Следовательно, в установленном диапазоне рабочей зоны параметрам разрушения (инициирования трещинообразования) должны соответствовать определенные гидравлические и гидродинамические параметры режимов нагнетания.

Результатами промышленных исследований технических средств гидроимпульсного воздействия установлено, что гидравлическим параметра импульсного нагнетания соответствуют параметры насосных установок, которые создают давление нагнетания до 32 МПа при расходе жидкости до 60 л/мин. Минимальное давление нагнетания соответствует давлению срабатывания клапана гидрозатвора «Таурус» – 5 МПа.

Так как критерием контроля гидроимпульсного воздействия является падение давления жидкости в фильтрационной части скважины, нам необходимо установить соответствие диапазона этого параметра $P_{п}=(0,01-0,7)P_{н}$ исследуемой рабочей зоне. За минимальное значение давления подпора целесообразно принять 1 МПа – давление, которое соответствует критерию максимально безопасного значения давления газа в угольном пласте при снижении его выбросоопасности, а за максимальное – 12 МПа, которое соответствует величине статического давления на глубине 1200 м и теоретически соответствует давлению газа в угольных пластах, залегающих на этих глубинах.

Установленные значения рабочего диапазона, позволили, используя зависимости (3-6) произвести теоретические расчеты динамических параметров, которые реализуются ГК-2,5 (рис. 2), и его АЧХ для различных значений модуля упругости угля (рис.3) при различных режимах нагнетания.

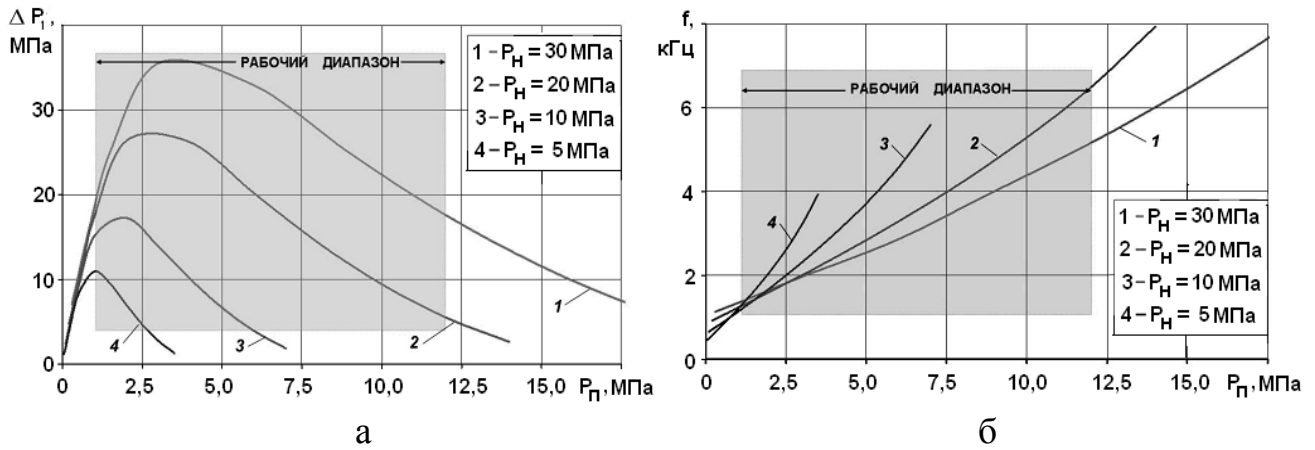


Рисунок 2 – Теоретические зависимости размаха – а и частоты – б от давления подпора в рабочем диапазоне режимов нагнетания $P_H=5, 10, 20, 30$ МПа

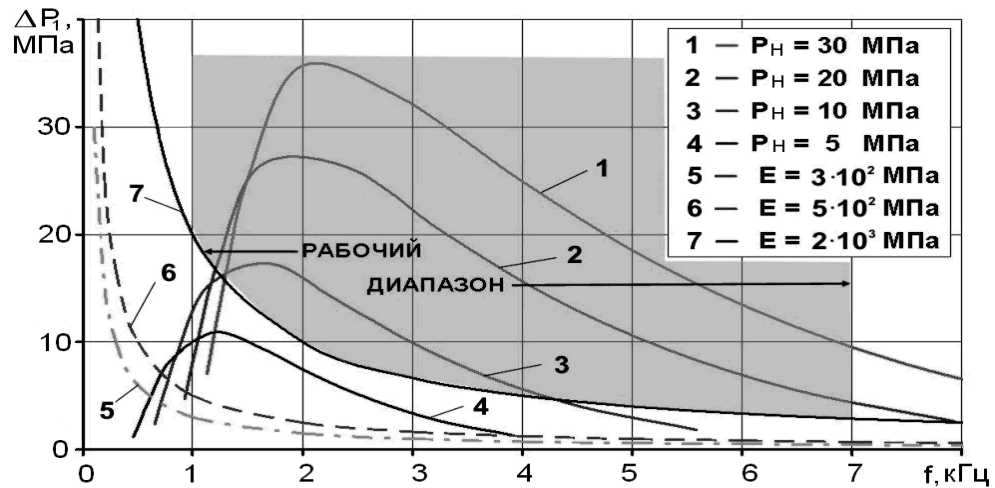


Рисунок 3 – Сопоставление минимальных значений импульсов давления от частоты их следования и АЧХ генератора ГК-2,5 для различных значений модуля упругости угля

При теоретических расчетах параметров динамического нагружения были приняты следующие значения: угол расширения струи $\alpha = 1,35^\circ$, скорость звука в жидкости $c = 1100$ м/с, коэффициент расхода жидкости $\mu = 0,95$; давление насыщенных паров $P_k=0,0024$ МПа, длина трубопровода после генератора $l=1,0$ м.

Анализируя полученные результаты, отметим следующее:

- зависимости размаха автоколебаний давления ΔP_1 на выходе из генератора от давления подпора $P_{п}$, рассчитанные по (6), при различных режимах нагнетания имеют четко выраженный максимум (рис. 2, а), который с увеличением давления нагнетания смещается вправо и в 1,2...2,2 раза превышает давление жидкости на входе генератора;

- зависимости частоты следования автоколебаний f от давления подпора $P_{п}$, рассчитанные по (3), независимо от режима нагнетания, имеют вид близкий к линейной (рис. 2, б). Для фиксированного значения давления подпора $P_{п}$ увеличение давления нагнетания P_H приводит к снижению частоты.

- сопоставление АЧХ генератора устройства с модулем упругости угля

(рис.3) позволяет в установленном рабочем диапазоне определить рациональный режим нагнетания жидкости и соответствующие ему значения параметров динамического нагружения. Например, при $P_H=20$ МПа и $E=2 \cdot 10^3$ МПа рабочему диапазону размаха автоколебаний от 17 МПа до 5 МПа соответствует диапазон частот от 1100 до 7000 Гц.

4. *Экспериментальный метод инженерного расчета частоты и размаха кавитационных автоколебаний.*

Использование математической модели инженерного метода при расчете частоты и размаха кавитационных автоколебаний по значениям инструментальных измерений, полученных при моделировании гидроимпульсного воздействия, позволило установить их численные значения.

В качестве примера для сопоставления результатов теоретического и экспериментального методов расчета параметров динамического нагружения на рис. 4 приведены установленные зависимости размаха и частоты автоколебаний от давления подпора для импульсных режимов при $P_H=10$ и 20 МПа. Относительная погрешность зависимостей частоты и размаха автоколебаний от давления подпора не превышает 10% для частоты и 20% для размаха автоколебаний.

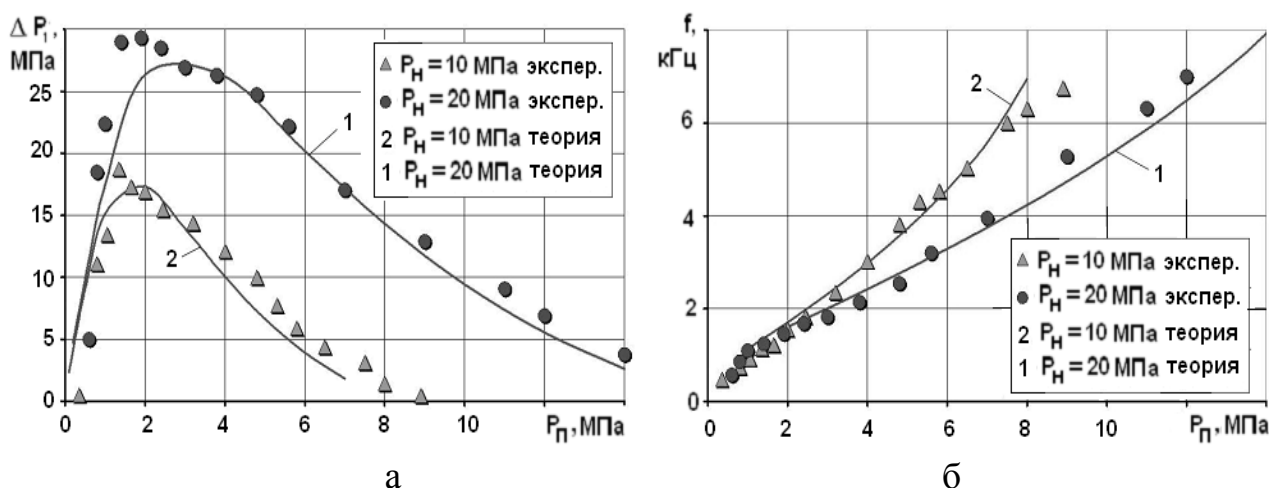


Рисунок 4 – Теоретические и экспериментальные зависимости размаха ΔP_1 – а и частоты f – б от давления подпора P_n при $P_H=10$ и 20 МПа

5. *Практическая значимость результатов исследований.*

Совершенствование способов, средств и методов расчета параметр импульсного нагнетания жидкости с целью предотвращения ГДЯ имеет важное практическое значение. В соответствии с «Правилами ...» [1] расчетная величина давления нагнетания жидкости при гидрорыхлении должна составлять $P_H=(0,75 \dots 1,0)\gamma H$. Для гидроимпульсного воздействия за граничное (максимальное) значение давления нагнетания принимается минимальное значение гидроразрыва пласта $P_H=0,75 \gamma H$. Исходя из этого условия, давление нагнетаемой жидкости на входе в генератора устройства, например, для глубины $H=1000$ м должно составлять не более 22 МПа.

Из полученных нами расчетов, как экспериментальных, так и теоретических

(рис.3) следует, что установленные параметры динамического нагружения угольных пластов при давлении жидкости на входе генератора $10 \leq P_H \leq 22$ МПа в рабочем диапазоне изменения давления подпора P_n от 1 до 12 МПа удовлетворяют условиям гидрорыхления выбросоопасных пластов.

Рассмотрим теперь характера изменения параметров динамического нагружения при различных режимах импульсного нагнетания жидкости. Здесь необходимо обратить внимание на следующие.

Рост максимумов размаха автоколебаний давления происходит одновременно с увеличением давления нагнетания и давления подпора жидкости в скважине. Так, при давлении нагнетания $P_H=5,0$ МПа максимальным значениям размаха автоколебаний соответствует давление подпора $P_n=1,0$ МПа, при $P_H=10,0$ МПа – значение $P_n=2,0$ МПа, при $P_H=20,0$ МПа – значение $P_n=2,5$ МПа, а при $P_H=30,0$ МПа – значение $P_n=3,0$ МПа (см. табл. 1*). При этом с их ростом наблюдается и рост частоты. Так при $P_H=5$ МПа максимальному значению $\Delta P_{1\max}=10,89$ МПа соответствует частота $f=1196$ Гц. При $P_H=10$ МПа значению $\Delta P_{1\max}=17,28$ МПа соответствует частота $f=1700$ Гц, при $P_H=20$ МПа значению $\Delta P_{1\max}=26,36$ МПа соответствует частота $f=1810$ Гц и при $P_H=30$ МПа значению $\Delta P_{1\max}=35,51$ МПа соответствует частота $f=1963$ Гц.

Из полученных результатов следует вывод, что в установленной рабочей зоне при различных режимах импульсного нагнетания наблюдается закономерность изменения максимумов размаха автоколебаний от давления подпора жидкости в скважине, которая характеризует изменение гидросопротивления угольного пласта в процессе его гидрорыхления (рис.5).

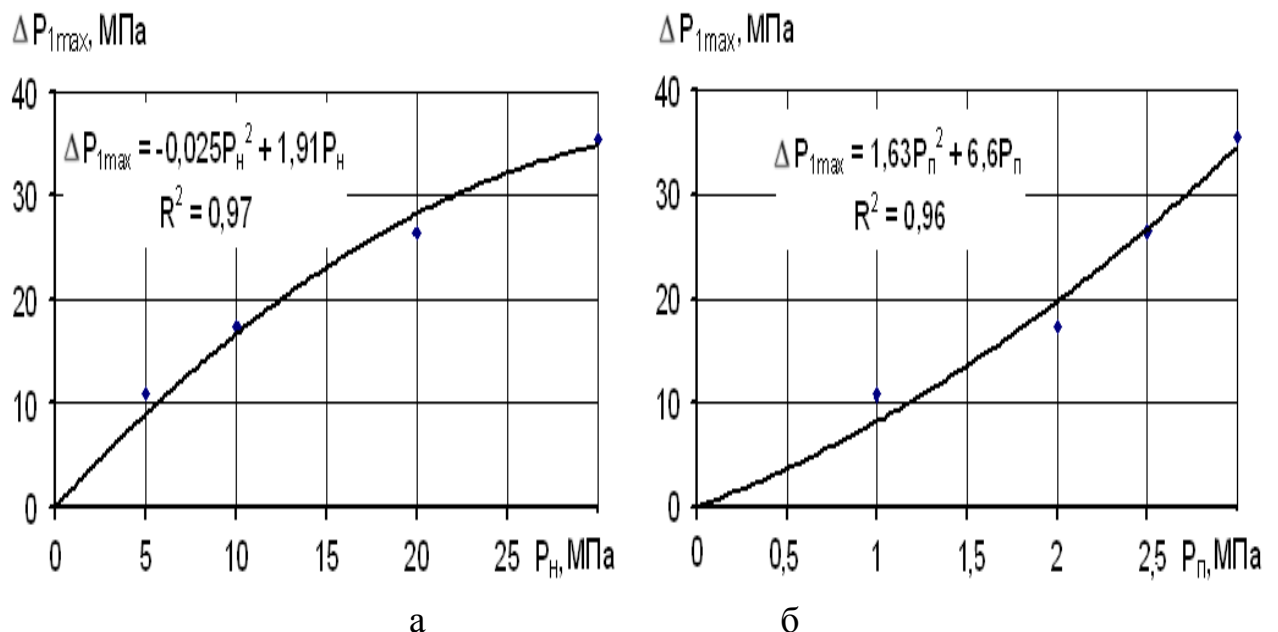


Рисунок 5 – Закономерности изменения максимумов размаха автоколебаний от давления нагнетания – а) и давления подпора жидкости в скважине – б)

Таблица 1 - Результаты расчета размаха автоколебаний и частоты их следования при различных режимах нагнетания

$P_H = 5$ МПа			$P_H = 10$ МПа			$P_H = 20$ МПа			$P_H = 30$ МПа		
P_n , МПа	ΔP_1 , МПа	f , Гц	P_n , МПа	ΔP_1 , МПа	f , Гц	P_n , МПа	ΔP_1 , МПа	f , Гц	P_n , МПа	ΔP_1 , МПа	f , Гц
0,05	1,18	459	0,1	2,36	652	0,2	4,71	926	0,3	7,05	1130
0,15	2,93	532	0,3	5,82	756	0,6	11,46	1075	0,9	16,93	1311
0,25	4,63	607	0,5	9,07	862	1,0	17,41	1225	1,5	25,15	1495
0,5	8,23	797	1	15,11	1133	2,5	26,36	1810	3	35,51	1963
1	10,89	1196	2	17,28	1700	4	26,19	2416	6	32,90	2860
1,5	9,43	1627	3	13,93	2312	6	20,16	3285	9	24,89	4008
2	6,97	2096	4	10,03	2979	8	14,31	4233	12	17,58	5163
2,5	4,66	2617	5	6,64	3719	10	9,42	5285	15	11,55	6447
3	2,75	3213	6	3,90	4566	12	5,53	6488	18	6,77	7915
3,5	1,30	3929	7	1,84	5583	14	2,61	7934	21	3,19	9678

* в таблице приведены прореженные данные исследования ГК-2,5 на имитаторе скважины

Установленные закономерности изменения максимумов размаха автоколебаний в зависимости от значений давления нагнетания жидкости и давления подпора в скважине описываются параболическими кривыми второй степени:

$$\Delta P_{1max} = -0,025 P_n^2 + 1,91 P_n \quad R^2 = 0,97, \quad (7)$$

$$\Delta P_{1max} = 1,63 P_n^2 + 6,6 P_n \quad R^2 = 0,96. \quad (8)$$

Коэффициент детерминации $R^2 \geq 0,96$ свидетельствует о высокой степени достоверности полученных результатов.

Полученные зависимости позволяют в дальнейшем, не проводя длительных экспериментальных исследований при моделировании процесса импульсного нагнетания жидкости, с достаточно высокой точностью проводить расчеты режимных параметров гидроимпульсного воздействия.

По зависимости (7) рассчитывается значение давления нагнетания жидкости на входе генератора, при котором обеспечиваются максимальные значения размаха автоколебаний, а по зависимости (8), исходя из значений давления подпора жидкости в скважине, ведется контроль режима нагнетания.

Выводы. Развитие инженерного метода расчета динамических параметров импульсного нагнетания жидкости позволило установить закономерности изменения максимумов размаха автоколебаний в зависимости от его режимных параметров. При этом установлено что:

- параметры динамического нагружения выбросоопасных угольных пластов для предельного случая скорости развития деформации ($\dot{\epsilon} = 10 \text{ с}^{-1}$) и трещинообразования позволили обосновать минимально необходимые значения импульсов давления в диапазоне 20...3 МПа соответственно частоте их следования от 1 до 7 кГц;

- в рабочем диапазоне режимов гидроимпульсного воздействия значения размаха автоколебаний ΔP_1 генерируемых устройством превышают их минимальные величины: при сжатии по напластованию ($E = 3 \cdot 10^2$ и $5 \cdot 10^2$ МПа) $\Delta P_{1min} = 6...1$ МПа, а перпендикулярно напластованию ($E = 2 \cdot 10^3$ МПа) $\Delta P_{1min} = 16...3$ МПа;

- в принятом диапазоне исследований рабочей зоны режимов гидроимпульсного воздействия максимальные значения размаха автоколебаний ΔP_{1max} на выходе из генератора в 1,2...2,2 раза превышают давление нагнетания. При этом с ростом давления нагнетания P_n значения ΔP_{1max} сдвигаются вправо в сторону увеличения подпора $P_{п}$;

- параметры динамического нагружения угольных пластов в импульсном режиме нагнетания при давлении жидкости на входе генератора устройства $10 \leq P_n \leq 22$ МПа в рабочем диапазоне изменения давления подпора $P_{п}$ от 1 до 12 МПа удовлетворяют условиям гидрорыхления выбросоопасных пластов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Бойко, Я.Н. Повышение эффективности гидрорыхления выбросоопасных угольных пластов в

подготовительных выработках и нишах / Я.Н. Бойко, А.В. Никифоров, А.А. Рубинский // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. науч. тр. / МакНИИ. – Макеевка: Донбасс, 2009. – №2 (24). – С. 52-57.

3. Васильев, Л.М. Гидроимпульсное рыхление угольных пластов при проведении подготовительных выработок / Л.М. Васильев, В.В. Зберовский // Уголь Украины - №2.- 2013. - С. 44-47.

4. Жулай, Ю.А. Теоретическое обоснование динамических параметров импульсного нагнетания жидкости в угольный пласт / Ю.А. Жулай, А.А. Ангеловский, Д.Л. Васильев / Науковий вісник НГУ. – 2012. – № 3 (129). – С. 26-30.

5. Мохначев, М.П. Динамическая прочность горных пород / М.П. Мохначев, В.В. Присташ. – М.: Наука, 1982. – 142 с.

6. Лодус, Е.В. Влияние скорости деформирования на прочность и хрупкость удароопасных углей и каменной соли / Е.В. Лодус, С.Л. Романовский // Горное давление и горные удары. – Л.: ВНИИ горной геомеханики и маркшейдерского дела, 1976. – №. 99. – С. 151-154.

7. Пилипенко, В.В. Кавитационные автоколебания / В.В. Пилипенко. – К.: Наукова думка, 1989. – 316 с.

REFERENCES

1. Ukraine Ministry of Coal Industry (2005), *10.1.001740088.011:2005. Pravila vedeniya gornikh robot na plastakh, sklonnikh k gazodinamiceskim yavleniyam*: [10.1.001740088:2005. Rules of Mining on Layers Prone to Gas-Dynamic Phenomena], Ukraine Ministry of Coal Industry, Kyiv, Ukraine.

2. Boyko, Ya.I., Nikiforov, A.V. and Rubinskyi, A.A. (2009), “Increase of efficiency of hydro loosening of outburst-prone coal layers in development working and in niches”, *Sbornyk nauchnikh trudov MakNII*, no.2 (24), pp. 52-57.

3. 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.

4. Zhulay, Yu.A., Angelovskiy, A.A. and Vasilyev, D.L. (2012) “Theoretical substantiation of dynamical parameters of impulse injection of a fluid into a coal bed”, *Scientific Bulletin of NMU*, no 3 (129), pp. 26-30.

5. Mohnachev, M.P. and Pristash, V.V. (1982), *Dinamicheskaya prochnost gornykh porod* [Dynamic strength of rocks], Science, Moscow, SU

6. Lodus, E.V. and Romanovskiy, S.L (1976), “The influence deformation rate on the strength and fragility impact dangerous coal and rock salt”, *Gornoe davlenie i gornyue udary, VNII gornoy geomehaniki i marksheyderskogo dela*, no 99, pp. 151-154.

7. Pilipenko, V.V. (1989), *Kavitatsionnye kolebaniya* [Cavitations self-oscillation], Naukova dumka, Kiev, SU.

Об авторе

Зберовский Василий Владиславович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина.

About the author

Zberovskiy Vasily Vladislavovich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine.

Анотація. В статті наведено результати теоретичного та експериментального методів розрахунку динамічних параметрів гідроімпульсної дії на викидонебезпечні вугільні пласти. На підставі проведених досліджень обґрунтовані динамічні параметри і робочі діапазони імпульсних режимів нагнітання рідини, вдосконалена математична модель інженерного методу розрахунку частоти і розмаху кавітаційних автоколиваний. Встановлено, що закономірність зміни максимумів розмаху автоколиваний від тиску підпору рідини в свердловині, характеризує зміну гідроопору вугільного пласта в процесі його гідророзпушування і описується параболічною залежністю другого ступеня. Визначено, що параметри динамічного навантаження вугільних пластів в імпульсному режимі нагнітання задовольняють умовам гідророзпушування викидонебезпечних пластів.

Ключові слова: гідроімпульсна дія, вугільний пласт, режим нагнітання, частота і розмах автоколивань, робочий діапазон

Abstract. The results of theoretical and experimental methods of calculation of dynamic parameters of hydroimpulsive influence on outburst coal layer are resulted in the article. Based on the studies was substantiated the dynamic parameters and operating ranges of pulsed liquid injection modes, enhanced mathematical model of an engineering method for calculating the frequency and amplitude of self-oscillation cavitations. It is set that conformity to the law of change of maximums of scope of self-oscillation from back water pressure of liquid in a mining hole, characterizes the change of coal layer hydro resistance in the process of him hydro breaking and is described by parabolic dependence of the second degree. It was determined that parameters of the dynamic loading of coal layers in the impulsive injection mode of hydro breaking in outburst layers conditions are satisfy

Keywords: hydroimpulsive influence, coal layer, injection mode, frequency and scope of self-oscillation, working range

Статья поступила в редакцию 18.10.2015

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