

УДК 621.313.12-752.001.5:532.528

Зберовский В.В., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Васильев Л.М., д-р техн. наук, профессор,
Жулай Ю.А., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Поляков Ю.Е., магистр,
Наривский Р.Н., магистр,
Пазынич А.В., магистр
(ИГТМ НАН Украины)

РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА ГИДРОИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВЫБРОСОПАСНЫЕ УГОЛЬНЫЕ ПЛАСТЫ

Зберовський В.В., канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
Васильєв Л.М., д-р техн. наук, професор,
Жулай Ю.О., канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
Поляков Ю.Є., магістр,
Наривський Р.М., магістр,
Пазиніч А.В., магістр
(ІГТМ НАН України)

РОЗРОБКА МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЮ ГІДРОІМПУЛЬСНОЇ ДІЇ НА ВИКИДОНЕБЕЗПЕЧНІ ВУГІЛЬНІ ПЛАСТИ

Zberovskiy V.V., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,
Vasilyev L.M., D.Sc. (Tech.), Professor,
Zhulay Yu.A., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,
Polyakov Yu.Ye., M.S. (Tech.),
Narivskiy R.N., M.S. (Tech.),
Pazynich A.V., M.S. (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine)

DEVELOPMENT OF METHOD FOR CALCULATING PARAMETERS OF HYDROIMPULSE MACHINE OPERATING IN THE PRONE-TO-OUTBURST COAL SEAMS

Аннотация: В статье изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований зависимостей частоты и размаха автоколебаний от давления подпора жидкости в скважине, которые реализуются устройством гидроимпульсного воздействия. Моделирование процесса импульсного нагнетания жидкости проведено при различных режимных параметрах: давлении нагнетания 5...25 МПа, давлении подпора 0,1...12 МПа, расходе жидкости 25...60 л/мин, что соответствует параметрам гидрорыхления угольных пластов на глубинах их залегания до 1300 м.

Исследования проведены при различных углах раскрытия диффузора и длины критического сечения кавитационного генератора ГК-2,5. Анализ полученных результатов позволил обосновать рабочий диапазон режимных параметров устройства для импульсного нагнетания

жидкости, в котором достигаются рациональные значения размаха и частоты автоколебаний, и разработать метод расчета параметров устройства гидроимпульсного воздействия на выбросоопасные угольные пласты.

Ключевые слова: генератор кавитации, нагнетание жидкости, частота и размах автоколебаний, параметр кавитации, давление подпора.

Актуальность задачи. Исследование кавитационных генераторов [1] и параметров динамического нагружения угольного пласта в фильтрационной части скважины при гидроимпульсном воздействии получило развитие в работах [2-7]. Вместе с тем, в процессе исследований до настоящего времени не рассмотрены вопросы обоснования рабочего диапазона генератора устройства, энергетической оценки и критерия контроля режима импульсного нагнетания жидкости. Решение этих задач имеет большое практическое значение при гидрорыхлении выбросоопасных угольных пластов.

В работах [4-6] рассмотрены результаты исследований частоты и размаха автоколебаний периодически-срывного течения жидкости в имитаторе скважины, которые позволили обосновать рациональные гидродинамические параметры генератора ГК-2,5 с $l_{кр}=3,0$ мм и $\beta=20^\circ$ и его рабочие режимы. Установлено, что для глубин залегания угольных пластов до 700 м, рабочий диапазон генератора при давлении нагнетания $P_n=15$ МПа составляет $0,1 \leq P_n \leq 12,0$ МПа, а для глубин от 700 до 1300 м, при давлении $P_n \geq 20$ МПа ограничивается только верхней его границей $P_n \leq 0,82P_n$. При этом увеличение давления нагнетания жидкости с 15 МПа до 25 МПа приводит к стабилизации периодически-срывного течения жидкости в фильтрационной части скважины, росту значений размаха автоколебаний и расширению верхней границы рабочего диапазона генератора с 10,0 до 14,0 МПа, что повышает эффективность гидровоздействия.

Анализ установленных зависимостей показал, что с увеличением давления нагнетания с 5 до 25 МПа их корреляционная связь с давлением подпора жидкости в фильтрационной части скважины возрастает с $R^2=0,69$ до $R^2=0,9$. Полученные результаты подтверждены горно-экспериментальными исследованиями, что отмечено в работах [2, 7]. Установлено, что параметры динамического нагружения выбросоопасных угольных пластов соответствуют условию $P_n \leq 0,82P_n$, что обеспечивает безопасность ведения горных работ.

Исходя из полученных результатов, сформулирована цель данной работы – определить рабочий диапазон режимных параметров устройства гидроимпульсного воздействия, в котором достигаются рациональные значения размаха и частоты автоколебаний, и разработать метод расчета параметров устройства гидроимпульсного воздействия на выбросоопасные угольные пласты.

Основное содержание работы. Многочисленные результаты исследований при моделировании процесса кавитационного течения жидкости на гидравлическом стенде позволили сформировать базу экспериментальных данных. На основании анализа этих результатов, установлены зависимости изменения частоты и размаха автоколебаний от параметра кавитации и давления подпора. Это позволило обосновать рабочий диапазон и установить минимальные значения размаха автоколебаний, при которых в угольном пласте под воздействием вы-

сокочастотной гидравлической вибрации инициируется развитие трещин. При решении этих задач возникла необходимость энергетической оценки стационарной и пульсирующей струй жидкости при импульсном режиме нагнетания.

1. Энергетическая оценка процесса импульсного нагнетания жидкости

Оценка энергетических характеристик стационарной и пульсирующей струй жидкости при импульсном нагнетании жидкости впервые рассмотрена нами в работе [8]. Для сравнительной оценки энергетического воздействия на угольный пласт статического и импульсного режимов нагнетания будем следовать работе Б.В. Раушенбаха [9]. Тогда плотность потока энергии, протекающего через единицу поверхности, перпендикулярной к направлению скорости потока, будет представлена в виде

$$\mathcal{E} = \rho v \left(\frac{v^2}{2} + \varepsilon \right) + Pv, \quad (1)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³; v – вектор скорости, м/с; ε – внутренняя энергия единицы массы жидкости, Дж/кг·с; P – давление, МПа.

Величина ρv в уравнении (1) представляет собой перенос кинетической и внутренней энергии потоком массы жидкости через единицу поверхности в единицу времени, а слагаемое Pv описывает передачу энергии давлением. Поток энергии через поверхность F в [9] рассматривается как

$$\mathcal{E} = \int_F \left[\rho v \left(\frac{v^2}{2} + \varepsilon \right) + Pv \right] df, \quad (2)$$

где df по абсолютной величине равно площади элемента поверхности скважины и направлено по нормали к её оси, м².

Рассмотрим подробнее слагаемое выражения (2) потока энергии $\int_F Pv df$ через поверхность df при постоянном давлении $PQ = \int_F Pv df$, где Q – объемный расход жидкости.

В потоке движения жидкости, при гармонических колебаниях, давление и расход можно представить в виде

$$P = P_y + \Delta P, \quad Q = Q_y + \Delta Q,$$

где P_y и Q_y установившиеся значения давления и расхода жидкости; ΔP , ΔQ – отклонения давления и расхода от установившихся значений.

Тогда среднеинтегральное значение потока энергии за период колебаний T будет определяться как

$$(PQ)_\Sigma = P_y Q_y + \frac{1}{T} \int_0^T \Delta P \Delta Q dt. \quad (3)$$

Поток энергии $P_y Q_y$ соответствует установившемуся течению и не связан с импульсами давления. Второе слагаемое в выражении (3) характеризуется составляющими импульсного нагружения ΔP и ΔQ и представляет собой поток импульсной энергии, который определяется как

$$\mathcal{E}_u = \frac{1}{2} |\Delta P| |\Delta Q|. \quad (4)$$

Поток энергии статического нагружения при установившемся течении жидкости $P_y Q_y$ определялся по давлению подпора P_n и расходу Q_n

$$\mathcal{E}_{ст} = P_n Q_n. \quad (5)$$

Величина $P_n \cdot Q_n$ характеризует процесс фильтрации жидкости в пласт при статическим нагнетанием жидкости.

Расчет потока энергии при импульсном нагружении выполнен в диапазоне $P_n=1 \dots 12$ МПа при давлении нагнетания $P_n=20$ МПа. На рисунке 1 представлены установленные экспериментальные зависимости максимальных и минимальных значений размаха автоколебаний ΔP_1 от давления подпора P_n .

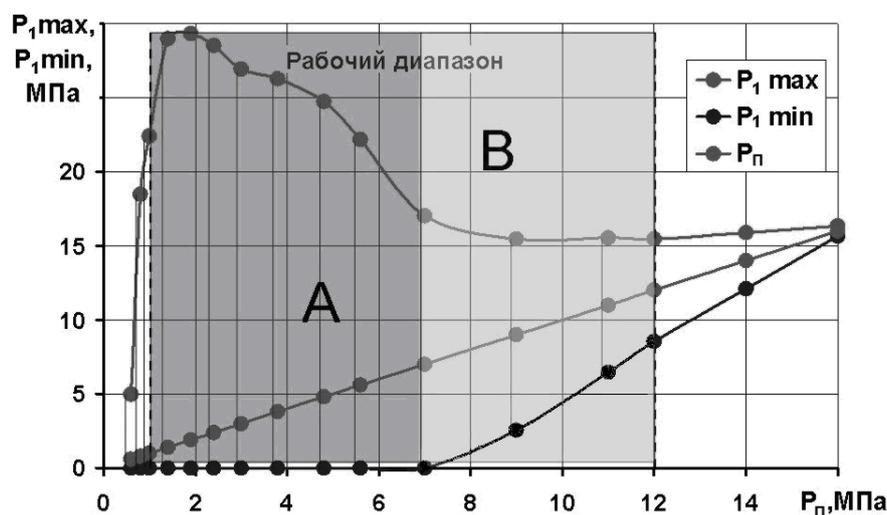


Рисунок 1 – Экспериментальные зависимости max и min значений размаха автоколебаний ΔP_1 от давления подпора P_n при $Q=55$ л/мин и $P_n=20$ МПа

В зоне «А» поток энергии определяется составляющими импульсного нагружения – ΔP , ΔQ и $\Delta P=P_{1\max}$, поскольку $P_{1\min}=0$. В зоне «В» поток энергии определяется составляющими импульсного нагружения – ΔP , ΔQ и составляющими статического нагружения P_y и Q_y .

Учитывая, что форма сигнала ΔP_I близка к треугольной, выражение (4) запишется в виде

$$\Delta Q = \mu \sqrt{g\gamma \Delta P_I}. \quad (6)$$

Результаты расчета потоков энергии представлены на рисунке 2, где обозначено: 1 – энергия, соответствующая установившемуся течению жидкости при статическом режиме нагнетания жидкости (5) в скважину, 2 – динамическая составляющая потока энергии импульса (6), 3 – результирующая потока энергии при импульсном нагнетании жидкости.



Рисунок 2 – Расчетные зависимости потока энергии \mathcal{E} от давления подпора P_p при значениях расхода $Q=55$ л/мин и давлении нагнетания $P_n=20$ МПа

Из установленных зависимостей (рис. 2) следует, что:

– зависимость потока энергии $\mathcal{E}_{ст} = f(P_p)$ статической составляющей нагнетания жидкости в угольный пласт носит линейный характер (линия 1). С ростом давления подпора от 1 до 12 МПа поток энергии возрастает с 0,1 до 1,1 КДж/с;

– распределение энергии динамической составляющей (кривая 2), при равных условиях по давлению нагнетания P_n и давлению подпора P_p , имеет сложный характер и заметно влияет на результирующий поток энергии (кривая 3) гидроимпульсного воздействия. Так, при давлении нагнетания $P_n=20$ МПа и значениях подпора $P_p=1$ МПа результирующий поток энергии при импульсном режиме нагнетания превышает поток энергии статического примерно в 20 раз, а при $P_p=12$ МПа примерно в 1,3 раза;

– характер снижения динамической составляющей потока энергии при гидроимпульсном воздействии (линия 2) от его максимума 2,5 КДж/с при давлении подпора $P_p=1,4$ МПа до минимума 0,3 КДж/с при $P_p=12$ МПа объясняется снижением размаха автоколебаний ΔP_I , который снижается одновременно с ростом давления подпора P_p жидкости в скважине.

Приведенные результаты исследований позволили установить, что суммар-

ный поток энергии при импульсном нагнетании в зависимости от подпорного давления описывается степенной функцией. В рабочем диапазоне давления подпора жидкости в скважине от 1 до 12 МПа суммарный поток энергии динамической составляющей соответственно в 20...1,3 раза превышает поток энергии статического нагнетания. Полученные результаты подтверждаются эффективностью гидроимпульсного воздействия при проведении горно-экспериментальных работ, которыми установлено, что повышение эффективности гидрорыхления обеспечивается увеличением зоны разгрузки угольного пласта более чем в 1,5 раза.

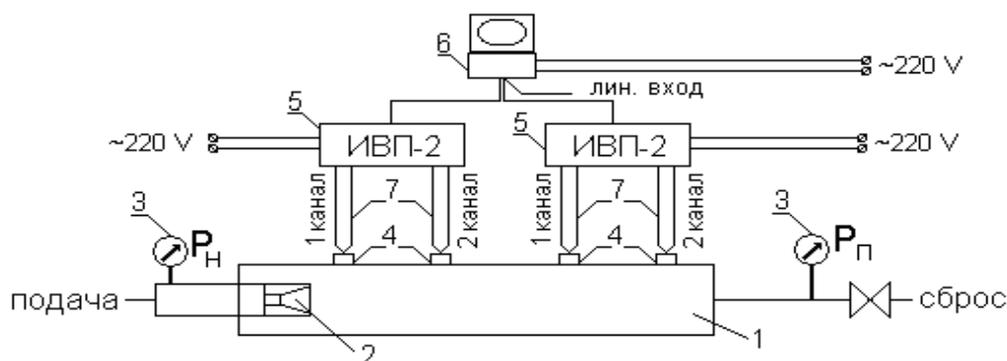
2. Определение рабочего диапазона генератора устройства для гидроимпульсного воздействия

Ранее проведенными исследованиями [2-7] были обоснованы исходные данные для разработки устройства и условия его применения. Методикой моделирования импульсного нагнетания жидкости [10], предусмотрено определение рабочего диапазона генератора КГ-2.5 с различными углами раскрытия диффузора и длиной критического сечения. Там же отмечено, что экспериментальный стенд (рис.3) для моделирования импульсного нагнетания жидкости позволяет:

– проводить моделирование процесса импульсного нагнетания при давлении на входе генератора $P_n \geq 5,0$ МПа и расходе $Q=30-90$ л/мин с регулированием давления подпора в диапазоне $P_n=(0,02-0,9)P_n$;

- исследовать динамические характеристики устройства по длине фильтрационной части скважины $\Delta P_{2.5}$ в зависимости от давления подпора P_n ;

– изменяя давление подпора жидкости в имитаторе скважины установить характер изменения гидравлического сопротивления угольного пласта при его гидрорыхлении.



1 – имитатор скважины; 2 – ГК-2.5; 3 - манометр; 4 – индуктивный датчик ДДИ-20, расположенные по длине скважины; 5 – первичный преобразователь ИВП-2; 6 – ПЭВМ; 7 – соединительные кабели

Рисунок 3 – Схема измерительной и контрольной аппаратуры стенда

Сигналы с датчиков ДДИ-20, установленных на имитаторе скважины, через первичный преобразователь ИВП-2 передаются на персональный компьютер, где формируется база экспериментальных данных. В комплексе измерительной аппаратуры экспериментального стенда используется модуль аналого-

цифрового преобразователя (АЦП) общего назначения E14-140. В качестве программного обеспечения используется программа «PowerGraph».

Расчет динамических параметров давления жидкости основан на прямой регистрации значений параметров датчиков ДДИ-20 путем преобразования физической величины в электрический сигнал. Пример измерения пульсаций давления жидкости $\Delta P_2 - \Delta P_5$ приведен на рис. 4.

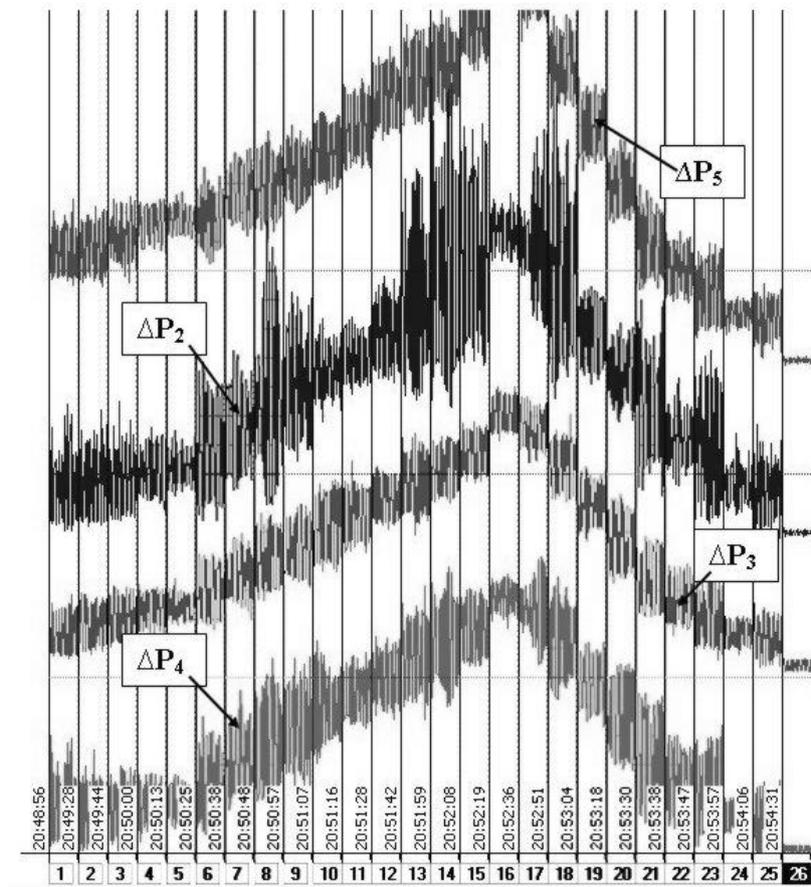


Рисунок 4 – Копия осциллограмм пульсаций давления жидкости по длине имитатора скважины, регистрируемых измерительной аппаратурой

Сигнал от датчика через преобразователь поступает в ПЭВМ и пересчитывается в его физическое значение по формуле

$$P_i = N_i / K_m, \quad (7)$$

где N_i – текущее значение отсчета датчика в i -й момент времени; K_T – чувствительность датчика при его тарировке.

Данные испытания формируются в виде файлов первичных значений импульсов давления для дальнейшей обработки по определению частоты f и размаха автоколебаний ΔP_i на выходе из генератора устройства и по длине имитатора скважины ΔP_{2-5} .

Частота следования импульсов на выходе из генератора определяется из осциллограммы по формуле

$$f = n \cdot (1/t), \quad (8)$$

где n – количество периодов пульсаций при установившихся P_n и P_n ; t – длительность n -периодов пульсаций в секундах.

Размах автоколебаний давления ΔP представляет собой разницу между максимальным P_{max} и минимальным P_{min} значениями давления в импульсе

$$\Delta P = \Delta P_{max} - \Delta P_{min}. \quad (9)$$

Определение динамических характеристик генератора устройства проводится при задании входным дросселем установившегося значения давления на входе $P_n \approx 5; 10; 20; 30$ МПа. При каждом установившемся давлении на входе P_n выходным дросселем дискретно изменяется давление на выходе (в имитаторе скважины) P_n с шагом $\approx 0,025P_n$ при $P_n = (0,05-0,3)P_n$ и с шагом $\approx 0,05P_n$ при $P_n = (0,3-0,8)P_n$. При установившихся значениях давлений на входе P_0 и выходе P_1 , осуществляется фиксирование значений со временем регистрации не менее 15 секунд на каждой частоте. На ПЭВМ производится их расшифровка, а затем по значениям измеренных величин производится расчет гидродинамических характеристик при различных режимных параметрах и оценивается его работоспособность.

В качестве примера результатов исследований в таблице 1 представлены данные определения расходной характеристики генератора ГК-2,5 при $P_n = 20$ МПа.

Таблица 1 – Результаты исследований характеристик ГК-2,5 при $P_n = 20$ МПа

№ замера	P_n , МПа	Q , л/мин	P_n/P_n	ΔP_z ($P_n - P_n$) МПа	№ замера	P_n , МПа	Q , л/мин	P_n/P_n	ΔP_r ($P_n - P_n$) МПа
1	0,6	55,2	0,03	19,4	14	12,0	55,5	0,6	8,0
2	0,8	55,4	0,04	19,2	15	14,0	54,7	0,7	6,0
3	1,0	55,1	0,05	19,0	16	16,0	54,4	0,8	4,0
4	1,4	55,2	0,07	18,6	17	16,5	52,1	0,825	3,5
5	1,9	55,6	0,095	18,1	18	17,0	47,5	0,85	3,0
6	2,4	55,2	0,12	17,6	19	17,5	38,6	0,875	2,5
7	3,0	55,3	0,15	17,0	20	17,7	38,3	0,885	2,3
8	3,8	54,8	0,19	16,2	21	17,8	36,1	0,89	2,2
9	4,8	55,2	0,24	15,2	22	18,2	28,9	0,91	1,8
10	5,6	55,0	0,28	14,4	23	18,6	25,5	0,93	1,4
11	7,0	55,2	0,35	13,0	24	18,8	20,2	0,94	1,2
12	9,0	55,4	0,45	11,0	25	19,7	7,0	0,985	0,3
13	11,0	55,0	0,55	9,0	26	20,0	0,0	1	0,0

В таблице: P_n – давление подпора; Q – расход жидкости; $\Delta P_r = (P_n - P_n)$ – гидравлические потери; $P_n/P_n = \tau$ – параметр кавитации.

По установленным значениям параметров в координатах расхода жидкости Q от гидравлических потерь ΔP_g определяется расход генератора, а в координатах расхода жидкости Q от отношения $P_n/P_n = \tau$ определяется диапазон параметра кавитации τ , при котором за генератором реализуется устойчивое кавитационное течение жидкости (рис. 5).

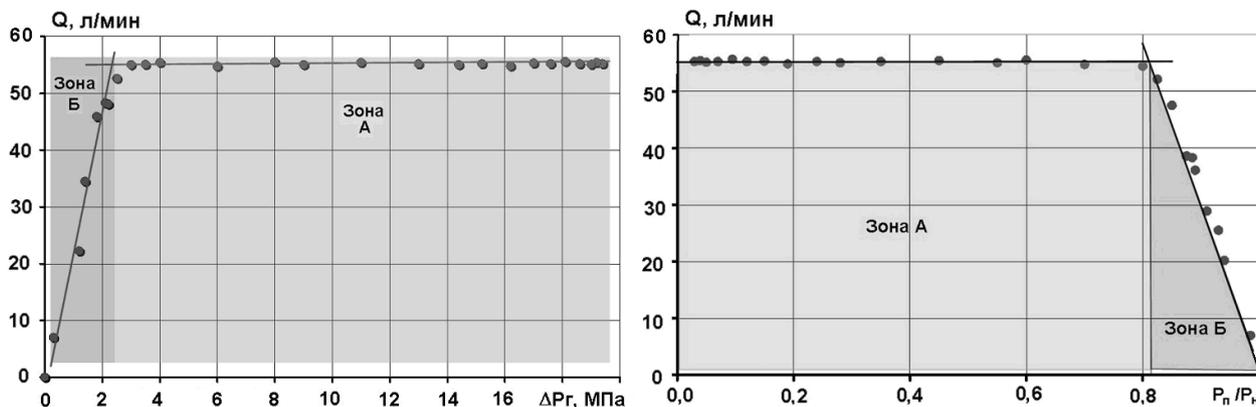


Рисунок 5 – Характеристика генератора ГК-2,5 в координатах « $\Delta P_g - Q$ » и « $P_n/P_n - Q$ »

По параметру кавитации определяется критерий контроля гидроимпульсного воздействия $P_n \leq \tau_{max} P_n$. Например, для ГК-2,5 исходя из результатов, приведенных в табл. 1 и на рис. 5, установлено, что режим устойчивого кавитационного течения жидкости наблюдается в диапазоне $0,012 \leq \tau \leq 0,82$. Тогда

$$\tau_{max} = P_n/P_n \leq 0,82 \quad \text{или} \quad P_n \leq 0,82 P_n \quad (10)$$

Моделированием импульсного нагнетания жидкости установлено, что расчетные геометрические параметры генератора ГК-2,5 при любых значениях давления нагнетания в диапазоне 5...30 МПа обеспечивают максимальные значения давления в импульсе ΔP и их передачу поверхности угля в скважине.

3. Расчет параметров устройства гидроимпульсного воздействия

Диапазон рабочей зоны, минимальных значений параметров динамического нагружения и критерия контроля активной стадии процесса воздействия определяется для предельного случая скорости развития деформации $\dot{\epsilon} = 10 \text{ с}^{-1}$, при которой в угольном пласте инициируется развитие трещины [2, 3]. Величина импульсной нагрузки составит

$$\Delta P = \frac{10E}{f}, \quad (11)$$

где ΔP – импульсное давление, МПа; E – модуль упругости угля, МПа; f – частота следования импульсов, кГц.

Рабочий диапазон устройства определяется по АЧХ генератора и значению модуля упругости угля по напластованию $3 \cdot 10^2 \leq E \leq 5 \cdot 10^2$ МПа и перпендикуляр-

но ему до $E=2 \cdot 10^3$ МПа. Согласно (11), для генератора ГК-2,5 (рис. 6) все значения размаха автоколебаний $\Delta P=30 \dots 3$ МПа с соответствующими им частотами $f=0,8 \dots 8$ кГц, должны располагаться выше уровня кривой 3. Значения этих параметров будут обеспечивать развитие трещин по мощности пласта.

Известно, что в соответствии с требованиями правил безопасности, максимальные значения импульсов давления не должны превышать $0,75\gamma H$. Нижняя граница значения этого параметра определяется критерием эффективности гидрорыхления – снижением давления нагнетания не менее чем на 30%. Тогда для глубин разработки выбросоопасных пластов от 600 до 1300 м диапазон значений давления жидкости на входе генератора устройства P_n составит $0,52\gamma H \leq P_n \leq 0,75\gamma H$ или $10 \leq P_n \leq 23$ МПа (рис. 7).

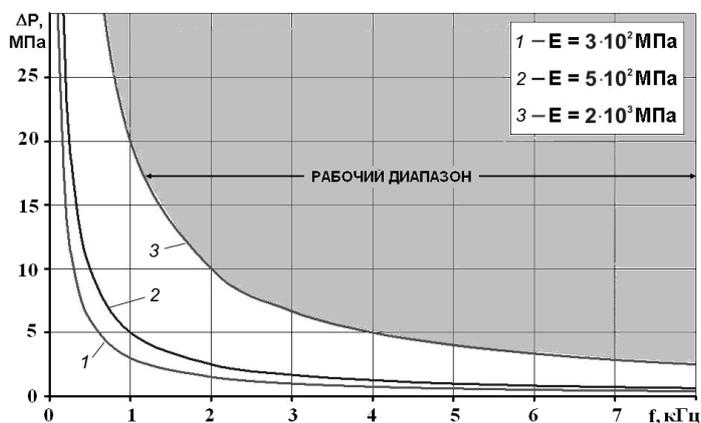


Рисунок 6 – Теоретические зависимости минимальных значений импульсов давления ΔP от частоты их следования f для различных значений модуля упругости угля $E=3 \cdot 10^2$ МПа; $5 \cdot 10^2$ МПа; $2 \cdot 10^3$ МПа

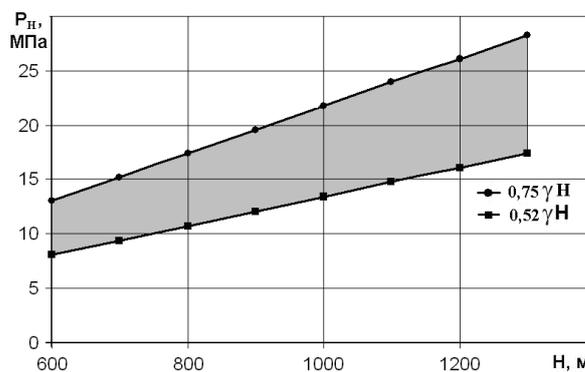


Рисунок 7 – Рабочий диапазон давления импульсного нагнетания жидкости на глубинах от 600 до 1300 м ($\gamma=2,65$ т/м³)

Параметры рабочих режимов устройства определяются экспериментально на гидравлическом стенде (см. рис. 3). По установленным данным производится расчет частоты и размаха автоколебаний, определяется АЧХ генератора устройства и её изменение по длине имитатора скважины $\Delta P_2 \dots \Delta P_5$. АЧХ генератора устройства сопоставляется с минимальными значениями параметров динамического нагружения пласта и определяется диапазон давления нагнетания жидкости. Сопоставление параметров показано на двух примерах при давлении нагнетания 20 и 11 МПа с расходом $Q \approx 55$ и 40 л/мин соответственно в диапазоне давления подпора жидкости $1 \leq P_n \leq 12$ МПа (рис. 8, 9).

На рисунке 9 так же приведена среднестатистическая линия тренда значений $\Delta P_2 \dots \Delta P_5$, установленной АЧХ генератора устройства при $P_n=11$ МПа, которая с достаточно высокой достоверностью описывается уравнением вида

$$\Delta P = 0,297f^3 - 3,406f^2 + 10,513f \quad R^2 = 0,86 \quad (12)$$

Корректировка параметров гидроимпульсного воздействия в промышленных условиях проводится при опытных нагнетаниях (не менее трех) после монтажа в забое выработки оборудования, необходимого для гидрорыхления выбороопасных угольных пластов (рис. 10).

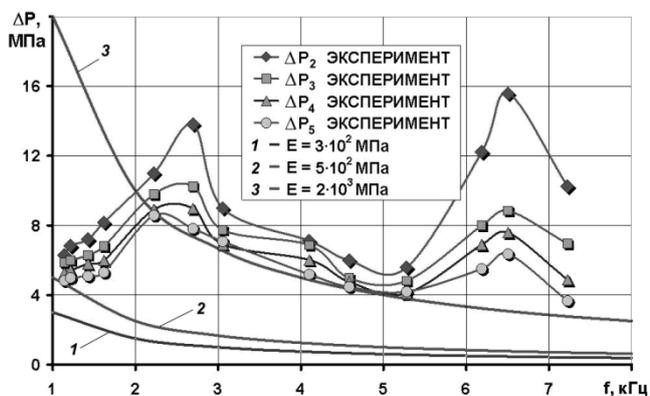


Рисунок 8 – Сопоставление АЧХ генератора с минимальными значениями параметров гидрорыхления при $P_H=20$ МПа

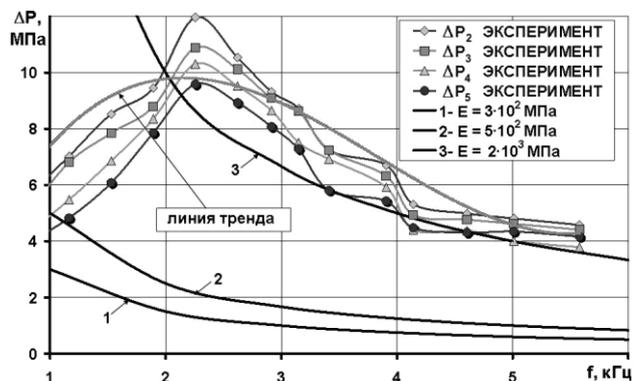
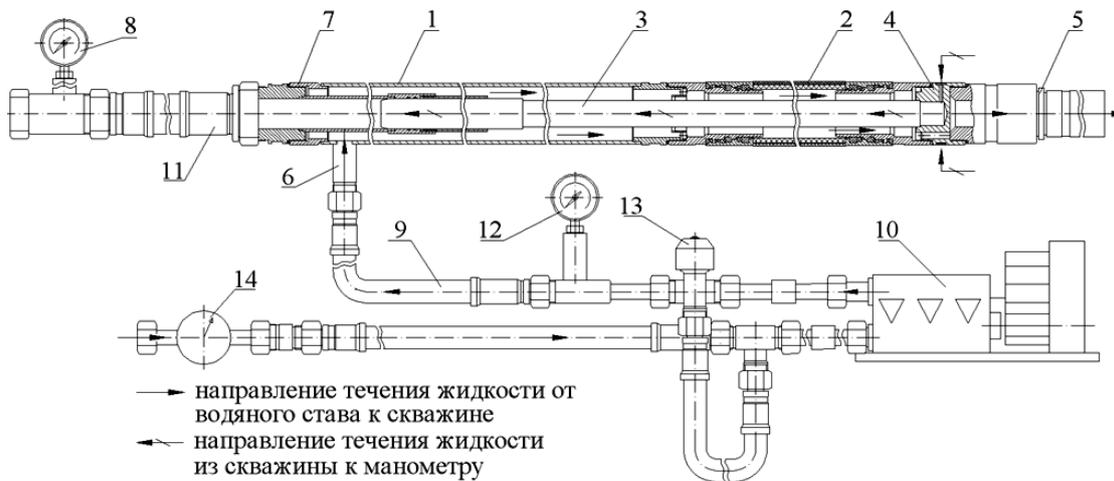


Рисунок 9 – Сопоставление АЧХ генератора устройства с минимальными значениями параметров гидрорыхления при $P_H=11$ МПа



1 – корпус устройства, 2 – герметизатор скважины, 3 – водоотвод устройства, 4 – распределитель потока жидкости, 5 – генератор упругих колебаний (ГК), 6 – патрубок для подвода жидкости к устройству, 7 – хвостовик устройства, 8 – манометр для контроля давления в скважине, 9, 11 – высоконапорный рукав, 10 – насосная установка, 12 – манометр для контроля давления нагнетания, 13 – кран регулировки давления нагнетания, 14 – расходомер жидкости

Рисунок 10 – Схема монтажа оборудования

После монтажа и проверки герметичности гидродинамической системы включают насосную установку. Расчетное давление нагнетания регистрируется манометром 12 и регулируется краном 13 (см. рис.10). Объем жидкости, закачиваемой в угольный пласт, определяется по показаниям расходомера жидко-

сти 14. Вода под высоким давлением проходит внутри корпуса устройства и через герметизатор по прямоточным каналам распределителя потока жидкости поступает на вход генератора. Поскольку входное отверстие генератора имеет малое проходное сечение, то за счет гидросопротивления (не менее 5 МПа) давление воды в герметизаторе возрастает и, расширяя его упругую часть, обеспечивает надежную герметизацию скважины.

Последовательность процесса гидрорыхления в импульсном режиме нагнетания жидкости рассмотрим на примере изменения размаха автоколебаний, реализуемых ГК-2,5 в фильтрационной части скважины (рис. 11).

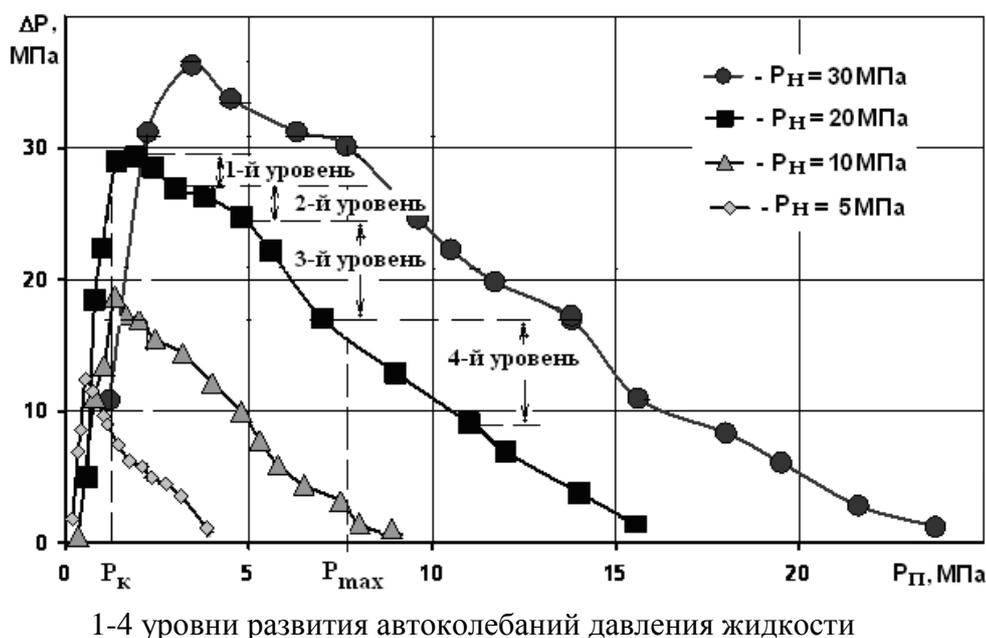


Рисунок 11 – Изменение размаха автоколебаний, реализуемых ГК-2,5 в фильтрационной части скважины при различных режимах нагнетания

После включения насосной установки плавно, в течение 1...2 минут, на входе генератора устанавливается расчетное давление нагнетания. В процессе гидрорыхления по манометру фиксируется максимальное давление подпора P_{max} . Этому давлению будет соответствовать минимальное значение коэффициента фильтрации жидкости в угольный пласт. Далее, по мере развития трещинообразования и фильтрационных свойств угольного пласта (активной стадии процесса), давление подпора жидкости в скважине снижается и стабилизируется. Установившееся давление подпора принимается за его конечное значение P_k , которое является критерием контроля активной стадии воздействия. Диапазон давления подпора от P_{max} до P_k будет соответствовать параметрам динамического нагружения генератора с его АЧХ в рабочем диапазоне. Например (рис.11), при $P_n=20$ МПа это 1-4 уровни развития размаха автоколебаний, при которых скорость фильтрации жидкости по образовавшимся трещинам будет соответствовать расходной характеристике генератора устройства. Если снижение давления подпора от P_{max} до P_k составит 30% и более, то гидрорыхление эффективно. Если нет, то давление на входе генератора увеличивается, напри-

мер, до 30 МПа и гидрорыхление повторяется.

Выводы.

Разработан метод энергетической оценки процесса импульсного нагнетания жидкости, который позволил установить, что при прочих равных условиях (по давлению нагнетания $P_n=20$ МПа и подпора $P_n=1\dots 12$ МПа) суммарный поток энергии при импульсном нагнетании в 1,3...20 раз превышает поток энергии статического нагнетания.

Моделированием на гидравлическом стенде процесса импульсного нагнетания жидкости и определением расходной характеристики генератора устройства установлен рабочий диапазон его работоспособности по параметру кавитации $0,012 \leq \tau \leq 0,82$ и критерий контроля гидроимпульсного воздействия $\tau_{max} = P_n / P_n \leq 0,82$ или $P_n \leq 0,82 P_n$.

На примере двух значений давления нагнетания жидкости 20,0 и 11,0 МПа показано, что динамические параметры устройства удовлетворяют требованиям минимально необходимого уровня значений размаха автоколебаний и частоты их следования. Не перегружая массив угля в целом, гидроимпульсное воздействие инициирует развитие разнонаклонных трещины и интенсифицирует газовыделение из пласта.

Горно-экспериментальными работами установлено, что эффективность гидроимпульсного воздействия подтверждается снижением давления подпора жидкости в скважине более чем на 30% от максимально установленного и позволяет по сравнению со статическим нагнетанием увеличить зону разгрузки угольного пласта более чем в 1,5 раза.

На основании полученных результатов разработан метод расчета гидродинамических параметров устройства гидроимпульсного воздействия на выбросоопасные угольные пласты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пилипенко, В.В. Кавитационные автоколебания / В.В. Пилипенко. – К.: Наукова думка, 1989. – 316 с.
2. Кавитационное устройство импульсного гидрорыхления угольных пластов / Л.М. Васильев, В.В. Зберовский, Ю.А. Жулай, [и др.] // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2014. - № 114. – С.162-168.
3. 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.
4. Цепков, К.В. Программное обеспечение моделирования процесса импульсного нагнетания жидкости в угольные пласты на имитаторе скважины / К.В. Цепков, В.В. Зберовский, А.В. Нечаев // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2014. - № 117. – С. 79-86.
5. Зберовский, В.В. Исследование динамических параметров генератора упругих колебаний при различных углах раскрытия диффузора / В.В. Зберовский, Ю.Е. Поляков, Р.Н. Наривский // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2014. - № 117. – С. 96-102.
6. Зберовский, В.В. Развитие инженерного метода расчета динамических параметров гидроимпульсного воздействия / В.В. Зберовский // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2015. - № 125. – С. 110-121.
7. Васильев, Л.М. Гидроимпульсное рыхление угольных пластов при проведении подготовительных выработок / Л.М. Васильев, В.В. Зберовский // Уголь Украины, №2.- 2013. - С. 44-47.

8. Жулай, Ю.А. Энергетический подход к исследованию импульсного нагнетания жидкости в угольный пласт / Ю.А. Жулай, А.А. Ангеловский // Науковий вісник НГУ. – 2012. – № 3 (129). – С. 26-30.
9. Раушенбах, Б.В. Вибрационное горение / Б.В. Раушенбах. – М.: Физматгиз, 1961. – 500 с.
10. Методика моделирования процесса импульсного нагнетания жидкости / Л.М.Васильев, В.В.Зберовский, Ю.Е. Поляков [и др.]. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2014. – 13 с.

REFERENCES

1. Pilipenko, V.V. (1989), *Kavitatsionnye kolebaniya* [Cavitations self-oscillation], Naukova Dumka, Kiev, USSR.
2. Vasilyev, L.M., Zberovskiy, V.V., Polyakov, Yu.E. et al. (2014), “Cavitation device of pulse hydro breaking of coal layers”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 114, pp. 162-168.
3. 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.
4. Tsepkov, K.V., Zberovskiy, V.V. and Nechaev, A.V. (2014), “Software for simulating impulse fluid injection the coal beds on the borehole simulator”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 117, pp. 79-86.
5. Zberovskiy, V.V., Polyakov, Yu.E. and Narivskiy, R.N. (2014), “Investigation of dynamic parameters of elastic generator vibrations at different angles of disclosure diffuser”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 117, pp. 96-102.
6. Zberovskiy, V.V. (2015), “The development of an engineering method for calculating dynamic parameters of The development of an engineering method for calculating dynamic parameters influence hydroimpulsive influence”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 125, pp. 110-121.
7. 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.
8. Zhulay, Yu.A. and Angelovskiy, A.A. (2012), “Energy approach to the study of a pulsed liquid injection into the coal seam”, *Scientific Collected Works of NMU*, no. 129, vol. № 3., pp. 26-30.
9. Raushenbah, B.V. (1961), *Vibratsionnoe gorenje*, [Vibrating burning], Fizmatgiz, Moscow, USSR.
10. Vasilyev, L.M., Zberovskiy, V.V., Polyakov, Yu.E. et al. (2014), *Metodika modelirovaniy protsesa impulsnogo nagnetaniya zhydkosti* [The methodology of modeling process of impulsive fluid injection], N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine.

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 НАНУ), Днепр, Украина, avalansh@ua.fm.

Васильев Леонид Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом Проблем разрушения горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, avalansh@ua.fm.

Жулай Юрий Алексеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, avalansh@ua.fm.

Поляков Юрий Евгеньевич, магистр, младший научный сотрудник в отделе Проблем разрушения горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, ZoRTFA@mail.ru

Наривский Роман Николаевич, магистр, младший научный сотрудник в отделе Проблем разрушения горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, avalansh@ua.fm.

Пазынич Артём Вячеславович, магистр, инженер в отделе Проблем разрушения горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, dneprovec78@bigmir.net.

About the authors

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

Vasilyev Leonid Mikhaylovich, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of Department of Rock Breaking Problems, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, avalansh@ua.fm.

Zhulay Yuriy Alekseevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher, Principal Researcher, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, avalansh@ua.fm.

Polyakov Yuriy Evgenevich, Master of Sciences (M.S.), Junior Researcher in Department of Rock Breaking Problems, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine., ZoRTFA@mail.ru.

Narivskiy Roman Nikolaevich, Master of Sciences (M.S.), Junior Researcher in Department of Rock Breaking Problems, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, avalansh@ua.fm.

Pazynich Artem Vyacheslavovich, Master of Sciences (M.S.), Engineer in Department of Rock Breaking Problems, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, dneprovec78@bigmir.net.

Анотація: У статті викладено результати теоретичних і експериментальних досліджень частоти і розмаху автоколивань, що реалізуються пристроєм гідроімпульсної дії в фільтраційній частині свердловини. Моделювання процесу імпульсного нагнітання рідини проведено при різних режимних параметрах: тиску нагнітання 5...25 МПа, тиску підпору 0,1...12 МПа, витраті рідини 25...60 л/хв, що відповідає параметрам гідророзпушування вугільних пластів на глибинах їх залягання до 1300 м.

Дослідження проведені при різних кутах розкриття дифузора і довжини критичного перетину генератора пружних коливань ГК-2,5. Аналіз одержаних результатів дозволив обґрунтувати робочий діапазон режимних параметрів імпульсного нагнітання рідини, в якому досягаються раціональні значення розмаху і частоти автоколивань, і розробити метод розрахунку параметрів пристрою гідроімпульсної дії на викидонебезпечні вугільні пласти.

Ключові слова: генератор кавітації, нагнітання рідини, частота та розмах автоколивань, параметр кавітації, тиск підпору.

Abstract. The article describes results of theoretical and experimental studies of dependences between frequency and amplitude of oscillation conducted with the help of hydroimpulse device operating in the filter of the borehole. Process of the fluid pulsed injection was simulated at various regime parameters: injection pressure 5 ... 25 MPa, backwater pressure 0.1 ... 12 MPa, flow rate of fluid 25 ... 60 l/min, which corresponded to parameters of the coal-seams hydraulic loosening at the depth of their occurrence up to 1300 m.

The investigations were carried out at different angles of the diffuser opening and length of critical section of the GV 2.5 oscillator. Analysis of the results allowed to substantiate the working parameter range of the pulsed fluid injection, and to develop a method for calculating parameters for the hydroimpulse machine operating in the prone-to-outburst coal seams.

Keywords: generator of cavitation, liquid injecting, frequency and amplitude of oscillation, parameter of cavitation, backwater pressure.

Стаття постуила в редакцію 10.11.2016

Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Минеевым С.П.