

К.В. Цепков, мл.научн.сотр.,
Р.Н. Наривский, вед. инж.
(ИГТМ НАН Украины),
А.А. Ангеловский, И.Ф. Чугунков
(ш/у "Суходольское-Восточное"
ОАО "Краснодонуголь")

РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОНАПОРНОГО НАГНЕТАНИЯ ЖИДКОСТИ В ВЫБРОСООПАСНЫЙ УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ

Найбільш простими і доступними способами запобігання газодинамічним явищам є гідророзпушування та гідровіджим привибійної частини пласта. Проте практика показує, що їх ефективність знижується при поглиблення гірських робіт. Застосування гідроімпульсної дії дозволяє усунути ці недоліки.

THE CALCULATION OF PARAMETERS OF THE HIGH-PRESSURE WATER INFUSION AT COAL BURST

The hydro-opening and hydro-squeeze of the bottomhole formation zone are the most simple and available methods of preventing the gas-dynamic events. However practice shows that their efficiency decreases in process of deepening of mountain works. The application of hydroimpulsive influence allows to eliminate these lacks.

Ухудшение горно-геологических условий на больших глубинах привели к значительному снижению эффективности высоконапорного нагнетания жидкости с целью предотвращения газодинамических явлений и пылеобразования. В первую очередь это связано с изменением свойств угольного пласта и отсутствием технических средств, которые позволяют в этих условиях реализовать эффективное гидрорыхление и увлажнение угля по всей мощности пласта при статическом нагнетании жидкости. Кроме этого при гидрорыхлении выбросоопасных пластов в подготовительных выработках возрастает вероятность проявления гидроразрыва и гидроотжима краевой части с последующим провоцированием внезапных выбросов. Поэтому одной из основных задач при гидрорыхлении является определение параметров нагнетания, при которых вероятность гидроотжима исключается. Решение этой задачи осложняется тем, что процесс гидроотжима является трудноуправляемым и требует выбора параметров нагнетания, соответствующих свойствам пластов в конкретных горно-геологических условиях, и при этом обеспечивающих эффективность и надежность гидрорыхления.

Уменьшить негативное влияние вышеотмеченных факторов и повысить эффективность нагнетания жидкости через шпурь или скважину, пробуренные из горных выработок, представляется возможным при переходе от статического нагнетания к импульсному в режиме кавитации, так называемому гидроимпульсному воздействию.

Отличительной особенностью технологии гидроимпульсного воздействия является использование малорасходных высокочастотных погружных генераторов кавитации потока нагнетаемой жидкости (далее генератор кавитации –

ГК). При этом ГК обеспечивает стабильность режима кавитации в рабочем диапазоне давления подачи жидкости в угольный массив. Взаимосвязь параметров насосных установок и ГК позволяет эффективно реализовывать процессы интенсификации трещинообразования, заполнение трещин жидкостью и изменения физико-механических свойств угольного пласта. Это повышает эффективность дегазации увлажнения угля с целью предотвращения газодинамических явлений и пылеподавления.

Рассмотрим механизм гидроимпульсного воздействия на угольный пласт в призабойной зоне.

Основными параметрами являются:

- 1) глубина герметизации шпура, l_2 ;
- 2) длина шпура, $l_{ш}$;
- 3) длина фильтрационной камеры, l_{ϕ} , $l_{\phi} = l_{ш} - l_2$;
- 4) радиус эффективного влияния шпура и расстояние между шпурами r ;
- 5) место заложения шпура по мощности пласта;
- 6) расход жидкости (темп нагнетания);
- 7) давление нагнетания (начальное и конечное).

Указанные параметры являются наиболее общими. В частных случаях могут иметь значение такие параметры, как глубина зоны разгрузки, длина герметизирующего элемента, угол заложения шпуров или скважин и другие элементы технологической схемы.

Применение гидроимпульсного воздействия при гидрорыхлении выбросоопасных пластов должно обеспечить безопасность работ и устранить вероятность проявления гидростатического давления. Это условие положим в основу схемы расчета (рис. 1) и решения задачи.

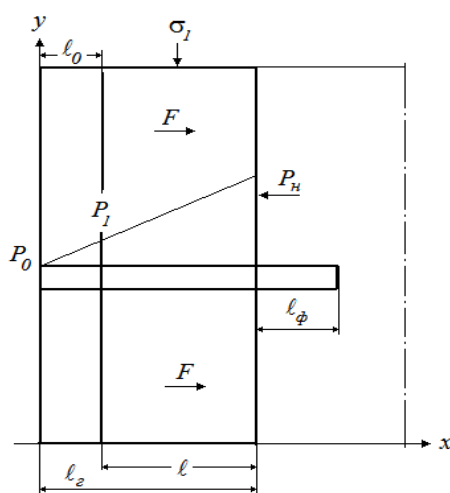


Рис. 1 – Схема расчета давления высоконапорного нагнетания жидкости.

Для данной схемы условие равновесия сил запишется в виде

$$P_n - P_1 \cdot S = 2f\gamma H (l_{\phi} - l_0) \quad (1)$$

где P_n – давление нагнетания жидкости, МПа; P_1 – давление жидкости в кромке пласта, МПа; S – площадь поверхности пласта, м²; f – коэффициент трения горных пород в массиве; γ – удельный вес горных пород, т/м³; H – глубина залегания, м; l_2 – глубина герметизации шпура, м; l_0 – разрушенная часть кромки пласта, м.

Площадь поверхности пласта рассчитывается по формуле:

$$S = m \cdot b$$

где m – мощность пласта, м; b – ширина выработки, м.

При $P_1 = 0$ возникает условие гидроотжима правой части пласта.

Для расчета давления по трём вариантам разработана математическая модель, в которой учтены параметры гидроотжима, гидрорыхления и гидроимпульсного воздействия с учетом физико-механических свойств угля. Данная модель сравнивалась с существующими решениями: «Правила ведения горных работ ...» [1] и решением, полученным Борисенко А.А. [2].

В соответствии с "Правилами..." $P_{max} \geq 0,75 \cdot \gamma \cdot H + P_c$, где P_c – потери напора в гидравлической сети, МПа (при длине магистрали до 100 м $P_c = 0$). Для расчетной схемы (рис. 1) выражение $P_{max} \geq 0,75 \cdot \gamma \cdot H$ запишется в виде:

$$P \geq \frac{2 \cdot f \cdot \gamma \cdot H}{m} \cdot l_2, \quad (2)$$

По схеме определения напряжений в призабойной зоне пласта при нагнетании в нее жидкости (гидроотжим), предложенной А.А. Борисенко [2]:

$$P = K \cdot v \cdot \zeta \cdot \left(e^{\varphi l} - 1 \right) \frac{\psi \cdot \chi \cdot \eta \cdot \left(e^{i l} - e^{\varphi l} \right) \cdot Q}{\pi \cdot m \cdot \left(-l + 0,5 \cdot l_\phi \right) \cdot K'_{\phi 0} \cdot \left(-\varphi \right)}, \quad (3)$$

где Q – объем жидкости для нагнетания в пласт, м³; $K'_{\phi 0}$ – водопроницаемость угля у кромки, м²; i – эмпирический коэффициент, м⁻¹; χ – показатель, характеризующий площадь приложения давления к пласту; ψ – доля жидкости, фильтрующейся к обнаженной поверхности; η – динамическая вязкость воды, Па·с; l_ϕ – зона фильтрации, м; ζ – коэффициент бокового распора.

Расход жидкости, нагнетаемый в пласт, определяется по формуле:

$$Q = \frac{\pi \cdot m_n \cdot \left(-l + 0,5 \cdot l_p \right) \cdot K \cdot v \cdot \zeta \cdot \left(e^{\varphi l} - 1 \right) \cdot K_{\phi 0} \cdot \left(-\varphi \right)}{\psi \cdot \chi \cdot \eta \cdot \left(e^{i l} - e^{\varphi l} \right)}$$

По результатам исследований гидроимпульсного воздействия, на основа-

нии которых с использованием формулы расчета горизонтальных контактных напряжений, предложенной Л.М.Васильевым [3], по схеме рис. 2 нами дано интегральное решение предельных сил гидростатического пласта в забое подготовительной выработки.

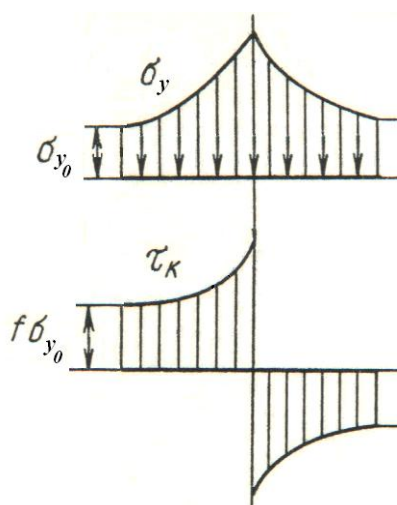


Рис. 2 – Эпюры контактных нормальных σ_y и касательных τ_k напряжений при $\tau_k = f\sigma_y$.

Для интегрального решения необходимо вычислить значение удельного давления, через распределение напряжений по поверхности образца горной породы при наличии внешнего трения. Определение распределения контактных напряжений при деформировании пластичных материалов принято осуществлять на основании двух дифференциальных уравнений

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0$$

и одного алгебраического уравнения пластичности (предельного состояния)

$$\sigma_x - \sigma_y = 2k \sqrt{1 - \frac{\tau_{xy}^2}{k^2}},$$

где σ_y , σ_x и τ_{xy} – продольные и поперечные нормальные и касательные напряжения в материале; k – сопротивление материала сдвигу.

В работе [3] проведён детальный теоретический анализ возможности упрощения уравнений и экспериментально определил их границы в пределах

практически допускаемой точности. С этой целью:

а) задачу приводят к осесимметричной или плоской;

б) принимают, что нормальные напряжения зависят только от одной координаты, в частности от x , а зависимость касательных напряжений от соответствующей координаты y принимают линейной.

В результате дифференциальные уравнения упрощаются. Их число сокращается до одного, которое содержит простые производные взамен частных. Решив упрощённое дифференциальное уравнение, получим соотношение:

$$\sigma_x = \frac{2k + \mu\sigma_y}{\cos \rho} \left(\sin \rho - \sqrt{1 - b_1^2} \right) + \sigma_y$$

которое применим для расчёта текущего значения сжимающего напряжения σ_y по ширине образца

$$\sigma_y = \sigma_{y0} e^{\frac{fb}{h}}$$

и среднего контактного давления

$$p = \sigma_{y0} \frac{h}{fb} \left(e^{\frac{fb}{h}} - 1 \right)$$

Это даёт возможность вычислить давление нагнетания жидкости при гидроимпульсном воздействии на контактной поверхности методом интегрирования:

$$P = \int_0^m \left(\frac{2 \cdot \left(k + \mu \cdot \gamma \cdot H \cdot \left(1 + \frac{f \cdot l_2}{m} \right) \right)}{\cos \rho} \cdot \left(\sin \rho - \sqrt{1 - b^2} \right) + \gamma \cdot H \cdot \left(1 + \frac{f \cdot l_2}{m} \right) \right) dy;$$

$$b = \frac{f \cdot \gamma \cdot H \cdot \left(1 + \frac{f \cdot l_2}{m} \right) \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot y}{m} \right)}{k + \mu \cdot \gamma \cdot H \cdot \left(1 + \frac{f \cdot l_2}{m} \right)}, \quad (4)$$

где k – сопротивление сдвига (сцепление), кгс/см²; μ – коэффициент внутреннего трения, $\mu = \tan \varphi$; ρ – угол внутреннего трения, град.; y – параметр интегрирования.

Отличительной особенностью расчета давления гидроотжима при гидроимпульсном воздействии является то, что для конкретных условий залегания пласта учитывается фактор сопротивления угля сдвигу, который зависит от сил внутреннего и внешнего трения.

Результаты расчета давления гидроотжима для условий залегания пласта i_3' гор. 915 м в условиях СП ш/у «Суходольское-Восточное» ОАО «Краснодонуголь» по всем трём моделям при разных глубинах герметизации шпура и значениях:

$m = 1,32$ м; $H = 915$ м; $b = 5,1$ м; $l_0 = 0,1$ м; $i = 9,5$ м⁻¹; $k = 10$ кгс/см²; $K'_{e0} = 1,2 \cdot 10^{-8}$ м²; $\eta = 1,005 \cdot 10^{-3}$ Па·с; $\gamma = 2,65$ т/м³; $\rho = 26,57^\circ$; $f = 0,5$; $\xi = 0,382$; $\chi = 1$; $\psi = 0,5$; приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета давления гидроотжима угольных пластов

По «Правилам ...»		При гидроотжиме		При импульсном нагнетании	
l_2 , м	P, МПа	l_2 , м	P, МПа	l_2 , м	P, МПа
2,5	24,73	2,5	26,84	2,5	23,27
3,0	29,67	3,0	27,29	3,0	25,37
3,5	34,62	3,5	27,69	3,5	27,47

Практикой установлено, что при нагнетании жидкости на глубинах более 800 м с герметизацией шпуров 2,5 - 3,5 м гидроотжим краевой части наблюдается при давлении нагнетания 20,0-25,0 МПа. Расчетное давление при герметизации шпуров 2,5 м (табл. 1) соответствует этим значениям. Далее при увеличении глубины герметизации вероятность гидроотжима снижается, но исследования в этом направлении при статическом режиме нагнетания жидкости не производились. Поэтому большой практический и научный интерес представляют результаты горно-экспериментальных работ по гидроимпульсному воздействию на пласт i_3^1 в условиях подготовительных выработок ш/у «Суходольское-Восточное» ОАО «Краснодонуголь». Они позволили установить, что эффект гидрорыхления пласта через скважины длиной 6,0 – 7,0 м и формирование безопасной зоны разгрузки на глубину не менее длины шпура, в режиме гидроимпульсного воздействия достигается при давлении нагнетания 15,0-16,0 МПа.

Таким образом, учитывая, что гидроотжим при импульсном нагнетании жидкости через шпуры с глубиной герметизации 2,5 м (табл.1) может проявиться при давлении нагнетания более 23,0 МПа, параметры гидроимпульсного воздействия через шпуры длиной 4,0-6,0 м. Обеспечивают условия равновесия сил (1). Следовательно, применение гидроимпульсного воздействия обеспечивает уровень безопасности ведения горных работ на пластах опасных по внезапным выбросам угля и газа, и позволяет увеличить скорость про-

ведения выработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила ведения горных работ на пластах, склонных к газодинамическим явлениям / Стандарт Минуглепрома Украины СОУ 10.1.001740088-2005. – Киев: Минуглепром Украины. – 2005. – 225 с.
2. Борисенко, А.А. Теоретические основы гидроотжима и гидрорыхления на угольных шахтах / А.А. Борисенко. – М.: Наука, 1986. – 113 с.
3. О правомочности применения закона о линейной связи между контактными напряжениями для расчёта предела прочности горных пород / Л.М. Васильев, К.В. Цепков, А.В. Пазынич, В.В. Зберовский, Р.Н. Наривский // Научный вестник НГУ. – Днепропетровск: НГУ, 2008. – № 3. – с. 3-6.

Рекомендовано до публікації д.т.н. М.С. Четвериком 17.08.09