

выброса. Использование подобных методов может надежно предотвратить опасность опрокидывания и загазирования свежих воздушных потоков в объеме воздухоотводящих выработок.

Разработаны и другие модификации способа, обеспечивающие не только предотвращение опрокидывания свежих воздушных потоков, но и снижение концентрации метана в выработках с исходящей струей до взрывобезопасных пределов. В этом случае регулируемое аэродинамическое сопротивление устанавливают в тупиковой выработке перед узлом сопряжения. При возникновении выброса газовый поток оказывается частично заперт. Управляемое истечение газа осуществляют с помощью трубопровода, проложенного через перемышку в выработку с исходящей струей. В конце трубопровода устанавливают сопловой насадок эжекционного типа. За счет скоростного напора газовой струи выброса, направленной спутно общему потоку, и эжекции достигается усиление исходящего потока и разбавление метана до взрывобезопасной концентрации.

Подобная схема была реализована при углубке стволов действующих шахт Центрального района Донбасса. Технологические схемы ее реализации были не только апробированы, но и вошли составной частью в нормативные документы. Это дало возможность существенно повысить темпы углубки стволов при пересечении выбросоопасных угольных пластов и пород, обеспечив безопасность работ на действующих горизонтах шахт.

В заключение следует повторить, что безопасность отработки выбросоопасных угольных пластов и пород зависит не только от надежности методов и средств, направленных на предотвращение выбросов, но и повышение безопасности горнорабочих при возникновении аварийных ситуаций.

УДК 622.831.325.3

В.Н. Потураев, С.П. Минеев, А.А. Прусова

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОУДАРНОГО ЭФФЕКТА ПРИ ГАЗОДОБЫЧЕ

Вопросы эффективности извлечения газа из угленосного массива в настоящее время стоят особо остро. Одним из путей повышения эффективности извлечения газообразного сырья является дезинтегрирование массива различными методами, в частности, посредством вибровоздействия [1], существенно интенсифици-

рующего газоотдачу массива. Однако в этом методе заключен некоторый элемент опасности для газоносного массива. Аналогичный указанному воздействию – гидроударный метод, основанный на нагнетании жидкости в массив в пульсационном режиме, достаточно безопасен [1]. Но, несмотря на то, что он весьма эффективен для создания разветвленной сети фильтрационных каналов, использование последних для фильтрации газа при дегазации не продуктивно из-за блокирования газа жидкостью. В связи с этим, учитывая характерные особенности гидроударного воздействия на массив, рассмотрим целесообразное его применение для повышения эффективности газодобычи.

Пусть углепородный массив, вмещающий угольный пласт и породный слой мощностью и проницаемостью соответственно h_1 , h_2 и K_{01} , K_{02} , подвергается гидроударному воздействию:

$$\begin{aligned} P(t) &= \sigma_g \sin \omega t \quad \text{при } x = 0 \\ P(t) &= 0 \quad \text{при } x = L, \end{aligned} \quad (1)$$

где L – длина обрабатываемого участка пласта.

Поскольку суммарная мощность угольного пласта и слоя пород значительно меньше его протяженности, то процесс фильтрации может быть рассмотрен как одномерный. Уравнения неразрывности и фильтрации будут иметь вид [2]

$$h_i \frac{\partial V_i}{\partial x} = h_i \Pi_i Z_2 \frac{\partial P}{\partial t} + (-1)^i q, \quad i = 1, 2, \quad (2)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial x} = \frac{k_{0i}}{\mu} \frac{\partial}{\partial x} \left[(1 + \beta_i P) \frac{\partial P}{\partial x} \right], \quad (3)$$

где Π_i – пористость слоев; Z_2 – коэффициент сжимаемости; q – количество жидкости, перетекающей из слоя в слой; проницаемость описывается зависимостью $K_i(P) = K_{0i} (1 + \beta_i P)$ (4); $i = 1, 2 \dots$; k_{0i} – проницаемость, соответствующая естественным условиям залегания горной породы; μ – вязкость жидкости; β_i – коэффициент, учитывающий изменение проницаемости слоя породы при изменении параметров нагружения массива (давления и числа циклов нагружения).

Подставляя (3) в (2) для каждого слоя и просуммировав эти соотношения, получаем уравнение, описывающее процесс фильтрации в двухслойном пласте:

$$h_{\Pi} Z_2 \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k_{\Pi}}{\mu} \frac{\partial}{\partial x} \left[(1 + \beta_{\Pi} P) \frac{\partial P}{\partial x} \right], \quad (5)$$

где $h_{\Pi} = h_1 \Pi_1 + h_2 \Pi_2$; $k_{\Pi} = k_{01} h_1 + k_{02} h_2$; $\beta_* = \frac{k_{01} h_1 \beta_1 + k_{02} h_2 \beta_2}{k_{\Pi}}$.

В безразмерных величинах $P = \sigma_g P$; $\bar{x} = x/L$ последнее уравнение приняло вид:

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{t}} = \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left[\left(1 + \bar{\beta}_* \bar{P} \right) \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{x}} \right], \quad (6)$$

где $i = ik_{\Pi} / Z_2 \mu h_{\Pi} L^2$; $\bar{\beta}_* = \beta_* \sigma_g$.

Решение уравнения (6) искалось с использованием разложения исходной функции в ряд Фурье. В результате получили бесконечную систему нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка и граничные условия для функции $\bar{P}_{\pm k}$:

$$\frac{\partial^2 \bar{P}_{\pm n}}{\partial x^2} \pm n \omega P_{\pm n} = -\beta \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left\{ P_0 P_{\pm n} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n-1} P_{\pm j} P_{\pm(n-j)} + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} P_{\pm k} P_{\pm(k+n)} - P_{\pm(k+n)} \right\}; \quad (7)$$

$$\text{при: } \begin{aligned} x=0 & P_{+1} = 0, P_{-1} = -1, P_{\pm k} = 0 \quad (k \neq 1) \\ x=1 & P_{+k} = 0 \quad (k = 0, 1, \dots) \end{aligned} \quad (8)$$

Для малого параметра решение системы уравнений (7) искалось в виде ряда по степеням малого параметра. В результате получили систему рекуррентных соотношений для определения функций $P_{\pm k}$. При этом установлено, что первая гармоника $\bar{P} = P_{+1} \cos \omega t + P_{-1} \sin \omega t$ определяется системой уравнений:

$$\begin{aligned} P_{+1} &= \delta^{-1} \left[ch \xi (1-x) \sin \xi (1-x) sh \xi \cos \xi - \right. \\ &\quad \left. - sh \xi (1-x) \cos \xi (1-x) ch \xi \sin \xi \right] \\ P_{-1} &= \delta^{-1} \left[sh \xi (1-x) \cos \xi (1-x) sh \xi \cos \xi + \right. \\ &\quad \left. + ch \xi (1-x) \sin \xi (1-x) ch \xi \sin \xi \right] \end{aligned} \quad (9)$$

где $\xi = \sqrt{\omega/2}$; $\delta = ch^2 \xi - \cos^2 \xi$.

С учетом порядка величин β решение системы (7) приняло вид:

$$\bar{P} = \beta \sigma_g + P_{+1} \cos \omega t + P_{-1} \sin \omega t + \beta (P_{+2} \cos 2\omega t + \sin 2\omega t). \quad (10)$$

Гидроударное воздействие можно охарактеризовать мгновенным выравниванием давления, т.е. можно принять $\bar{P}_1 = \bar{P}_2 = P$. Тогда, проинтегрировав по циклу (2) с учетом (10), получаем расчетную зависимость для среднего по времени межслойного перетока жидкости в виде:

$$\bar{q}(\bar{x}, \bar{\omega}) = 2\bar{\omega}(\bar{\beta}_1 - \bar{\beta}_2)\bar{k}_{12} \frac{\operatorname{ch}2\xi(1-\bar{x}) + \cos2\xi(1-\bar{x})}{\operatorname{ch}2\xi - \cos2\xi}, \quad (11)$$

$$\text{где } \bar{\beta}_1 = \beta_1 \sigma_{II}; \quad \bar{\beta}_2 = \beta_2 \sigma_{II}; \quad \bar{k}_{12} = \frac{k_{01} h_1 k_{02} h_2}{k_l^2}.$$

Проинтегрировав (11) по длине пласта, получаем формулу для расчета суммарного среднего по времени перетока жидкости:

$$\bar{q} = 2\xi(\bar{\beta}_1 - \bar{\beta}_2)\bar{k}_{12} \frac{\operatorname{sh}2\xi + \sin2\xi}{\operatorname{ch}2\xi - \cos2\xi}. \quad (12)$$

Полученные функциональные зависимости (9) – (12) позволяют выполнить анализ различных технологических режимов гидроударного воздействия на углепородный массив при различных его физико-механических характеристиках. В данной работе ограничимся рассмотрением взаимовлияния среднего перетока жидкости, числа циклов гидропульсаций и проницаемости массива. Исходными данными для численных расчетов служили следующие значения физико-механических и геометрических параметров углепородного массива: $k_{01} = 10^{-10} \text{ м}^2$; $k_{02} = 10^{-11} \text{ м}^2$; $\beta_1 = 0,4 \text{ м}^2/\text{Н}$; $\beta_2 = 0,1 \text{ м}^2/\text{Н}$; $h_1 = 0,5 \text{ м}$; $h_2 = 2 \text{ м}$; $L = 10 \text{ м}$; $\Pi_1 = 0,3$; $\Pi_2 = 0,2$.

При расчетах фильтрационного процесса, как видно из рисунка, реализовалась модель, согласно которой количество насыщающей пласт жидкости при гидроударах, как и следовало ожидать, возрастает с увеличением проницаемости и числа циклов нагружения. При большом числе циклов пульсаций начинает проявляться насыщение массива жидкостью. Характерно то, что эффект насыщения наступает при меньшем числе циклов в случае большего времени пульсаций. Особый интерес представляет зависимость между суммарным перетоком жидкости и проницаемостью (δ). Так, на начальном этапе нагнетания жидкости наблюдается пропорциональная зависимость между перетоком и проницаемостью. При дальнейшем увеличении проницаемости рост среднего суммарного перетока замедляется и данная зависимость приобретает асимптотический характер. Это значит, что при ударном воздействии можно добиться существенного приращения зоны дезинтеграции над увлажненной областью. Последняя будет представлена системой фильтрационных каналов, а зона приращения – нарушенной структурой различных закрытых пор, являющихся мощными аккумуляторами свободного и, особенно, связанного с угольным веществом газа метана, которого, по данным некоторых исследований, содержится в массиве значительно больше, чем свободного.

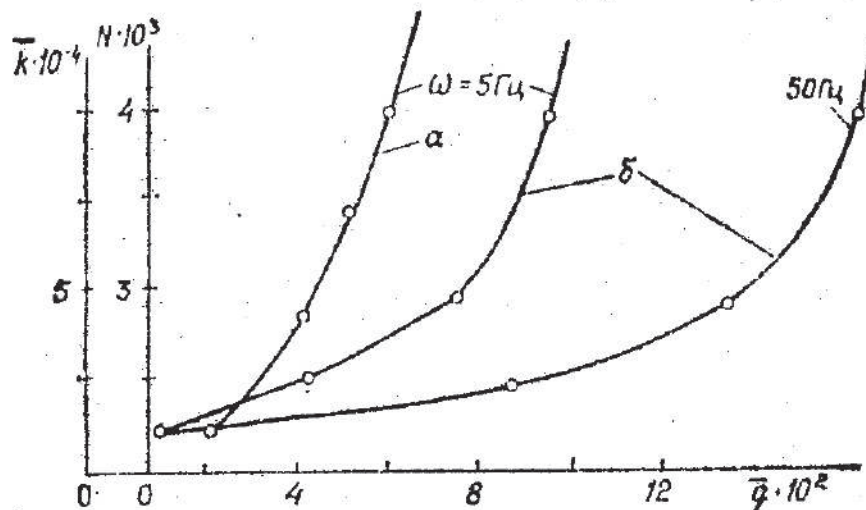


Рисунок – Изменение среднего перетока жидкости \bar{q} в зависимости от числа циклов гидропульсации N (а) и проницаемости k (б)

Поэтому дезинтеграция указанного порового пространства повлечет за собой высвобождение значительного объема газа, и в массиве зародится локальная зона дефлюидизации. Наличие такого «газового мешка» вблизи дегазационной системы позволит значительно повысить дебит извлекаемого газа. В свою очередь, увлажненная зона вблизи гидроударной скважины будет своеобразным «демпфером» для ударного последствия массива. Таким образом, гидроударное воздействие может служить эффективным и в то же время безопасным инструментом интенсификации газоотдачи угленородного массива. Причем данное воздействие, как видно из результатов проведенных исследований, позволяет получать тождественные эффекты дезинтеграции при различной степени гидронасыщенности массива. Последнее определяется, в основном, частотой и мощностью гидропульсаций. Так, например, вариант, при котором реализуется максимальная дезинтеграция в зоне приращения при минимальном перетоке жидкости, соответствует низкочастотным воздействиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потураев В.Н., Минсев С.П. Использование вибрационных и волновых эффектов при отработке выбросоопасных пластов. – Киев: Наук. Думка, 1992. – 200 с.
2. Цыпкина О.Э. О режиме вынужденных колебаний для нелинейной фильтрации жидкости в пласте // Механика жидкости и газа. – 1974. – № 4. – с. 62 – 69.