

УДК 622.234.5:32:532.595.2

С.П. Минеев, д-р техн. наук., профессор
(ИГТМ НАН Украины),
А.А. Потапенко, инженер
("Донецкая угольная энергетическая компания")

МЕХАНИЗМ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГОРНОМ МАССИВЕ ПРИ НАЛОЖЕНИИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УДАРОВ НА СТОЛБ НАГНЕТАЕМОЙ В ПЛАСТ ЖИДКОСТИ

С.П. Мінєєв, д-р техн. наук, професор
(ИГТМ НАН України),
О.О. Потапенко, інженер
(«Донецька вугільна енергетична компанія»)

МЕХАНИЗМ ФІЛЬТРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ГІРНИЧОМУ МАСИВІ ПІД ЧАС НАКЛАДЕННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ УДАРІВ НА СТОВПІ РІДИНИ, ЯКА НАГНІТАЄТЬСЯ У ПЛАСТ

S.P. Mineev, D.Sc. (Tech.), Professor
(IGTM NAS of Ukraine),
A.A. Potapenko, M.S. (Tech.)
("Donetsk Coal Energy Company")

MECHANISM OF FILTRATION PROCESSES IN THE ROCKS AT APPLYING HYDRAULIC SHOCK ON THE COLUMN OF LIQUID INJECTED INTO THE STRATUM

Аннотация. В работе обоснован механизм фильтрационных процессов в горном массиве, происходящих при наложении гидравлических ударов на поток нагнетаемой в угольный пласт жидкости. Данный механизм может быть использован для повышения эффективности нагнетания жидкости в пласт в режиме его гидравлического рыхления. Модель данного механизма позволяет оценить условия рыхления призабойной части пласта и параметры эффективного увлажнения угольного массива при выполнении противовыбросного мероприятия. Приведена зависимость изменения пористости по мере циклического нагружения массива за счет накопления повреждений в угле. Показано, что пористость и проницаемость угольного массива монотонно возрастают до определенной величины при увеличении числа циклов ударного нагружения, при этом средний суммарный переток нагнетаемой в пласт жидкости возрастает с ростом числа циклов ударного нагружения.

Ключевые слова: увлажнение массива, противовыбросное мероприятие, гидроудар, фильтрационный процесс.

При снижении выбросоопасности угольных пластов на шахтах используют различные методы, основанные на нагнетании жидкости в массиве, такие как:

гидроотжим, гидрорыхление, нагнетание жидкости в длинные скважины и другие. Вместе с этим даже после нагнетания жидкости в режиме гидрорыхления опасность реализации газодинамического явления полностью не исключается. Одной из основных причин недостаточной надежности этих способов является неравномерность обработки пласта жидкостью и неуправляемость процессом выполнения способа при низкопроницаемых углях [1]. Поэтому обоснование механизма фильтрационных процессов в горном массиве при наложении гидравлических ударов на столб нагнетаемой в пласт жидкости является актуальным вопросом.

Одним из возможных методов, позволяющих снизить отмеченные недостатки, является наложение на столб нагнетаемой в пласт жидкости циклических колебаний. В общем случае вопросы нагнетания жидкости в массив в пульсационном режиме рассматривали неоднократно [2 - 6]. Так, в работе [7] предложен способ, включающий бурение скважин в массиве, их герметизацию и установку в устье скважин генераторов колебаний давления. Нагнетание жидкости в пласт производят с одновременным созданием колебаний давлений в столбе нагнетаемой жидкости. При этом амплитуда колебаний давления жидкости не должна превышать горного давления, а частота колебаний находится в пределах 20—1000 Гц. Однако данный способ в полном объеме не может быть осуществимым с необходимой технологической эффективностью. Поэтому вполне очевидна дальнейшая необходимость выполнения исследований, направленных на повышение производительности работ и надежности применения гидроспособов. Одним из перспективных предложений в этом вопросе является метод наложения гидравлических ударов на столб нагнетаемой в пласт жидкости [4]. При выполнении этого способа весьма важны вопросы герметизации нагнетательных скважин и выбор средств создания гидроударов в столбе жидкости. В качестве таких средств можно использовать разработанные в ИГТМ НАН Украины прерыватели потока нагнетаемой жидкости, которые необходимо устанавливать между насосом и герметизируемой частью скважины. При этом гидравлические ударные волны в столбе нагнетаемой в пласт жидкости создают мгновенным закрытием специальной задвижки, а затем ее открытием. Рассмотрим механизм этого процесса. Известно [4, 9], что резкое изменение скорости течения напорного потока вызывает практически мгновенное повышение (снижение) давления. Это явление называется гидравлическим ударом и представляет собой процесс, характеризующийся резким повышением и понижением давления в потоке жидкости. При рассмотрении механизма действия такого гидравлического удара на горный массив следует отметить, что как только «лоб» волны дойдет до забоя скважины, в этом месте образуется и начинает двигаться в противоположную сторону отраженная волна, затем этот процесс повторяется. Таким образом, у свободного конца скважины (у забоя) зарождаются отраженные волны обратного знака, а у закрытого (у задвижки) — отраженные волны того же знака, что и прямые волны, подошедшие к концу скважины. Время прохождения ударной волны от задвижки до забоя запишем в виде

$$t_0 = (L_C + L_T) / \alpha_{y\delta}, \quad (1)$$

где L_C и L_T — соответственно длина трубопровода от задвижки и длина скважины; $\alpha_{y\delta}$ — скорость движения ударной волны в скважине (скорость звука).

Полный период колебания в любой точке скважины будет равен четырехкратному времени пробега «лбом» ударной волны расстояния $(L_C + L_T)$:

$$t_{пол} = 4(L_C + L_T) / \alpha_{y\delta} = 2(t_0), \quad (2)$$

где $2 \cdot t_0$ — фаза гидравлического удара.

Для наибольшей эффективности использования энергии гидроударной обработки угольного массива частоту открытия — закрытия задвижки на трубопроводе, подающем жидкость в массив от насосной установки следует принимать кратной времени пробега "лбом" ударной волны расстояния до забоя скважины и обратно, т. е. кратной фазе гидравлического удара:

$$\omega' = 1 / 2t_0 [n], \quad (3)$$

где $[n]$ — показатель кратности.

Кроме этого, необходимо отметить, что для повышения эффективности гидрообработки угольного массива с использованием энергии волн гидравлического удара следует [4, 8] избегать изгибов в направлении движения жидкости и существенных изменений в сечении ее потока, поскольку последние являются своеобразными демпферами, гасящими энергию гидроударных волн. Поэтому скважины для нагнетания жидкости сооружают так, чтобы их диаметр максимально приближался к внутреннему диаметру подающего жидкость трубопровода, и располагают скважины и трубопровод по возможности на одной прямой линии.

Довольно важным существенно влияющим на эффективность гидрообработки параметром является длительность полного перекрытия (открытия) потока жидкости задвижкой $t_{зак}$. Прямой гидравлический удар будет осуществляться при условии $t_{зак} \leq 2t_0$. В противном случае ($t_{зак} > 2t_0$) возникает непрямой гидравлический удар, при котором ударная волна, отразившись от забоя, возвращается к задвижке раньше, чем эта задвижка будет полностью закрыта. При этом амплитуда волн гидроудара значительно меньше, чем при прямом ударе, за счет дифракции волн. Амплитуда волны прямого гидравлического удара:

$$\sigma_{y\delta}^n = \rho_{ж} v_{ж} \alpha_{y\delta}, \quad (4)$$

где $\rho_{ж}$ — плотность нагнетаемой жидкости, $v_{ж}$ — скорость нагнетания жидкости в статическом режиме.

При непрямом гидравлическом ударе, когда задвижка обеспечивает линей-

ную зависимость скорости течения жидкости в трубопроводе от времени ее закрытия, амплитуда ударной волны будет выражаться соотношением:

$$\sigma_{y\partial}^n = \rho_{ж} v_{ж} \frac{2(L_C + L_T)}{t_{зак}}, \quad (5)$$

где $t_{зак}$ — время срабатывания задвижки.

Данная модель рассматриваемого процесса позволяет в общем случае оценить интенсивность динамических воздействий на стенки и забой скважины. При этом открытые в полости скважины магистральные трещины являются своеобразным «направляющим» для гидроударных волн, по которым происходит передача импульсного возмущения давления жидкости в глубь массива. В случае импульсных (гидроударных) изменений давления жидкости в неоднородно-трещиновато пористом массиве действие капиллярных сил увеличивается наличием гидродинамических сил, обусловленных упругим режимом воздействия, поскольку внедренная при резком повышении давления жидкость распределяется и удерживается в капиллярах (трещинах угольного массива). В свою очередь, пульсационное изменение скоростей фильтрации жидкости в целом обуславливает изменение фазовых проницаемостей пласта, т.е. каждый цикл гидроударного воздействия на забой скважины повышает водонасыщение угольного массива вблизи полости скважины.

При практическом применении данного способа необходимо иметь в виду, что асимметрия цикла гидроударного нагружения угольного массива R_a должна быть положительной. В противном случае абсолютное давление у задвижки падает до нуля, а «жидкая колонна» в трубопроводе отрывается от задвижки, возникает относительное разрежение, образуется паровая каверна и кавитация. Это, в свою очередь, нарушает периодичность процесса, и характер изменения давления становится самозатухающим [4].

Следовательно, при нагнетании жидкости необходимо выдерживать условия:

$$R_a = \frac{\sigma_{cm} - \sigma_{y\partial}}{\sigma_{cm} + \sigma_{y\partial}} > 0, \quad (6)$$

где σ_{cm} — статическое давление нагнетания жидкости в пласт. Следует отметить, что соотношение (6) будет выполняться в случае, когда $\sigma_{cm} > \sigma_{y\partial}$.

В реальных условиях в процессе торможения потока жидкости в забое скважины или у задвижки неизбежны гидравлические потери. Часть энергии гидравлического удара за счет работы вязких сил перейдет в тепло, что, в свою очередь, вызовет изменение амплитуды гидроударной волны. Необходимый учет прироста амплитуды гидроударной волны за счет изменения температуры жидкости можно произвести с помощью формулы, которая получена в работах [4]

$$\sigma'_{y\delta} = \frac{\rho_{ж} v_{ж} \alpha_{y\delta}}{1 - \alpha_{y\delta}^2 d_p \rho_{ж} \frac{T}{C_p}}, \quad (7)$$

где d_p — коэффициент термического расширения жидкости; C_p — удельная изобарная теплоемкость; T — температура; $\alpha_{y\delta}$ — скорость движения гидроударной волны (скорость звука).

В процессе гидроударного воздействия на уголь интенсифицируется трещинообразование вокруг нагнетательной скважины. Механизм трещинообразования при волновом нагружении угля достаточно подробно рассмотрен ранее [2, 4, 8]. Трещинообразование приводит к увеличению пористости угля, которая взаимосвязана с фильтрационными возможностями исследуемого горного массива, что, в конечном счете, позволяет существенно интенсифицировать сам процесс увлажнения пласта. Одним из методов количественной оценки возможного изменения пористости угля по мере циклического воздействия на массив является использование принципа накопления повреждений в материале. Процесс накопления повреждений в массиве будет взаимосвязан с изменением пористости угля. При расчетах следует учитывать, что функция поврежденности нетронутого горного массива в принципе не может быть равной нулю, а должна соответствовать некоторой величине, равной природной поврежденности W_0 . В свою очередь, величине W_0 должны соответствовать начальные значения всех механических характеристик угля, а значение $W = 1$ характеризуется уже достижением горным массивом предельного состояния.

Для обоснования повышения эффективности процесса нагнетания жидкости в пласт за счет использования гидропульсационных эффектов рассмотрим следующую задачу. В ней развита математическая модель фильтрационных процессов, изложенных в работах [4, 5], с учетом процесса накопления повреждений в массиве по мере ее циклического нагружения, связи свойств массива с пористостью и проницаемостью пласта.

Рассмотрим такую задачу в следующей постановке. Поскольку вмещающие породы являются в значительной степени менее проницаемыми для нагнетания жидкости, чем уголь, то в дальнейшем будем считать пласт условно двухслойным: нижний слой — угольный массив с присущими ему свойствами, и верхний — породно-угольный слой, вмещающий угольный массив. За критерий условно эффективного увлажнения массива вполне можно, например, принять увеличение перехода (перетока) нагнетаемой жидкости из нижнего обрабатываемого слоя в верхний не менее чем на 10 % (или другое значение).

Для решения поставленной задачи рассмотрим процесс фильтрации жидкости в угольном пласте, состоящем, как уже отмечалось, из двух слоев мощностью h_1 , h_2 и с различной проницаемостью k_{01} и k_{02} . Проницаемости слоев, как функции от давления, описываются зависимостями [5]:

$$k_i(P) = k_{0i}(1 + \beta_i P), \quad i = 1, 2, \dots, \quad (8)$$

где k_{0i} — проницаемость, соответствующая естественным условиям залегания горной породы; β_i — коэффициент, учитывающий изменение проницаемости слоя породы при изменении параметров нагружения массива (давления и числа циклов нагружения).

Процесс фильтрации в угольном пласте, проницаемость которого характеризуется зависимостью (8), является нелинейным и описывается в одномерном случае уравнением:

$$\frac{\partial V_i}{\partial x} = \frac{k_{0i}}{\mu_2} \frac{\partial}{\partial x} \left[(1 + \beta_i P) \frac{\partial P}{\partial x} \right].$$

Пусть двухслойный пласт подвержен периодическому импульсному воздействию жидкости со стороны очистной выработки, а противоположный конец его свободен от этого давления. Суммарная мощность угольного пласта и вмещающего слоя пород значительно меньше его протяженности, т. е. $h/L_n \leq 1$, где $h = h_1 + h_2$.

Выполнение этого условия означает, что процесс фильтрации может быть рассмотрен как одномерный. При движении жидкости по двухслойному пласту с различной проницаемостью слоев происходит перетекание жидкости из одного слоя в другой. Уравнение неразрывности имеет вид [10].

$$h_i \frac{\partial V_i}{\partial x} = h_i \bar{I}_i Z_2 \frac{\partial P}{\partial t} + (-1)^i q, \quad i = 1, 2, \dots, \quad (9)$$

где Π_i — пористость слоев; Z_2 — коэффициент сжимаемости; q — количество жидкости, перетекающей из слоя в слой.

Относительно давления жидкости в слоях делается предположение, что выравнивание давления P_1 и P_2 происходит практически мгновенно и $P_1 = P_2 = P$.

Запишем уравнения (9) с учетом (7):

$$\begin{aligned} h_1 \Pi_1 Z_2 \frac{\partial P}{\partial t} - q &= \frac{k_{01} h_1}{\mu_2} \frac{\partial}{\partial x} \left[(1 + \beta_1 P) \frac{\partial P}{\partial x} \right]; \\ h_2 \Pi_2 Z_2 \frac{\partial P}{\partial t} - q &= \frac{k_{02} h_2}{\mu_2} \frac{\partial}{\partial x} \left[(1 + \beta_2 P) \frac{\partial P}{\partial x} \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Просуммировав (10), получаем уравнение, описывающее процесс нелинейной фильтрации в двухслойном пласте,

$$h_{II} Z_2 \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k_{II}}{\mu_2} \frac{\partial}{\partial x} \left[(1 + \beta_* P) \frac{\partial P}{\partial x} \right], \quad (11)$$

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

Граничное условие имеет вид:

$$P(t) = \sigma_0 \sin \omega t \quad \text{при } x = 0$$

$$P(t) = 0 \text{ при } x = L. \quad (12)$$

Перейдем к безразмерным величинам. Введем обозначения $P = \sigma_0 \bar{P}$; $\bar{x} = x/L$. Тогда:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[(1 + \beta_* P) \frac{\partial P}{\partial x} \right] = \frac{\sigma_0}{L^2} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left[(1 + \bar{\beta}_* \bar{P}) \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{x}} \right],$$

где $\bar{\beta}_* = \beta_* \sigma_0$,

Введем параметр времени t'' : ($\bar{t} = t/t''$). Из уравнения (11) следует, что:

$$\frac{1}{t''} \frac{\partial \bar{P}}{\partial t} = \frac{k_{II}}{Z_2 \mu_2 h_{II}} \frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left[(1 + \bar{\beta}_* \bar{P}) \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{x}} \right].$$

Тогда $t'' = Z_2 \mu_2 h_{II} L^2 / k_{II}$

Окончательно уравнение (11) в безразмерных величинах имеет вид:

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left[(1 + \bar{\beta}_* \bar{P}) \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{x}} \right], \quad (13)$$

где $\bar{P} = P/\sigma_0$; $\bar{x} = x/L$; $\bar{t} = tk_{II}/Z_2 \mu_2 h_{II} L^2$.

Граничное условие (12) в безразмерных величинах имеет вид:

$$\bar{P}(t) = \sin \bar{\omega} \bar{t} \text{ при } \bar{x} = 0; \quad \bar{P}(t) = 0 \text{ при } \bar{x} = 1. \quad (14)$$

где $\bar{\omega} = \omega t'' = \omega \frac{Z_2 \mu_2 h_{II} L^2}{k_{II}}$.

Решение уравнения (13) для однородного слоя [4] с использованием разложения искомой функции в ряд Фурье ищется в виде:

$$\bar{P}(x, t) = \sum_{k=0}^{\infty} \bar{P}_k \cos k \bar{\omega} \bar{t} + \bar{P}_{-k} \sin k \bar{\omega} \bar{t}, \quad (15)$$

где $P_{\pm k}$ - функции безразмерной координаты x .

Подставляя общее решение в виде (15) в уравнение (13) и граничные условия (14) и приравнявая коэффициенты при синусах и косинусах, получаем бесконечную систему нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка и граничные условия для функции $\bar{P}_{\pm k}$:

$$\frac{\partial^2 \bar{P}_{\pm n}}{\partial x^2} \mp n \omega \bar{P}_{\pm n} = -\beta \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left\{ P_0 P_{\mp n} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n-1} P_{+j} P_{\mp(n-j)} + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} P_{+k} P_{\mp(k+n)} - P_{-k+(k+n)} \right\}; \quad (16)$$

при $x=0$ $P_{+1} = 0$; $P_{-1} = -1$; $P_{\pm k} = 0$ ($k \neq 1$)

при $x=1$ $P_{\pm k} = 0$ ($k = 0, 1, \dots$).

(17)

Пусть $n=0$. Тогда из (1.16) с учетом (1.17) получаем:

$$P_0 = -\frac{\beta}{4} \left(2\sigma_\delta^2 + \sum_{k=1}^{\infty} P_{+k}^2 + P_{-k}^2 + x - 1 \right).$$

В случаях, когда коэффициент нелинейности β мал, т. е. зависимость проницаемости от давления слабо нелинейная, для отыскания функций $P_{\mp k}$ может быть использован метод малого параметра. Решение системы (16) в виде ряда по степеням малого параметра $P_{\mp k} = \sum_{n=1}^{\infty} \beta^n P_{\mp k}^{(n)}$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) позволяет получить из (16) системы рекуррентных соотношений для определения функций $P_{\mp k}$ при степенях β .

Первую гармонику $\bar{P} = P_{+1} \cos \omega t + P_{-1} \sin \omega t$ приближенно определяет решение линейной однородной системы, соответствующей (16),

$$P_{+1} = \delta^{-1} [ch\xi(1-x)\sin\xi(1-x)sh\xi \cos\xi - sh\xi(1-x)\cos\xi(1-x)ch\xi \sin\xi];$$

$$P_{-1} = \delta^{-1} [ch\xi(1-x)\cos\xi(1-x)sh\xi \cos\xi + sh\xi(1-x)\sin\xi(1-x)ch\xi \sin\xi];$$

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

Решение (16) с учетом величин порядка β имеет вид:

$$\bar{P} = \beta\sigma_\delta + P_{+1} \cos \omega t + P_{-1} \sin \omega t + \beta(P_{+2} \cos 2\omega t + P_{-2} \sin 2\omega t). \quad (18)$$

Вид функции $P_{\mp k}$ не приведен из-за их громоздкости.

Выполненные ранее расчеты давления $\bar{P} = (\bar{x}, \bar{\omega})$ в области малых и больших частот возбуждения [4, 5] показывают, что для малых частот ($\bar{\omega} \leq 1$) решение практически не отличается от квазистационарного. В области больших частот распределение давления по координате резко нелинейное. Полученный результат очень важен при исследовании межслойного перетока жидкости при нагнетании ее в угольный пласт в вибрационных режимах.

Получим расчетную формулу для локального среднего по времени межслойного перетока жидкости в предположении, что выравнивание давления в обоих слоях происходит мгновенно, т. е. $\bar{P}_1 = \bar{P}_2 = P$. Проинтегрировав по циклу (8) с учетом (18), получаем:

$$\bar{q}(\bar{x}, \bar{\omega}) = 2\bar{\omega}(\bar{\beta}_1 - \bar{\beta}_2)\bar{k}_{12} \frac{ch2\xi(1-\bar{x}) + \cos 2\xi(1-\bar{x})}{ch2\xi - \cos 2\xi}, \quad (19)$$

где $\bar{\beta}_1 = \beta_1\sigma_\delta$; $\bar{\beta}_2 = \beta_2\sigma_\delta$; $\bar{k}_{12} = \frac{k_{01}h_1k_{02}h_2}{k_n^2}$.

Проинтегрировав (19) по длине пласта, получим формулу для расчета суммарного среднего по времени перетока жидкости из одного слоя в другой

$$\bar{q} = 2\xi(\bar{\beta}_1 - \bar{\beta}_2)\bar{k}_{12} \frac{ch2\xi + \sin 2\xi}{ch2\xi - \cos 2\xi}. \quad (20)$$

Формулы (19) и (20) получены в предположении, что вибрационное воздействие па угольный пласт не изменяет в рассматриваемый период времени физические характеристики угольного пласта, в частности, пористость. Однако, как показывают исследования [4, 9], вибрационное нагружение угольного пласта приводит к увеличению его пористости, а следовательно, характер перетока жидкости будет в этом случае отличаться от зависимостей (19), (20).

Для исследования влияния гидропульсационного воздействия на изменение суммарного среднего по времени перетока жидкости из одного пласта в другой воспользуемся экспериментальными данными, где приведены зависимости проницаемости от коэффициента пористости и структуры порового пространства (удельной поверхности и извилистости поровых каналов породы), а также данными по исследованию накоплений усталостных повреждений угля [11].

В дальнейшем будем предполагать, что при гидропульсационном воздействии изменением удельной поверхности и извилистости поровых каналов угля можно пренебречь по сравнению с изменением пористости. Тогда функциональное соотношение для коэффициента проницаемости - при вибрационном воздействии будет иметь вид:

$$k(\omega) = F[\Pi(\omega), S', L_k / L_p], \quad (21)$$

где F — некоторая функция; S' — удельная поверхность каналов фильтрации; L_k — среднеквадратическая длина каналов; L_p — кратчайшее расстояние между началом и концом канала.

Аппроксимируя экспериментальную зависимость между коэффициентом проницаемости и пористостью [12] логарифмической функцией, получаем:

$$\lg k = 25\Pi - 4 \quad (22)$$

Зависимость между коэффициентом проницаемости, пористостью и структурой порового пространства имеет вид:

$$k = f\Pi / (S^{12} - T''), \quad (23)$$

При вибрационном воздействии, как следует из (21),

$$k(\omega) = \frac{f[\Pi(\omega)]}{S^{12}T''}, \quad (24)$$

Тогда, вследствие постоянства структуры порового пространства (S^{12} и T''), получаем формулу для определения коэффициента проницаемости при гидропульсационном воздействии:

$$k(\omega) = \frac{kf[\Pi(\omega)]}{f(\Pi)}. \quad (25)$$

В формуле (25) неизвестна пока функциональная зависимость изменения пористости от частоты и длительности пульсационного воздействия па уголь-

ный (горный) массив. Согласно зависимостям, полученным в [4, 11], текущие значения пористости угля по мере циклического нагружения массива и, соответственно, накопления повреждений имеют вид:

$$\Pi_t = \Pi_0 + \Delta\Pi = \Pi_0 + \frac{2Wc'(1-2\nu)}{1-2Wc'(1-2\nu)}, \quad (26)$$

где Π_0 — начальная (природная) пористость угля; c' и α' — постоянная малоциклового усталости; W — функция накопления повреждений в угле.

Согласно [4]

$$W = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_n}{Ec'} + N^{\alpha_1} \right). \quad (27)$$

В случае выполнения оценки влияния воздействия гидроударных волн на угольный пласт в объемной постановке величину σ_n принимают равной σ_s (σ_s — эквивалентные напряжения, вычисленные через компоненты напряжения).

Приведенные выше исследования позволили получить функциональные зависимости для анализа фильтрационного процесса в угольном массиве при гидропульсационном воздействии с учетом возможного изменения проницаемости. Разработанный алгоритм и блок-схема программы позволяют анализировать различные технологические режимы гидропульсационного воздействия при различных физико-механических характеристиках угольного пласта и вмещающих пород в диалоговом режиме.

Исходными данными для реализации расчетной программы являются σ_0 — амплитуда вынужденных колебаний давления; N — число циклов нагружения; k_{01}, k_{02} — проницаемости слоев, соответствующие естественным условиям залегания пласта; β_1, β_2 — коэффициенты нелинейности слоев; Z_1, Z_2 — коэффициенты сжимаемости; μ_1 — вязкость жидкости; Π_1, Π_2 — пористости; E — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона; h_1, h_2 — мощности слоев; L — длина обрабатываемого участка пласта.

Численные расчеты проводили при следующих значениях физико-механических и геометрических параметров угольного пласта и вмещающих пород: $k_{01} = 10^{-10} \text{ м}^2$, $k_{02} = 10^{-11} \text{ м}^2$, $\beta_1 = 0,4 \text{ м}^2 / \text{Н}$, $\beta_2 = 0,1 \text{ м}^2 / \text{Н}$, $h_1 = 0,5 \text{ м}$, $h_2 = 2 \text{ м}$, $L = 10 \text{ м}$, $\Pi_1 = 0,3$, $\Pi_2 = 0,2$. Результаты численного расчета вариантов представлены на рис. 1 и 2.

При расчетах фильтрационного процесса в угольном массиве при гидропульсационном воздействии реализуется модель, согласно которой пористость и проницаемость монотонно возрастают при увеличении числа циклов нагружения. Анализируя полученные результаты, легко видеть, что средний суммарный переток возрастает с ростом числа циклов нагружения. При высоких значениях числа циклов пульсаций начинает проявляться насыщение массива жидкостью, причем насыщение наступает при меньшем числе циклов в случае большого времени вибрации.

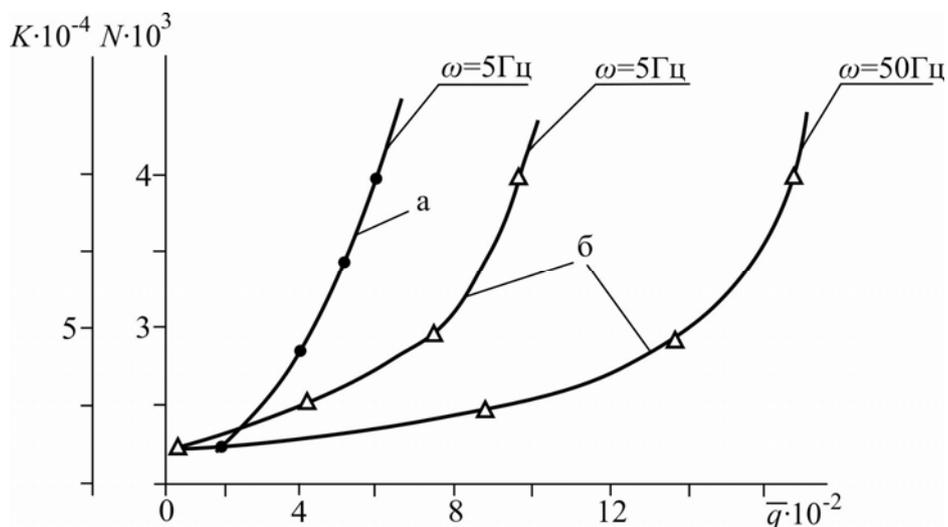


Рисунок 1 - Изменение среднего перетока жидкости \bar{q} в зависимости от числа циклов гидропульсаций N (а) и проницаемости k (б)

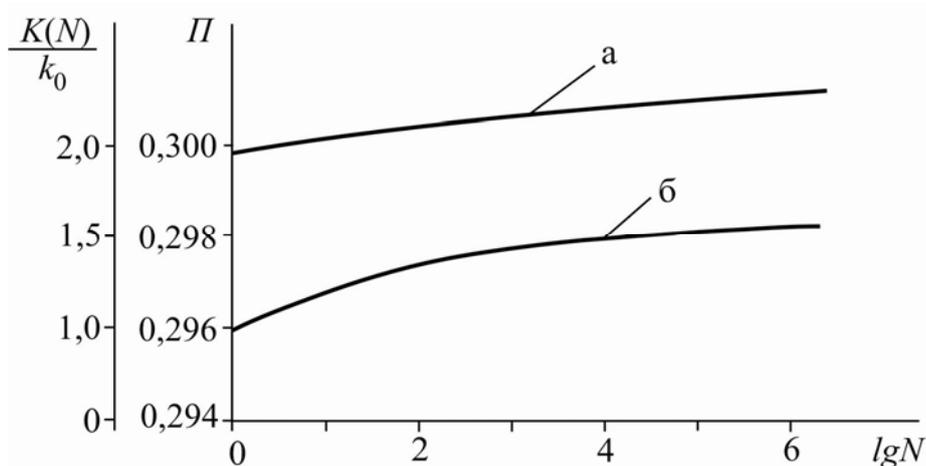


Рисунок 2 - Зависимость изменения пористости Π (а) и проницаемости k (б) от числа циклов гидропульсаций

Средний суммарный переток жидкости \bar{q} существенно зависит и от проницаемости. До значений проницаемости менее 10^{-1} наблюдается пропорциональная зависимость между перетоком и проницаемостью. При дальнейшем увеличении проницаемости рост среднего суммарного перетока замедляется.

Таким образом, обоснованная в работе модель механизма фильтрационных процессов в горном массиве при наложении гидравлических ударов на столб нагнетаемой в пласт жидкости позволяет оценить условия разрыхления и увлажнения угольного массива при выполнении противовыбросного мероприятия. Показано, что пористость и проницаемость угольного массива монотонно возрастают при увеличении числа циклов ударного нагружения, при этом средний суммарный переток нагнетаемой жидкости возрастает с ростом числа циклов ударного нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горные работы в сложных условиях на выбросоопасных угольных пластах // Минеев С.П., Рубинский А.А., Витушко О.В., Радченко А.Г. – Донецк: Східний видавничий дім, 2010.- 603 с.

2. Потураев, В.Н. Научно-технические принципы виброволновой и пульсационной обработки выбросоопасных пластов / В.Н. Потураев, А.Ф. Булат С.П. Минеев // Уголь Украины.- 1992.- № 3.- С. 29-36.
3. Усов, О.А. Сравнение энергии воздействия кавитационных колебаний воды на стенки скважины с энергией воздействия на массив отбойного молотка / О.А. Усов, А.А. Потапенко // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2012. – вып. 95.- С.223-229.
4. Потураев, В. Н. Использование волновых и вибрационных эффектов при отработке выбросоопасных пластов / В.Н. Потураев, С.П. Минеев. — Киев: Наук. думка, 1992.— 219 с.
5. Цынкова, О. Э. О режиме вынужденных колебаний для нелинейной фильтрации жидкости в пласте / О.Э. Цынкова // Механика жидкости и газа.— 1974.— № 4.— С. 62—68.
6. Моисеенко, П.Ю. Обоснование параметров кавитационного генератора для гидрорыхления угольных пластов: автореф. дис. на соискан. ученой степ. канд. техн. наук: спец. 05.05.06 / П.Ю. Моисеенко.- Днепропетровск, 2010.- 20 с.
7. А. с. № 1081356, СССР МКИ⁴Е 21Г 5/00. Способ предотвращения внезапных выбросов угля и газа / А. Н. Зорин, А. П. Клец, В. Г. Колесников, С. П. Минеев, И. А. Гайнутдинов, В. С. Лапко.— Опубл. 23.09.84.- Бюл. № 11.
8. Минеев, С.П. Снижение выбросоопасности угольных пластов вибрационным воздействием на горный массив / С.П.Минеев, В.В. Репецкий // Уголь Украины.-1987.- № 10.- С. 39-40.
9. Гидравлика гидромашин и гидроприводы / Т. М. Башта, С. Н. Руднев, Б. Б. Некрасов [и др].— М.: Машиностроение, 1982.— 442 с.
10. Круш, И.И. Особенности численного анализа динамических систем переменной структуры / И.И. Круш, В.П. Сергеев // Вибрационные эффекты в горных машинах и технологиях.— Киев: Наук. думка, 1990.—С. 107—111.
11. Минеев, С.П. Характеристики циклической долговечности угля // Уголь Украины. 1987.- №2.- С. 17-18.
12. Кобранова, В. Н. Физические свойства горных пород.— М. : Гостоптехиздат, 1962.— 490 с.

REFERENCES

1. Mineev, S.P., Rubinsky, A.A., Vitushko, O.V. and Radchenko, A.G. (2010), *Gorniyе raboty v slozhnich usloviyakh na vybrosopasnykh ugolnikh plastakh* [Mining operations in difficult conditions on the outburst coal seams], Shidny vidavnichy Dim, Donetsk, Ukraine.
2. Poturaev, V.N., Bulat, A.F. and Mineev, S.P. (1992), "Scientific and technical principles and fluctuation vibrovолnovoy processing outburst layers", *Coal of Ukraine*, no. 3. - pp. 29-36.
3. Usov, O.A. Comparison of effects of cavitation energy vibrations of water on the walls of the well with the energy impact on the array jackhammer / O.A. Usov, A.A. Potapenko // *Geo-Technical Mechanics*, no. 95, p.223 -229
4. Poturaev, V.N. and Mineev S.P. (1992), *Ispolzovaniye volnovykh i vibracionnyrh effektov pri otrabotke vybrosopasnykh plastov* ["Using the wave and vibration effects when developing outburst seams], Naukova Dumka , Kiev, Ukraine.
5. Tsynkova, O.E. (1974), "About forced oscillation mode for nonlinear filtering fluid in the reservoir", *Fluid Mechanics*,no. 4 . - pp. 62-68.
6. Moiseenko, P.Y. (2010), "Justification cavitation generator parameters for coalbed gidroryhleniya", abstract of Ph. D. dissertation, 05.05.06, Dneprpopetrovsk, Ukraine.
7. A. p. Number 1081356, USSR, MKI⁴E 21G 5/00. A method for preventing sudden coal and gas / A.N. Zorin, A.P. Klets, V.G. Kolesnikov, S.P. Mineev, I.A. Gainutdinov, V.S. Lapko. - Publ . 09.23.84 . Bull. № 11.
8. Mineev, S.P. and Repetsky, V.V. (1987), "Reduced outburst coal seams vibration exposure Massif", *Coal of Ukraine*, no. 10, pp 39-40.
9. Bashta, T.M., Rudnev, S.N. and Nekrasov, B.B. (1982), *Gidravlika gidromashin I gidroprivody* [Hydraulic machines and hydraulic transmissions], Engineering , Moscow, Russia.
10. Crush, I.I. and Sergeev, V.P. (1990), "Features of the numerical analysis of dynamical systems with variable structure", *Vibration effects in mining machinery and technology*, Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
11. Mineev, S.P. (1987), "Characteristics cyclic durability of coal", *Coal of Ukraine*, no. 2, pp 17-18.
12. Kobranova, V.N. (1962), *Fizicheskiye svoystva gornykh porod* [Physical properties of rocks], Gostoptekhizdat, Moscow, Russia.

Об авторах

Минеев Сергей Павлович, д-р техн. наук, профессор, зав. отделом управления динамическими проявлениями горного давления Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), sergmineev@gmail.com.

Потапенко Александр Алексеевич, генеральный директор "Донецкая угольная энергетическая компания" (ДУЭК).

About the authors

Mineev Sergei Pavlovich, D.Sc. (Tech.), Professor, Head of Department of Pressure Dynamic Control in Rocks of the N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics NAS of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), sergmineev@gmail.com.

Potapenko Alexander Alekseyevich, General Director of "Donetsk Coal Energy Company" (DUEK).

Анотація. В роботі обгрунтований механізм процесів фільтрацій в гірському масиві, що відбуваються під час накладення гідравлічних ударів на потік рідини, що нагнітається у вугільний пласт. Даний механізм може бути використаний для підвищення ефективності нагнітання рідини в пласт в режимі його гідравлічного спущення. Модель даного механізму дозволяє оцінити умови спущення привибійної частини пласта і параметри ефективного зволоження вугільного масиву при виконанні протівовикидного заходу. Приведена залежність зміни пористості у міру циклічного навантаження масиву за рахунок накопичення пошкоджень в кутку. Показано, що пористість і проникність вугільного масиву монотонно зростають до певної величини при збільшенні числа циклів ударного навантаження, при цьому середнє сумарне перетікання рідини, що нагнітається в пласт, зростає із зростанням числа циклів ударного навантаження.

Ключові слова: зволоження масиву, протівовикидний захід, гідродудар, фільтраційний процес.

Annotation. Mechanism of filtration processes in the rocks occurred at applying hydraulic shock on the stream of liquid injected into the coal layer is explained in this work. This mechanism can be used for improving liquid injection into the layer when the layer is in the process of hydraulic loosening. A model of this mechanism allows to determine conditions for loosening a face area of the layer and parameters for effective watering of the coal mass at implementation of measures against outburst. Dependence of porosity changes in the process of cyclic loading of the coal mass due to accumulated coal disturbances is presented. It is shown that coal porosity and permeability increase monotonically up to a certain size at increasing number of cycles of the shock loading, and average total flow of liquid injected into the coal mass increases with grown number of cycles of the shock loading.

Keywords: watering of the coal mass, measures against outburst, hydraulic shock, filtration process.

Статья поступила в редакцию 14.01. 2014

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук К.К. Софийским

УДК 622.833.5.622.016.52

Г.А. Симанович, д-р техн. наук, профессор,
В.В. Фомичов, канд. техн. наук, доцент,
В.А. Соцков, аспирант
(ГВУЗ «НГУ»)

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОН ПОВЫШЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, ВЛИЯЮЩИХ
НА УСТОЙЧИВОСТЬ ДЕМОНТАЖНОЙ КАМЕРЫ В ЗОНЕ
ОЧИСТНЫХ РАБОТ**

Г.А. Симанович, д-р техн. наук, професор,
В.В. Фомичов, канд. техн. наук, доцент,
В.О. Соцков, аспирант
(ДВНЗ «НГУ»)

**ВИЗНАЧЕННЯ ЗОН ПІДВИЩЕНИХ НАПРУЖЕНЬ, ЩО
ВПЛИВАЮТЬ НА СТІЙКІСТЬ МОНТАЖНОЇ КАМЕРИ В ЗОНІ
ОЧИСНИХ РОБІТ**

G.A. Simanovich, D.Sc. (Tech.), Professor,
V.V. Fomichov, Ph.D. (Tech.), Associate Professor
V.A. Sotskov, Doctoral Student
(SHEE “NMU”)

**DETERMINATION OF AREAS WITH HIGH STRESSES IMPACTING ON
DISMANTLING DRIFT STABILITY IN A ZONE WITH WINNING
OPERATIONS**

Аннотация. В ходе вычислительного эксперимента выполнен расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород вокруг лавы при пошаговом приближении забоя к демонтажному штреку. Выявленные особенности НДС близлежащего массива позволяют обоснованно подходить к выбору схем поддержания подготовительной выработки с учетом влияния приближающейся лавы. Построение функции перехода, основанной на сформированных допущениях, позволило определить координаты оптимального обрушения породных слоев. Полученные результаты анализа вычислительного эксперимента, проведенного для условий шахт Западного Донбасса, показали возможность эффективно использования для обоснования технических решений параметров зон концентрации напряжений в условиях взаимного влияния подготовительной выработки и очистного забоя.

Ключевые слова: вычислительный эксперимент, очистные работы, демонтажный штрек

Актуальность. Взаимное влияние горных выработок может носить различный характер. При неизменных геометрических составляющих сопряжения выработок анализ их устойчивости следует проводить с применением статических постановок задачи [1 - 3].