

УДК 622.236.52

А.В. Бартышев

ГИДРОМОНИТОРНАЯ СТРУЯ И МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ УГЛЯ

С использованием теории турбулентных струй и результатов стендовых исследований разработана инженерная модель гидромониторной струи, для разрушения угольного массива. Введен коэффициент осевого динамического давления, оценивающий характеристики гидромонитора. Показано, что все основные характеристики струи могут быть выражены через этот коэффициент. Рассчитаны эффективная длина струи и радиус эффективного ядра, определяющие разрушающую часть струи. Предполагается, что разрушение происходит при превышении осевого динамического давления над критерием разрушаемости. Введена эмпирическая зависимость производительности разрушения от параметров гидромониторной струи и угольного массива.

Ключевые слова: гидромониторная струя, динамическое давление, критерий разрушаемости угольного массива, коэффициент осевого динамического давления, эффективная длина струи, радиус эффективного ядра.

Описание процесса разрушения угля гидромониторной струей является сложной задачей: характер взаимодействия струи с угольным массивом существенно изменяется во времени и практически невозможно учесть все факторы, влияющие на интенсивность разрушения. Ясно одно, что чем «сильнее» струя в точке контакта, тем выше производительность разрушения. Поэтому необходимо знать, как изменяются силовые характеристики гидромониторной струи по ее длине. Многочисленные стендовые исследования и наблюдения в условиях реальных гидрошахт позволили заметить, что эффективность гидроотбойки напрямую зависит от качества гидромонитора. В настоящей работе построена расчетная модель гидромониторной струи, описывающая ее динамические характеристики в зависимости от конструкции гидромонитора, предназначенная

для определения производительности гидравлического разрушения угля по длине струи в различных горно-геологических условиях.

Для установления связи между параметрами струи и угольного массива предположим, что в зависимости от марки и прочности угля, глубины и условий залегания существует минимальная величина динамического давления струи P_{min} в точке контакта струи с массивом, при превышении которой начинается процесс разрушения. Если максимальное динамическое давление в сечении струи (осевое) P на поверхности контакта меньше P_{min} , то разрушения не происходит.

Наиболее достоверные результаты будут получены, если эмпирическую постоянную P_{min} определить непосредственно из опыта. Для этого необходимо в забое установить гидромонитор с известными гидро-

* Работа выполнялась в рамках государственного контракта Минобрнауки России №16.515.11.5073 от 06.10.2011 года.

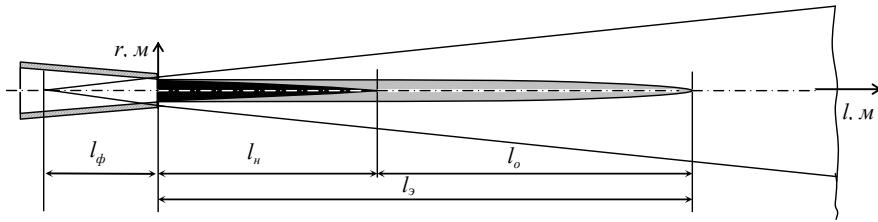


Рис. 1. Схема гидромониторной струи

динамическими параметрами струи и отрабатывать заходку до тех пор, пока разрушение угля не прекратится. После этого измеряются расстояние l_s от насадка до угольного массива. По известному закону изменения осевого динамического давления $P_m = P_m(l)$ (далее по тексту формула (3)) можно определить давление P_{min} как значение функции при $l=l_s$, то есть $P_{min}=P_m(l_s)$.

Если нет возможности провести такой эксперимент, то значение P_{min} рассчитывается по условному пределу прочности, определяемому как среднее геометрическое предела прочности на сжатие σ_c и предела прочности на растяжение σ_p образца стандартного размера

$$R_y = \frac{\sqrt{\sigma_p \sigma_c}}{3}, \quad (1)$$

где R_y — условный предел прочности, МПа; σ_p и σ_c — пределы прочности на растяжение и на сжатие, МПа.

Будем считать, что гидромониторная струя на основном участке представляет собой стационарную осесимметричную сплошную среду переменной плотности, состоящую из воды и микропузырьков воздуха. Плотность струи уменьшается по мере удаления от насадка за счет расширения потока и увеличения доли воздуха.

На рис.1 представлена схема гидромониторной струи. Эффективная часть струи гидромонитора (l_s) содержит два участка: начальный (l_u), и основной (l_o). На начальном участке осевое динамическое давление P_m постоянно и равно подводимому к гидромонитору P_0 (ядро постоянных давлений). На основном участке осевое динамическое давление струи уменьшается от P_0 до критерия разрушаемости P_{min} .

Основной параметр «разрушающей» гидромониторной струи $P(l, r)$ — динамическое давление (интегральная характеристика, учитывающая скорость и плотность одновременно), определяющее способность струи разрушать уголь и измеряемая с помощью гидравлического датчика давления (трубки Пито).

Обработка результатов многочисленных измерений параметров гидромониторной струи на различных расстояниях показала, что величина динамического давления на основном участке, в сечении на расстоянии l от насадка, распределяется по закону, соответствующему решению уравнений пограничного слоя при рассмотрении турбулентной осесимметричной струи-источника несжимаемой жидкости, допускающей автомодельные решения [2]

$$P(r, l) = \frac{P_m(l)}{\left(1 + \frac{r^2}{(\varepsilon \cdot l)^2}\right)^2}, \quad (2)$$

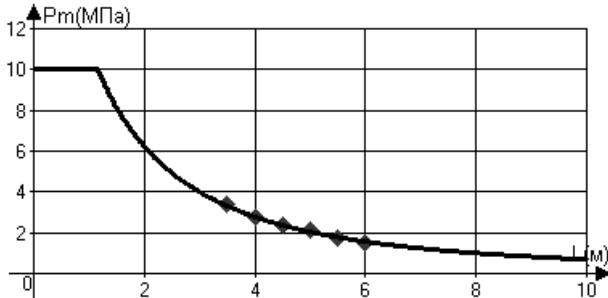


Рис. 2. Изменение осевого динамического давления по длине струи

где ε — эмпирическая постоянная, определяемая из опыта и зависящая от характеристик струеформирующих узлов гидромонитора, а P_m — осевое динамическое давление на расстоянии l от насадки.

В рамках предложенной модели, учитывая постоянство импульса, получим, что изменение динамического давления по оси гидромониторной струи обратно пропорционально квадрату расстояния от насадка гидромонитора, и, с учетом экспериментальных данных (рис.2), имеет вид:

$$P_m(\ell) = \frac{\delta}{(l + l_\phi)^2}, \quad (3)$$

где δ — постоянная, определяемая из опыта, а l_ϕ — расстояние от фокуса до насадки.

Объединяя выражения (1) и (3), получим закон изменения динамического давления на основном участке гидромониторной струи как функцию двух переменных r и l с тремя параметрами δ , ε и l_ϕ

$$P(r, \ell) = \frac{\delta}{(l + l_\phi)^2 \left(1 + \left(\frac{r^2}{\varepsilon l} \right) \right)^2}. \quad (4)$$

Для гидромониторных струй значения эмпирических констант зависят от конструкции гидромонитора и ка-

чества изготовления его проточной части, наличия успокоителя и его типа, конфигурации насадка и степени чистоты обработки его внутренней поверхности. Более того, эти постоянные могут изменяться по причинам, которые трудно обнаружить и поэтому оценивают качество струеформирования конкретного гидромонитора. Вычисление значений этих констант через число Рейнольдса потока в стволе, параметры гидромонитора, успокоителя или насадка, возможно только для «идеального» гидромонитора. Однако, в промышленных условиях оценить качество струи можно только прямым экспериментом.

В [6] автором было введено понятие «коэффициента осевого динамического давления» K_d (КОДД), который вычисляется по результату изменения осевого динамического давления P_{mk} на расстоянии $l_k = 200d_0$, по формуле

$$K_d = \frac{P_{mk}}{P_0}. \quad (5)$$

Достоинством предложенной расчетной модели является то, что один этот эмпирический коэффициент K_d , (учитывая закон сохранения импульса, d_0 — диаметр насадка и P_0 — подводимое давление) позволяет определить все динамические параметры струи. Из закона сохранения импульса, поскольку на выходе из насадка $J_0 = P_0 S_0 = \frac{1}{4} \pi P_0 d_0^2$ (где S_0 — площадь насадка) следует

$$\frac{1}{4} \pi P_0 d_0^2 = \pi P_m (\varepsilon l)^2 \text{ или}$$

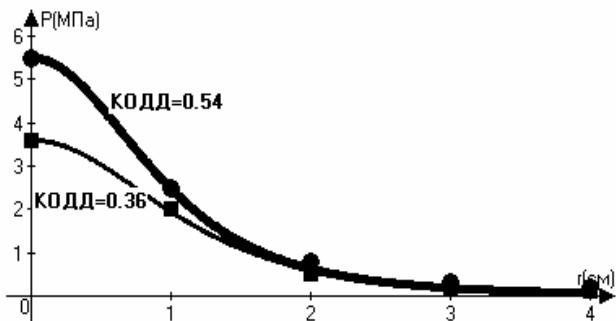


Рис. 3. Распределение динамического давления в сечении струи

$$\varepsilon = \frac{d_0}{2l_k} \sqrt{\frac{P_0}{P_{mk}}} = \frac{d_0}{2l_k \sqrt{K_d}} = \frac{1}{400\sqrt{K_d}}. \quad (6)$$

Найденное значение ε численно равно тангенсу угла расширения струи и поэтому позволяет количественно оценить компактность струи. Чем меньше ε , тем меньше угол расширения струи, то есть струя распадается медленнее. Учитывая это, будем называть ε «коэффициентом компактности». Зная тангенс угла расширения струи, легко найти расстояние от среза насадки до фокуса струи

$$l_\phi = \frac{d_0}{2\varepsilon} = l_k \sqrt{K_d} = 200d_0 \sqrt{K_d}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (3) и, учитывая определение КОДД, найдем δ :

$$\begin{aligned} \delta &= K_d P_0 \left(\frac{d_0}{2\varepsilon} + 200d_0 \right)^2 = \\ &= K_d P_0 l_k^2 \left(\sqrt{K_d} + 1 \right)^2 = \\ &= K_d P_0 (200d_0)^2 \left(\sqrt{K_d} + 1 \right)^2. \end{aligned} \quad (8)$$

Так как δ прямо пропорциональна осевому динамическому давлению (3), то вполне естественно назвать ее «коэффициентом дальности». Чем больше «коэффициент дальности»

«сти», тем дальше струя сохраняет разрушительную способность, тем больше ее эффективная длина. На рис.3 приведено распределение динамического давления в сечении струи на основном участке для двух гидромониторов с различными КОДД.

Отметим, что «коэффициент компактности» и «коэффициент дальности» удачно дополняют

друг друга, задавая два измерения струи: продольное и поперечное. Таким образом, для полного описания скалярного поля динамического давления струи на основном участке достаточно знать начальные условия истечения — подводимое давление и диаметр насадка, а также измерить осевое (максимальное) динамическое давление на расстоянии $l_k = 200d_0$ (примерно 3 — 6 м) для определения КОДД.

Введенные критерии компактности и дальности струи ε и δ позволяют сравнивать между собой различные струеформирующие устройства и проверять качество гидромонитора по испытаниям в условиях гидродинамического стенда.

Разработанная модель гидромониторной струи позволяет вычислить основные параметры струи, которые в дальнейшем будут использованы при описании процесса гидравлического разрушения угольного массива.

Длину начального участка можно определить, если подставит в (3) $P_m = P_0$:

$$l_h = \sqrt{\frac{\delta}{P_0}} - l_\phi = l_k K_d = 200d_0 K_d. \quad (9)$$

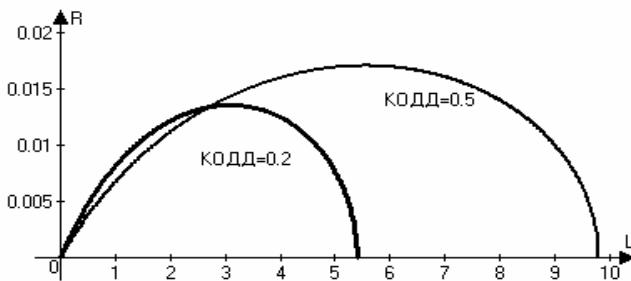


Рис. 4. Границы эффективных ядер двух гидромониторов

Длина начального участка гидромониторной струи характеризует падение осевого динамического давления и, таким образом, является эмпирической постоянной (пропорциональна КОДД), с четко выраженным физическим смыслом.

Эффективная длина струи вычисляется из (3), если положить осевое динамическое давление равным критерию разрушаемости $P_m = P_{min}$. Разрешая это уравнение относительно I с учетом значений δ и I_ϕ из (7) и (8), получим

$$I_s = 200d_0\sqrt{K_d} \left[(4\sqrt{K_d} + 1) \sqrt{\frac{P_0}{P_{min}}} - 1 \right]. \quad (10)$$

Нетрудно заметить, что дальность действия струи пропорциональна коэффициенту δ и поэтому оправдано его название — «коэффициент дальности струи».

Границу струи можно определить как поверхность уровня скалярного поля динамического давления, на которой оно имеет постоянное значение P_r (например, P_r равно атмосферному давлению). Граница определяет пределы интегрирования при вычислении потока кинетической энергии и других интегральных величин. Уравнение границы полу-

шим из (4), полагая $P=P_r$ и выразив радиус через расстояние от насадки:

$$r = \varepsilon l \sqrt{\frac{1}{I + I_\phi} \sqrt{\frac{\delta}{P_r}} - 1}.$$

Если положить $P_r=P_{min}$, то получим границу **эффективного ядра струи**, которое разрушает массив. Зависимость радиуса эффективного ядра от I имеет вид:

$$\begin{aligned} R_s &= \varepsilon l \sqrt{\frac{1}{I + I_\phi} \sqrt{\frac{\delta}{P_{min}}} - 1} = \\ &= \varepsilon l \sqrt{\frac{(\sqrt{\frac{\delta}{P_{min}}} - I_\phi) - 1}{I + I_\phi}} = \varepsilon l \sqrt{\frac{I_s - I}{I + I_\phi}}. \end{aligned} \quad (11)$$

Исследуя эту функцию, найдем ее максимальное значение R_{sm} , которое равно

$$R_{sm} = \frac{1}{2} \varepsilon l_s \sqrt{\frac{I_s}{I_s + 2I_\phi}} \text{ при } I = \frac{I_s}{2}. \quad (12)$$

На рис. 4 изображены эффективные ядра двух гидромониторов с различными коэффициентами осевого динамического давления.

Используя полученные ранее зависимости, радиус эффективного ядра струи может быть выражен через КОДД и входные данные:

$$\begin{aligned} R_s &= \frac{l}{400\sqrt{K_d}} \times \\ &\times \sqrt{\frac{200d_0\sqrt{K_d} \left[(4\sqrt{K_d} + 1) \sqrt{\frac{P_0}{P_{min}}} - 1 \right] - l}{l + 200d_0\sqrt{K_d}}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Сила удара гидромониторной струи на основном участке на расстоянии I от насадка на круговую площадку радиуса R с центром, расположенным на оси струи, равна:

$$F(l, R) = 2\pi \int_0^R P \cdot r dr = 2\pi \int_0^R \frac{P_m}{\left(1 + \frac{r^2}{(\varepsilon l)^2}\right)} r dr = \\ = \frac{\pi (\varepsilon l)^2 R^2}{(\varepsilon l)^2 + R^2} P_m. \quad (14)$$

Если в качестве R возьмем R_s , то получим силу удара эффективной части струи $F_s(l)$, которая служит интегральной характеристикой активного ядра струи

$$F_s(l) = \pi \frac{(\sqrt{K_d} + 1) d_0 \sqrt{P_0 P_{\min}}}{800 \sqrt{K_d} (4\sqrt{K_d} + 1)} \times \\ \times \left(\frac{l}{l + l_\phi} \right)^2 (l_s - l). \quad (15)$$

Полученные динамические характеристики гидромониторной струи позволяют предложить модель гидравлического разрушения угольного массива, учитывая изменение интенсивности разрушения в зависимости от расстояния между насадкой и забоем.

Методики расчета параметров гидравлического разрушения, используемые в настоящее время [4,5,8], базируются на результатах длительных экспериментов с хронометражными наблюдениями, а получаемые эмпирические зависимости описывают только средние величины, справедливые в конкретных горно-геологических условиях. При этом входными параметрами являются только подводимое давление и расход, без учета качества струи (гидромонитора): компактности и дальностью. Получение зависимости производительности разрушения от параметров струи позволит более точно планировать горные работы, определять оптимальные параметры выработок в зависимости от имеющегося оборудования, управлять про-

цессом разрушения в забое, выбирать оптимальные входные параметры (тип гидромонитора, диаметр насадка и т.п.) и, наконец, создать теоретическую базу для автоматизации перемещения струи по забою.

В предлагаемой модели угольный массив рассматривается как сплошная среда, у которой в каждой точке определен критерий гидравлической разрушенности P_{\min} (введенный ранее), а гидромониторная струя в виде осесимметричного скалярного поля динамического давления, изменяющегося по длине струи и в ее сечении.

Анализ теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия гидромониторной струи с угольным массивом позволил установить, что производительность гидравлического разрушения прямо пропорциональна осевому динамическому давлению струи гидромонитора $P_m(l)$ (динамическая характеристика струи) и площади эффективного ядра $S_s(l)$ (связь струи с массивом).

$$Pr(l) = C \cdot Pr_p(l) = C \cdot P_m(l) \cdot S_s(l), \quad (16)$$

где C — коэффициент, характерный для полуэмпирических моделей, связывающий расчетную производительность с реальной и определяемый по результатам шахтных экспериментов. Заметим, что эта функция обнуляется на расстояниях, где осевое динамическое давление становится меньше критерия гидравлической разрушенности ($P_m \leq P_{\min}$), так как площадь эффективного ядра обращается в ноль и разрушение прекращается.

Производительность гидроразрушения по уравнению (16) не зависит явно от общего расхода, как в известных формулах, используемых ранее [1,3,5], так как учитывает только разрушающую часть струи.

Учитывая кусочно-непрерывный характер зависимостей осевого динамического давления $P_m = P_m(l)$ и площади эффективного ядра $S_3 = S_3(l)$, предложенные в инженерной модели гидромониторной струи функция, задающая расчетную производительность уравнения (16) разобьется на три части:

$$Pr_p(l) = \frac{\pi}{4} P_0 \varepsilon^2 \frac{l^3}{l_3 + 2l_\phi} \quad \text{при } l \in [0, l_h], \quad (17)$$

$$Pr_p(l) = \frac{\pi}{4} \delta \varepsilon^2 \frac{l^3}{(l_3 + 2l_\phi)} \frac{1}{(l + l_\phi)^2} \quad \text{при } l \in \left[l_h, \frac{l_3}{2} \right], \quad (18)$$

$$Pr_p(l) = \pi \delta \varepsilon^2 \frac{l^2(l_3 - l)}{(l + l_\phi)^3} \quad \text{при } l \in \left[\frac{l_3}{2}, l_3 \right]. \quad (19)$$

Переход от точечного разрушения угольного массива по длине струи к разрушению некоторого объема заданной конфигурации основывается на механизме элементарного взаимодействия струи и угольного массива. Процесс разрушения опишем дифференциальным уравнением $dV = Pr(l)dt$, где dV — элемент объема угольного массива, dt — элемент времени, а $Pr(l)$ — производительность, определяемая формулой (16).

Интегрируя уравнение, получим время T выемки объема угля V , при известных параметрах отрабатываемой заходки (Q)

$$T = \iiint_Q \frac{dV}{Pr(l)} = \frac{1}{C} \iiint_Q \frac{dV}{Pr_p(l)}. \quad (20)$$

Так как функция $Pr(l)$ состоит из трех частей, то и область интегрирования разобьется на три непересекающиеся множества $Q = Q_1 \cup Q_2 \cup Q_3$, причем в Q_1 производительность изменя-

ется по формуле (17), в Q_2 — по формуле (18) и в Q_3 — по формуле (19), то интеграл (20) разобьется на три и получим расчетное время гидравлического разрушения угля в выработке

$$T_p = \iiint_{Q_1} \frac{dV}{Pr_p(l)} + \iiint_{Q_2} \frac{dV}{Pr_p(l)} + \iiint_{Q_3} \frac{dV}{Pr_p(l)}. \quad (21)$$

Если известно реальное время отработки заходки T_s , то можно определить коэффициент пропорциональности C из соотношения $C \cdot T_s = T_p$. Постоянная C определяет связь между расчетной производительностью и реальной производительностью в конкретных горно-геологических условиях.

В том случае, если заходка ограничена параллельными плоскостями, то можно выбрать такую систему координат, в которой отрабатываемая область Q ограничена координатными поверхностями и пределы интегрирования будут постоянными, что существенно облегчает интегрирование.

Значение интеграла можно определить численно, если известно распределение динамического давления в гидромониторной струе, параметры крепости угольного массива и размеры заходки. Для определения эмпирической постоянной C достаточно использовать лишь информацию, которая в рабочем порядке фиксируется в документации гидрошахты.

Так как величины, определяющие производительность, зависят от l , то на равных расстояниях от центра вращения ствола гидромонитора интенсивность разрушения постоянна, что позволяет моделировать процесс гидравлического разрушения как снятие сферической «стружки» с угольного массива при сканировании забоя гидромониторной струей. Толщина

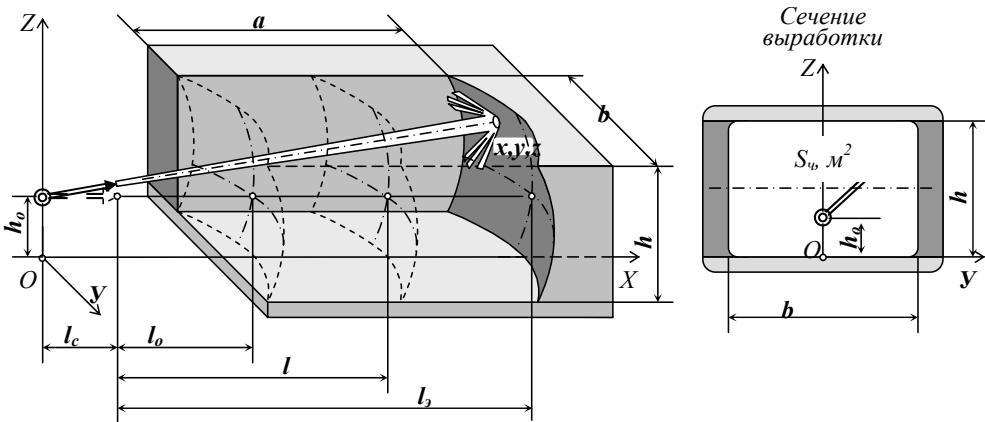


Рис. 5. Схема забоя с продольными границами в виде концентрических сферических поверхностей

стружки зависит от динамических характеристик струи, крепости угля и времени контакта, определяемого скоростью перемещения пятна струи по забою. Такой подход позволит существенно упростить вычисления и получить явное выражение расчетного времени в зависимости от параметров струи и угольного массива.

Если заходка представляет собой прямоугольный параллелепипед, то предполагая, что начальная и конечная границы в направлении прохождения выработки, представляют собой части сферических поверхностей σ_1 и σ_2 с радиусами $l_c + l_1$ и $l_c + l_2$ (l_1 и l_2 — расстояния от среза насадка до σ_1 и σ_2), соответственно, вырезанные из сферы прямоугольным параллелепипедом (рис. 5).

Если на расстоянии от среза насадка l в пределах эффективного участка струи элемент объема заходки представить как

$$dV = S(l)dl, \quad (22)$$

то при известной функции $S(l)$, описывающей изменение площади части сферической поверхности, вырезанной из сферы с радиусом $l_c + l$ прямоугольным параллелепипедом с сече-

нием заходки, тройной интеграл из (20) можно заменить одномерным

$$\iiint_Q \frac{dV}{\Pi p} = \int_{l_1}^{l_2} \frac{S(l)dl}{\Pi p(l)}. \quad (23)$$

В реальных условиях можно считать, что площадь поверхности забоя на расстояниях, при которых производится гидроотбойка (1,5 — 10 м), изменяется линейно:

$$S(l) = Al + B, \quad l \in [l_1, l_2]. \quad (24)$$

Тогда зная начальную ($S(l_1) = S_1$) и конечную площадь ($S(l_2) = S_2$) сферической поверхности можно вычислить постоянные A и B :

$$A = \frac{S_2 - S_1}{l_2 - l_1}, \quad B = \frac{(S_1 - S_2)l_1}{l_2 - l_1}. \quad (25)$$

В результате получим сумму трех одномерных интегралов, определяющих расчетное время, которые можно вычислить явно

$$T_p = \int_{l_1}^{l_2} \frac{S(l)dl}{\Pi p_{s1}(l)} + \int_{l_2}^{l_3} \frac{S(l)dl}{\Pi p_{s2}(l)} + \int_{l_3}^{l_2} \frac{S(l)dl}{\Pi p_{s3}(l)}. \quad (26)$$

Для конкретных условий, при известных характеристиках струи и угольного массива, можно определить константу C по методике, изложенной ранее, что позволит вычислить реальное время разрушения угля при прохождении заходки любой длины $l < l_0$.

Обработка результатов хронометражей, проведенных на шахте «Тырганская», подтверждают эффективность предложенной расчетной схемы.

Выводы

Предложена полуэмпирическая модель гидромониторной струи, которая позволяет рассчитывать всевозможные динамические параметры струи через входные данные и введенный автором «коэффициент осевого динамического давления». Определены «коэффициент компактности» и «коэффициент дальности» оценивающие качество струеформирующей части гидромониторов и его элементов: успокоителей и насадков.

Эффективная длина струи и радиус эффективного ядра могут быть использованы при моделировании процесса разрушения угольного массива и вычисления производительности гидромонитора с известными характеристиками.

Отличительной чертой предложенной полумпирической модели разрушения угольного массива является связь производительности гидравлического разрушения с динамическими параметрами эффективной части гидромониторной струи. Такой подход позволяет вычислять время подвигания забоя любой конфигурации, обеспечить формирование четко выраженной зависимости времени разрушения от параметров гидроструи и угольного массива. Такой подход открывает возможность решать самые разнообразные задачи, связанные с управлением процессом разрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. — М.: Госгортехиздат, 1960.
2. Вулис Л.А., Кашкарова В.П. Теория струй вязкой жидкости. — М.: Наука, 1965.
3. Бай Ши-и. Турбулентные струи. — М.: Мир, 1964.
4. Цялко Н.Ф., Чапка А.М. Гидроотбойка угля на подземных работах. — М.: Госгортехиздат, 1960. — 263 с.
5. Шавловский С.С. Основы динамики струй при разрушении горного массива. — М.: Наука, 1979.
6. Бартышев А.В. О критериях качества струи // Сб. научных трудов ВНИИгидроугля / Совершенствование технологии и оборудования при гидравлической добыче угля, — Новокузнецк, 1990. — С. 86—93.
7. Мерзляков В.Г., Бафталовский В.Е. Физико-технические основы гидроструйных технологий в горном производстве. — М.: ФГУП, 2004. — 645 с.
8. Кривченко А.А. Рекомендуемые методы проектирования и расчета гидроотбойки. — Донецк: Доклад на совещании работников проектных организаций угольной промышленности, 1964.
9. Методика расчета гидравлической выемки угля. — Новокузнецк: ВНИИгидроуголь, 1969.
10. Теодорович Б.А., Цялко Н.Ф., Гефт В.Б. Методы расчета производительности гидромонитора по базовой производительности гидровыемки. // Вопросы гидравлической добычи угля. Сб. 16. — Новокузнецк: ВНИИгидроуголь, 1969. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Бартышев Александр Васильевич — кандидат технических наук, доцент, e-mail: bartshev@mail.ru, Новокузнецкий филиал — институт Кемеровского государственного университета.