

О ВНЕЗАПНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО
УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

С. В. КУЗНЕЦОВ, Н. С. ХАПИЛОВА

(Донецк)

Начало теоретических исследований рассматриваемого явления положено в [1-3]. Ниже дано описание внезапного выдавливания разрабатываемого пласта, которое наряду с горными ударами и внезапными выбросами сравнительно часто встречается в угольных шахтах. Совместное решение ряда задач плоской теории упругости, пластичности и динамики твердого тела позволило выписать замкнутую систему соотношений, из которой определяются все основные параметры процесса внезапного выдавливания.

При определении давления пород на разрабатываемый пласт использована схема-тизация, предложенная в [4].

1. Пласт мощностью $2h$ залегает на глубине H от земной поверхности. В выработанном пространстве точку смыкания боковых пород примем за начало системы координат (фигура).

Напряженное состояние в горном массиве до проведения выработки определяется соотношениями $\sigma_x^0 = -\alpha\gamma(H-y)$, $\sigma_y^0 = -\gamma(H-y)$, $\tau_{xy}^0 = 0$, где γ — средний удельный вес пород, α — коэффициент бокового распора.

При наличии выработки напряжения в породе представим в виде

$$(1.1) \quad \sigma_x = \sigma_x^0 + X_x, \quad \sigma_y = \sigma_y^0 + Y_y, \quad \tau_{xy} = X_y$$

Так как дополнительные компоненты напряжения X_x , X_y , Y_y удовлетворяют однородной системе уравнений плоской теории упругости, то имеют место формулы [4].

$$(1.2) \quad \begin{aligned} X_x + iX_y &= \Phi(z) + \overline{\Phi(z)} - (z - \bar{z})\overline{\Phi'(z)} - \overline{\Omega(z)} \\ Y_y - iX_y &= \Phi(z) + \overline{\Phi(z)} + (z - \bar{z})\overline{\Phi'(z)} + \overline{\Omega(z)} \\ 2\mu(u + iv) &= \kappa\varphi(z) - z\overline{\varphi'(z)} - \overline{\psi(z)} \\ 2\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + i \frac{\partial v}{\partial x} \right) &= \kappa\Phi(z) - \overline{\Phi(z)} - (z - \bar{z})\overline{\Phi'(z)} - \overline{\Omega(z)} \\ \varphi'(z) &= \Phi(z), \quad \psi'(z) = \Psi(z), \quad \Omega(z) = z\Phi'(z) + \Psi(z) \\ \Phi(\infty) &= 0, \quad \Omega(\infty) = 0, \quad \lim_{y \rightarrow 0} y\Phi'(z) = 0. \end{aligned}$$

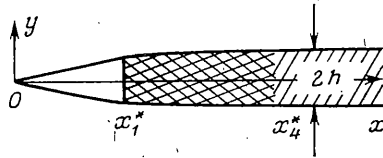
Для достаточно больших глубин разработки пласта при определении X_x , Y_y , X_y можно пренебречь влиянием земной поверхности. Тогда в силу симметрии достаточно рассмотреть задачу теории упругости для полуплоскости с соответствующими граничными условиями.

2. До начала развития процесса внезапного выдавливания пласта в выработанное пространство имеют место следующие граничные условия. В той области выработанного пласта, где боковые породы соединились между собой, вертикальные смещения можно положить равными нулю, т. е.

$$(2.1) \quad v(x) = 0 \quad (-\infty < x \leq 0)$$

В области зависания боковой породы кровли над выработанным пространством $\sigma_y(x)=0$ ($0 < x < x_1^*$), где x_1^* — положение забоя разрабатываемого пласта.

От забоя в глубь пласта до некоторого расстояния x_4^* распространяется область пластической деформации угля. В этой области давление пород на пласт будет определяться в соответствии с решением Прандтля для



пластической полуполосы, зажатой между жесткими плитами [5] $\sigma_y(x) = ax + b$ ($x_1^* < x < x_4^*$), где $a = k/h$, $b = k(\pi/2 - x_1^*/h)$, k — интенсивность касательных напряжений для угля.

За областью пластической деформации угля можно пренебречь деформацией пласта и, следовательно, сближением боковых пород. В результате для смещений будем иметь

$$(2.2) \quad v(x) = h \quad (x \geq x_4^*)$$

Кроме того, в силу симметрии на всей границе полуплоскости следует положить $X_y = 0$ ($-\infty < x < \infty$).

Ограниченное решение поставленной задачи, из которой определяется давление пород на разрабатываемый угольный пласт до момента внезапного выдавливания его в выработанное пространство, запишется в виде

$$(2.3) \quad \Omega^*(z) \equiv 0$$

$$\begin{aligned} \Phi^*(z) = & \frac{1}{2} \gamma H + \frac{a}{\pi} [z(z-x_4^*)]^{1/2} \operatorname{arctg} \left(\frac{x_4^* - x_1^*}{x_1^*} \right)^{1/2} + \\ & + \frac{az+b}{2\pi i} \ln \frac{x_4^*(z-x_1^*)}{x_1^*(2z-x_4^*) - zx_4^* + 2i[x_1^*(x_4^* - x_1^*)z(z-x_4^*)]^{1/2}} \end{aligned}$$

При этом из условия ограниченности решения в точках $z=0$ и $z=x_4^*$ получим

$$(2.4) \quad \begin{aligned} & \frac{\gamma H}{2} - \frac{b}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{x_4^* - x_1^*}{x_1^*} \right)^{1/2} - \\ & - \frac{a}{2\pi} \left\{ [x_1^*(x_4^* - x_1^*)]^{1/2} + x_4^* \operatorname{arctg} \left(\frac{x_4^* - x_1^*}{x_1^*} \right)^{1/2} \right\} = 0 \end{aligned}$$

Для смещений на границе согласно (1.2) имеем

$$(2.5) \quad v(x) = \frac{x+1}{2\mu} \int_0^{\infty} \operatorname{Im} \Phi(x) dx$$

После интегрирования (2.5) с учетом (2.3) и граничных условий (2.1), (2.2) получим

$$(2.6) \quad \frac{1-\nu^2}{E} \left\{ \frac{ax_4^{*2}}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{x_4^* - x_1^*}{x_1^*} \right)^{1/2} + [x_1^*(x_4^* - x_1^*)]^{1/2} [2b + 1/2 a(x_4^* + 2x_1^*)] \right\} = h$$

Здесь использована связь [4] $8\mu/(\kappa+1) = E/(1-\nu^2)$.

Из соотношений (2.4), (2.6) определяется положение забоя x_1^* и граница пластической зоны x_4^* .

3. Начало внезапного выдавливания разрабатываемого пласта связано со срывом сцепления его на контактных поверхностях с боковыми породами. Вслед за срывом сцепления по пласту распространяется волна разгрузки [6]. В течение нескольких миллисекунд она пробегает всю призабойную пластическую зону. При этом вблизи границы пластической зоны на некотором участке пласта (x_2^0, x_3^0) происходит разрушение угля. В результате граница пластической зоны занимает новое положение x_4^0 , перераспределяется давление пород на пласт и начинается процесс внезапного выдавливания угля за счет сближения боковых пород.

В процессе выдавливания нагрузка на нераздробленный призабойный участок пласта (x_1, x_2) со стороны боковых пород будет определяться несущей способностью угля в соответствии с интенсивностью касательных напряжений k и трением скольжения на контактных поверхностях, которое в результате срыва сцепления принимает значение $\tau_s < k$.

Учитывая, что призабойный участок пласта (x_1, x_2) испытывает сравнительно высокое давление со стороны раздробленной массы угля, нагрузку на него запишем в виде [7]

$$(3.1) \quad -\sigma_y = Ax + B \quad (x_1 < x < x_2), \quad A = \tau_s/h$$

$$B = k \left[\left(1 - \frac{\tau_s^2}{k^2} \right)^{1/2} + \frac{k}{\tau_s} \arcsin \frac{\tau_s}{k} \right] - \frac{\tau_s}{h} x_1$$

Обозначим через $s(t)$ смещение участка пласта (x_1, x_2) в сторону выработанного пространства под воздействием раздробленной массы угля. Тогда уравнение движения этого участка будет иметь вид

$$(3.2) \quad m \frac{d^2 s}{dt^2} = Ph - \tau_s l$$

где m — масса, $l = x_2 - x_1$, P — среднее по мощности пласта давление раздробленной массы угля. Можно считать, что это давление равномерно распределено по всему участку (x_2, x_3), т. е.

$$(3.3) \quad P = P(t) \quad (x_2 < x < x_3)$$

На участке пластической деформации угля (x_3, x_4) давление пород на пласт запишется в виде

$$(3.4) \quad -\sigma_y = A_1 x + B_1 \quad (x_3 < x < x_4), \quad A_1 = \frac{k}{h}, \quad B_1 = k \left(\frac{\pi}{2} + \frac{P}{k} - \frac{x_3}{h} \right)$$

На остальном участке пласта можно считать, что сближение боковых пород отсутствует и, следовательно, выполняется условие для смещений

$$(3.5) \quad v = h \quad (x \geq x_4)$$

В зоне смыкания боковых пород ($x < 0$) условие для смещения имеет вид

$$(3.6) \quad v = 0 \quad (x \leq 0)$$

Параметры x_1, x_2, x_3, x_4, P, s зависят от времени и подлежат определению из решения уравнения (3.2) с учетом условия $s=0$ при $t=0$ и решения смешанной задачи теории упругости для верхней полуплоскости при этом условии и условиях (3.1), (3.3)–(3.5) и $X_y=0$ при $y=0$ ($-\infty < x < \infty$).

Решение смешанной задачи, ограниченное в точках $z=0$ и $z=x_i$, запишется в виде $\Omega(z) \equiv 0$

$$(3.7) \quad \Phi(z) = \frac{\gamma H}{2} - \frac{A[z(z-x_4)]^{1/2}}{2\pi i} \ln \frac{2x_2-x_4+2[x_2(x_2-x_4)]^{1/2}}{2x_1-x_4+2[x_1(x_1-x_4)]^{1/2}} + \\ + \frac{Az+B}{2\pi i} \ln \frac{(x_1-z)\chi_2(z)}{(x_2-z)\chi_1(z)} + \frac{P}{2\pi i} \ln \frac{(x_2-z)\chi_3(z)}{(x_3-z)\chi_2(z)} + \\ + \frac{A_1[z(z-x_4)]^{1/2}}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{x_4-x_3}{x_3} \right)^{1/2} + \frac{A_1z+B_1}{2\pi i} \ln \frac{x_4(z-x_3)}{\chi_3(z)}$$

$$(3.8) \quad \int_0^{x_4} \frac{f(x)}{[x(x-x_4)]^{1/2}} dx = 0 \\ \chi_j(z) = x_j(2z-x_4) - zx_4 + 2i[x_j(x_1-x_j)z(z-x_4)]^{1/2} \quad (j=1, 2, 3) \\ f(x) = \gamma H, -(Ax+B), -P, -(A_1x+B_1) \text{ соответственно при} \\ 0 < x < x_1, x_1 < x < x_2, x_2 < x < x_3, x_3 < x < x_4$$

Условие ограниченности (3.8) после интегрирования приводится к виду

$$(3.9) \quad \gamma H\pi + A\{[x_2(x_4-x_2)]^{1/2} - [x_1(x_4-x_1)]^{1/2}\} - A_1[x_3(x_4-x_3)]^{1/2} + \\ + (Ax_4+2B) \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{x_4-x_2}{x_2} \right)^{1/2} - \operatorname{arctg} \left(\frac{x_4-x_1}{x_1} \right)^{1/2} \right] + \\ + 2P \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{x_4-x_3}{x_3} \right)^{1/2} - \operatorname{arctg} \left(\frac{x_4-x_2}{x_2} \right)^{1/2} \right] - \\ - (A_1x_4+2B_1) \operatorname{arctg} \left(\frac{x_4-x_3}{x_3} \right)^{1/2} = 0$$

Требую выполнение условий (3.5), (3.6), получим

$$(3.10) \quad h = \frac{1-\nu^2}{E} \left\{ -\frac{1}{2} Mx_4^2 - [x_2(x_4-x_2)]^{1/2} \left[\frac{1}{2} A(2x_2+x_4) + 2B - 2P \right] + \right. \\ \left. + [x_1(x_4-x_1)]^{1/2} \left[\frac{1}{2} A(2x_1+x_4) + 2B \right] + [x_3(x_4-x_3)]^{1/2} \left[\frac{1}{2} A_1(2x_3+x_4) + 2B_1 - 2P \right] \right\} \\ M = A \operatorname{arctg} \left(\frac{x_4-x_2}{x_2} \right)^{1/2} - A \operatorname{arctg} \left(\frac{x_4-x_1}{x_1} \right)^{1/2} - A_1 \operatorname{arctg} \left(\frac{x_4-x_3}{x_3} \right)^{1/2}$$

Для определения давления пород на пласт из (1.1), (1.2) имеем $\sigma_y(x) = -\gamma H + 2 \operatorname{Re} \Phi(x)$. До момента образования раздробленной зоны угля Φ равно Φ^* , а в момент образования ее, т. е. при $t=0$, Φ равно Φ° . При этом должно выполняться условие равенства интегральных нагрузок на пласт

$$(3.11) \quad \lim_{x \rightarrow \infty} \left\{ \int_{x_1^*}^x [-\gamma H + 2 \operatorname{Re} \Phi^*(x)] dx - \int_{x_1^\circ}^x [-\gamma H + 2 \operatorname{Re} \Phi^\circ(x)] dx \right\} = 0$$

Из (3.11) с учетом (2.3), (3.7), (2.4), (2.6), (3.9), (3.10) получим

$$(3.12) \quad -\frac{1}{8} Mx_4^2 + 2Aq(x_2, x_4) + 2(B-P)r(x_2, x_4) - \\ - 2Aq(x_1, x_4) - 2Br(x_1, x_4) - 2(B_1-P)r(x_3, x_4) - 2A_1q(x_3, x_4) -$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{8} \left\{ (ax_4^{*2} + 8ax_1^{*2} + 16bx_1^*) \operatorname{arctg} \left(\frac{x_4^* - x_1^*}{x_1^*} \right)^{1/2} + \right. \\
 & \left. + [x_1^* (x_4^* - x_1^*)]^{1/2} (ax_4^* - 2ax_1^* - 8b) \right\} + \frac{hE}{1-\nu^2} \ln \left(\frac{x_4}{x_4^*} \right)^{1/2} = 0 \\
 q(x_j, x_k) &= \frac{2x_j - x_k}{16} [x_j(x_k - x_j)]^{1/2} - \frac{x_j^2}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{x_k - x_j}{x_j} \right)^{1/2} \\
 r(x_j, x_k) &= \frac{[x_j(x_k - x_j)]^{1/2}}{2} - x_j \operatorname{arctg} \left(\frac{x_k - x_j}{x_j} \right)^{1/2} \quad (j=1, 2, 3)
 \end{aligned}$$

Заметим, что между x_1° , x_2° , x_3° существует связь

$$(3.13) \quad x_2^\circ - x_1^\circ = l_{12}^\circ, \quad x_3^\circ - x_1^\circ = l_{13}^\circ$$

где l_{12}° , l_{13}° — известные параметры.

Начальные условия внезапного выдавливания угольного пласта, т. е. $P=P^\circ$, $x_j=x_j^\circ$ ($j=1, 2, 3, 4$) при $t=0$, определяются из решения системы (3.9), (3.10), (3.12), (3.13).

В процессе выдавливания пласта ($t>0$) должно выполняться условие сохранения массы угля на всех участках, т. е.

$$\begin{aligned}
 (3.14) \quad \int_{x_1}^{x_2} v(x) dx &= \int_{x_1^\circ}^{x_2^\circ} v^\circ(x) dx, \quad \int_{x_2}^{x_3} v(x) dx = \int_{x_2^\circ}^{x_3^\circ} v^\circ(x) dx \\
 \int_{x_1}^{x_4} v(x) dx &= \int_{x_1^\circ}^{x_4^\circ} v^\circ(x) dx + \int_{x_4^\circ}^{x_4'} h dx
 \end{aligned}$$

Здесь v° определяется формулами (2.5), (3.7) при $P=P^\circ$, $x_j=x_j^\circ$ ($j=1, 2, 3, 4$). В уравнении (3.14) x_4' зависит от времени и связано со смещением призабойного участка пласта в сторону выработанного пространства s соотношением $s=(x_4-x_2)-(x_4'-x_2^\circ)$. Это соотношение и уравнения (3.9), (3.10), (3.14), (3.2) позволяют определять параметры $s(t)$, $P(t)$, $x_4'(t)$, $x_j(t)$ ($j=1, 2, 3, 4$), которые полностью описывают процесс внезапного выдавливания, продолжающийся до момента выполнения условия $ds/dt=0$.

Следует отметить, что наряду с внезапными выбросами описанный процесс отражает характерные черты проявления горных ударов в угольных пластах [8].

Поступила 18 VII 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Баренблатт Г. И., Христианович С. А. Об обрушении кровли при горных выработках. Изв. АН СССР. ОТН, 1955, № 11.
2. Христианович С. А. О волне дробления. Изв. АН СССР. ОТН, 1953, № 12.
3. Христианович С. А. О волне выброса. Изв. АН СССР. ОТН, 1953, № 12.
4. Мухелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М., Изд-во АН СССР, 1954.
5. Соколовский В. В. Теория пластичности. М., Изд-во АН СССР, 1946.
6. Кузнецов С. В. Распространение волны разгрузки в призабойной зоне угольного пласта и ее связь с выбросами угля и газа. Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 1970, № 4.
7. Кузнецов С. В. О взаимодействии горного давления и давления газа в угольном пласте. ПМТФ, 1961, № 4.
8. Петухов И. М., Литвин В. А., Кучерский Л. В. и др. Горные удары и борьба с ними на шахтах Кизеловского бассейна. Пермское кн. изд-во, 1969.