

ГИДРОМЕХАНИКА

А. А. НИКОЛЬСКИЙ

О ВОЛНАХ ВНЕЗАПНОГО ВЫБРОСА ГАЗИРОВАННЫХ ПОРОД

(Представлено академиком А. И. Некрасовым 26 XI 1952)

В практике добычи каменного угля приходится сталкиваться с явлением, которое получило название внезапного выброса. Это явление состоит в том, что при разработке угольных пластов, содержащих в естественном состоянии внутри себя частицы газа под высоким давлением, в некоторый момент времени большие толщи еще неразработанного угля, граничащие со свободной поверхностью, приходят в движение и выбрасываются со значительными скоростями внутрь уже выработанного пространства. Характерно для этого явления то, что основная масса угля выбрасывается в размельченном состоянии. Механизм этого явления до сих пор неясен. Его не удается понять с позиций классической теории фильтрации, так как для наблюдающихся разрушений и движений угля потребовались бы чрезмерно большие скорости фильтрации, наличие которых противоречит уравнениям фильтрации.

Явление внезапного выброса может быть объяснено образованием особой волны, которая распространяется по угляю от свободной поверхности и за которой уголь разрушен и размельчен и имеет скорость, направленную внутрь выработанного пространства. Во фронте этой волны, которую будем называть волной внезапного выброса, происходит резкое, почти скачкообразное изменение давления газа, содержащегося в угле, от его высокого естественного давления до давления, близкого к атмосферному. Под влиянием большого перепада давления газа слой угля, находящийся во фронте волны, отделяется (отламывается) от еще нетронутого массива угля и затем приобретает некоторую скорость, направленную внутрь выработанного пространства. Сам газ по мере прохождения через него фронта волны расширяется и производит работу, часть которой идет на разрушение угля, часть — на придание ему скорости.

Составим основные уравнения, определяющие движение одномерных стационарных волн внезапного выброса.

Введем обозначения: α — отношение объема, занимаемого газом, к общему объему в нетронутой породе (перед волной внезапного выброса); ρ_T — плотность твердого вещества, которую будем считать неизменяемой; e_1 — внутренняя энергия единицы объема газа до прохождения волны; e_2 — внутренняя энергия единицы объема газа после прохождения волны; e_v — энергия, потребная для разрушения (измельчения) единицы объема породы в волне внезапного выброса; e_T — энергия, которая переходит в виде тепла от газа к твердому веществу, отнесенная к единице объема нетронутой породы; ρ_1 — средняя плотность газа до прохождения волны (удельное отношение массы газа

к занимаемому им объему); p_2 , ρ_2 — соответственно, давление и плотность газа после прохождения волны; u — общая скорость газа и твердых частиц после прохождения волны; N — скорость распространения волны. Скорости u и N направлены в разные стороны.

Применим уравнения неразрывности, количества движения, энергии к объему породы, который подвергся очередному разрушению в единицу времени.

Уравнение неразрывности дает

$$\rho_2 = \frac{\alpha N}{u + \alpha N} \rho_1. \quad (1)$$

Из уравнения количества движения имеем

$$[(1 - \alpha) \rho_T + \alpha \rho_1] N u = n - p_2, \quad (2)$$

где n — сила реакции, действующая в направлении движения породы, отнесенная к единице площади. Эта сила реакции действует на плоскость, которая ограничивает рассматриваемый нами объем породы от остального объема породы.

Из уравнения энергии получим:

$$(u + \alpha N) e_2 - N \alpha e_1 + [(1 - \alpha) \rho_T + \alpha \rho_1] N \frac{u^2}{2} + e_v N + e_T N + p_2 u = 0. \quad (3)$$

Положим

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \left(\frac{e_1}{e_2} \right)^k. \quad (4)$$

Показатель k дает закон расширения при переходе от состояния перед волной к состоянию за волной. Чем больше k , тем меньше механическая работа, совершаемая частицами газа при его расширении, т. е. тем больше происходящие при этом необратимые потери механической энергии в системе газ + твердое вещество.

На основании равенств (1), (4) получим:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{u}{N} + 1 = \left(\frac{e_1}{e_2} \right)^k. \quad (5)$$

Отсюда для отношения N/u получим выражение:

$$\frac{N}{u} = \frac{1}{\alpha [(e_1/e_2)^k - 1]}. \quad (6)$$

Разрешая три уравнения (2), (3), (5) относительно величин n , N , u , будем иметь:

$$n = \frac{\alpha (e_1 - e_2) - e_v - e_T}{[(e_1/e_2)^k - 1] \alpha} - (2e_2 + p_2), \quad (7)$$

$$u = \sqrt{2 \frac{\alpha (e_1 - e_2) - e_v - e_T - (e_2 + p_2) [(e_1/e_2)^k - 1] \alpha}{(1 - \alpha) \rho_T + \alpha \rho_1}}, \quad (8)$$

$$N = \frac{1}{[(e_1/e_2)^k - 1] \alpha} \sqrt{\frac{\alpha (e_1 - e_2) - e_v - e_T - (e_2 + p_2) [(e_1/e_2)^k - 1] \alpha}{(1 - \alpha) \rho_T + \alpha \rho_1}}. \quad (9)$$

Для возможности существования волн внезапного выброса необходимо, чтобы скорость распространения возмущений в самой твердой породе была больше скорости волны внезапного выброса, получаемой из уравнений движения. Это необходимо для того, чтобы воз-

мушения, распространяющиеся по породе, могли подготовить необходимую силу реакции n . При наших допущениях эта реакция выражается равенством (7).

Рассматриваемая сила реакции является силой «отдачи», которая получается при «выстреливании» отлетающими от основного массива частицами породы и газа.

Формула (6) показывает, что при постоянном значении k отношение скорости N распространения волны к скорости u выброса уменьшается при возрастании отношения энергии e_1 к энергии e_2 .

В естественных условиях газ находится в породе под большим давлением в трех основных состояниях: в свободном, в адсорбированном, в виде твердого раствора.

Для оценки порядка величин рассмотрим выведенные нами соотношения для волн внезапного выброса при идеализированных условиях, когда газ находится в породе только в свободном состоянии, а его расширение в волне происходит адиабатически. В рассматриваемом идеализированном случае имеют место равенства:

$$e_1 = \frac{p_1}{\kappa - 1}, \quad e_2 = \frac{p_2}{\kappa - 1},$$

где κ — показатель адиабаты газа (отношение теплоемкости при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме), p_1 — давление в частицах газа до прохождения волны внезапного выброса. Вводя дополнительно обозначения: R — газовая постоянная; T_1 , $a_1 = \sqrt{\kappa RT_1}$ — соответственно, температура и скорость звука в газе до прохождения волны и полагая $\varepsilon = p_1/p_2$, получим:

$$n = p_2 + 2 \frac{\left[\frac{p_1}{\kappa - 1} + p_2 - \frac{\kappa}{\kappa - 1} p_2 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1/\kappa} \right] \alpha - e_v}{\left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1/\kappa} - 1 \right] \alpha}, \quad (10)$$

$$\frac{N}{a_1} = \frac{1}{(\varepsilon^{1/\kappa} - 1) \alpha} \sqrt{\frac{2 \left(\frac{1}{\kappa - 1} \varepsilon + 1 - \frac{\kappa}{\kappa - 1} \varepsilon^{1/\kappa} \right) \alpha - \frac{e_v}{p_2}}{(1 - \alpha) \frac{RT_1 \rho_T}{p_2} + \alpha \varepsilon}}, \quad (11)$$

$$\frac{u}{a_1} = \sqrt{\frac{2 \left(\frac{1}{\kappa - 1} \varepsilon + 1 - \frac{\kappa}{\kappa - 1} \varepsilon^{1/\kappa} \right) \alpha - \frac{e_v}{p_2}}{(1 - \alpha) \frac{RT_1 \rho_T}{p_2} + \alpha \varepsilon}}, \quad (12)$$

причем мы воспользовались здесь следующим, справедливым для адиабатических движений, равенством для показателя k , входящего в уравнение (4):

$$k = \frac{1}{\kappa}.$$

На рис. 1 изображена серия кривых, которая дает зависимость скорости выброса u от величин $\varepsilon = p_1/p_2$ и α при пренебрежении величиной e_v в формуле (12) и условиях $T_1 = 288^\circ$, $p_2 = 1$ кг/см², $\kappa = 1,3$ (газ метан), $a_1 = 445$ м/сек, $\rho_T = \frac{1500}{9,8}$ кг · сек/м⁴. Это дает максимум возможных скоростей u . В действительности они будут меньше, причем тем меньше, чем больше величина e_v и чем большее количество механической энергии газа необходимо переходит в тепловую при разрушении и придании скорости газом твердой породе.

На рис. 2 изображена аналогичная сетка кривых для скорости N распространения волны. Каждая газированная порода требует для возможности разрушения ее в волнах внезапного выброса некоторого минимального перепада давления, действующего на отрывающиеся слои. В связи с этим, при прочих равных условиях, волны внезапного выброса в менее прочных породах должны возникать при меньших перепадах между давлением газа в нетронутым пласте и давлением в выработанном пространстве, чем в более прочных породах.

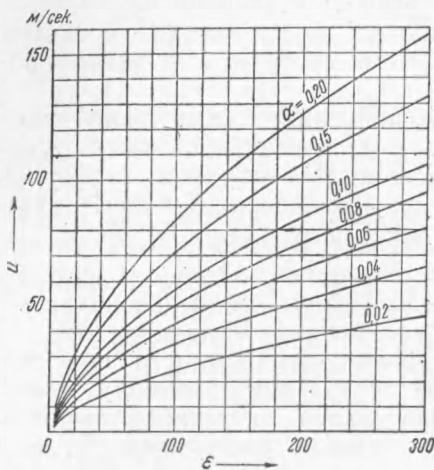


Рис. 1

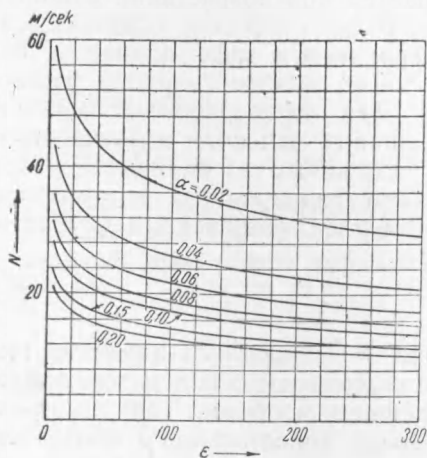


Рис. 2

В настоящей работе мы вывели уравнения стационарных волн внезапного выброса, которые должны выполняться при наличии таких волн. В эти уравнения входит ряд констант, которые подлежат экспериментальному определению. Экспериментальной константой, определяющей возможность существования волн внезапного выброса при данном давлении газа в пласте, является и константа, характеризующая прочность породы на разрушение при ее разламывании расширяющимся газом.

Условия возможности существования волн внезапного выброса, которые будут получаться в ходе исследований рассматриваемой проблемы, нужно будет понимать так, что если волна внезапного выброса каким-то путем возникла, то она при наличии этих условий будет продолжать существовать до тех пор, пока эти условия не изменятся.

Вопрос об условиях постепенного возникновения и нарастания интенсивности волн внезапного выброса требует специального рассмотрения. Специального рассмотрения и изучения требует также вопрос о процессах, происходящих внутри фронта стационарной и нестационарной волн внезапного выброса.

Поступило
20 X 1952