Доклады Академии Наук СССР
1954. Том XCVI, № 1

ГИДРОМЕХАНИКА

А. А. НИКОЛЬСКИЙ

ВОЛНЫ РАЗРУШЕНИЯ ГАЗИРОВАННЫХ УГЛЕЙ

(Представлено академиком А. И. Некрасовым 1 III 1954)

В работах [1, 2] разрушение и размельчение газированного угля, происходящее при внезапных выбросах угля и газа, было приписано распространению по нетронутому массиву угля особой волны — волны разрушения. Процессы, происходящие внутри фронта волны разрушения при внезапных выбросах угля и газа, можно представить себе протекающими следующим образом. На движущейся свободной границе нетронутого массива угля господствует некоторое давление, меньшее давления, имеющего место в порах и трещинах нетронутого массива. На каждую из частиц угля, граничащих в данный момент с движущейся свободной поверхностью массива, действуют две силы разного направления: равнодействующая сил давления газа со стороны свободной поверхности газа. прижимающая частицу к массиву, и равнодействующая сил давления газа на эту частицу со стороны трещин и пор, ее окружающих, направленная на отрыв частицы от массива. От массива отрываются такие частицы угля, для которых равнодействующая всех сил давления газа направлена на отрыв частицы и по величине более или равна силе прочности, связывающей эту частицу с массивом. Каждая оторвавшаяся частица попадает затем в области все меньших и меньших давлений газа и под влиянием перепада давления между давлением газа, заключенного в ее порах и трещинах, и окружающим пониженным давлением уже освободившегося из пор и трещин газа разрушается на все более мелкие частицы, причем в процессе такого разрушения частиц из пор и трещин освобождается все большее количество газа, который, расширяясь, при помощи сил давления и сил трения производит механическую работу, приводящую к быстрому ускорению твердых частиц.

В работе [1] были выведены основные уравнения, определяющие движение одномерной волны разрушения. Рассмотрим эти уравнения в несколько иных обозначениях. Введем обозначения: p_2, ρ_2, T_2 — соответственно, давление, плотность и температура газа за волной разрушения; u_2 — общая для угля и газа скорость за волной; N — скорость распространения волны; e_2, m_2 — энергия и масса газа, освобождающегося в волне при разрушении единицы объема нетронутого массива; $e_т$ — часть энергии e_2, идущая на разрушение твердых частиц и трение этих частиц друг о друга; e' — величина уменьшения тепловой энергии угля, содержащегося в единице объема нетронутого массива из-за теплопередачи от угля к газу; $\rho_т$ — плотность нетронутого массива; α — общий объем тех пор и трещин, содержащихся в единице объема нетронутого массива, которые в результате разрушения угля газом в волне стали заняты выделившимся газом; $\varkappa$ — показатель адиабаты газа (для метана $\varkappa \cong 1{,}3$).

Уравнения неразрывности, энергии, импульсов, примененные к массе нетронутого массива, которая подвергается разрушению в волне в единицу времени, запишутся, соответственно, в виде:

$$\rho_2 = \frac{m_2 N}{u_2 + \alpha N}, \tag{1}$$

$$\rho_т N \frac{u_2^2}{2} + \left(\frac{1}{\varkappa - 1} m_2 \frac{p_2}{\rho_2} + e_2 + e' - e_т\right) N = -p_2 u_2, \qquad (2)$$

$$n - p_2 = \rho_т u_2 N, \qquad (3)$$

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

Если непосредственно перед волной в нетронутом массиве рассмотреть некоторую единичную площадку, перпендикулярную направлению движения волны, то величина n будет являться равнодействующей сил давления газа в тех областях, где эта площадка пересекает включения газа (поры, трещины), направленных на отрыв слоя от массива, и сил напряжения твердой породы в тех областях, где эта площадка не пересекает газовых включений.

Величину n в первом приближении можно считать вполне определенной, заданной характеристикой газированного угля. Она зависит от структуры (формы пор и трещин) и прочности угля и от давления p_1 в его порах и трещинах. Величину n можно приближенно получить экспериментально. Рассмотрим некоторый элементарный цилиндр K, состоящий из рассматриваемой породы, при давлении p_1 газа в ней и заделаем его границы так, чтобы не было просачивания газа через его основания и боковую поверхность. Будем затем постепенно снижать давление p_1 на его основаниях до тех пор, пока под влиянием перепада давления не произойдет отламывание частиц угля от цилиндра K на его основаниях. Давление p_1 в этом случае будет приблизительно равно величине n. Разность $p_1 - n$ при этом, видимо, не будет зависеть от давления p_1, а будет зависеть только от прочности и структуры угля.

При заданных структуре, прочности и давлении в порах и трещинах породы перед волной величину n в уравнении (3) можно считать известной. Разрешая эти уравнения относительно величин u_2 и N, получим:

$$u_2 = \sqrt{2 \frac{\left(E_2 - \frac{\alpha}{\varkappa - 1} p_2\right)(n - p_2)}{\rho_т \left(n + \frac{\varkappa + 1}{\varkappa - 1} p_2\right)}}, \qquad (4)$$

$$N = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{(n - p_2)\left(n + \frac{\varkappa + 1}{\varkappa - 1} p_2\right)}{\rho_т \left(E_2 - \frac{\alpha}{\varkappa - 1} p_2\right)}}, \qquad (5)$$

где положено $E_2 = e_2 + e' - e_т$. Для фиксированного угля величина p_2 давления за волной в формулах (4), (5) может быть различной, энергия E_2 будет возрастать при уменьшении давления p_2, величину n в этих формулах следует при этом считать постоянной ($n = \text{const}$).

Соотношения (4), (5) показывают, что при прочих равных условиях при возрастании количества энергии, заключенного в единице объема угля, скорость u_2 возрастает, а скорось N распространения волны падает. Кроме того они показывают, что волна разрушения может образоваться только в случае, когда $p_2 < n$, т. е. когда давление p_2 за волной меньше того давления, при котором порода разрушается в статическом состоянии. Существенно отметить, что, как показывают те же формулы, даже при очень больших величинах энергии e_2 при достаточно малых значениях разности $n - p_2$ величина u_2 становится тоже малой. В этом случае почти вся энергия e_2 необратимо переходит в тепловую энергию.

Весьма важной для рассматриваемого нами процесса является величина скорости распространения малых возмущений (скорости звука) в смеси угля и газа непосредственно за волной. Эта величина определяется формулой $a = \sqrt{dp / d\rho}$, где p — давление, ρ — плотность смеси, а дифференцирование производится при давлении $p = p_2$ и условии адиабатического изменения состояния газа в смеси. Для плотности ρ смеси при таком условии будет иметь место выражение

$$\rho = \frac{\rho_{\text{т}} N}{(1-\alpha) N + (u_2 + \alpha N)(p_2 / p)^{1/\varkappa}}.$$

Дифференцируя это соотношение по p и полагая $p = p_2$, получим:

$$\left.\frac{d\rho}{dp}\right|_{p=p_2} = \frac{\rho_{\text{т}} N (\alpha N + u_2)}{p_2 (u_2 + N)^2}.$$

Отсюда можно найти величину $M = \frac{u_2 + N}{a} = (u_2 + N)\sqrt{d\rho / dp}$. Величина αN для практически интересных случаев мала по сравнению с величиной u_2, и поэтому с большой степенью точности можно положить

$$M = \sqrt{\frac{\rho_{\text{т}} N u_2}{p_2}} = \sqrt{\frac{n - p_2}{\varkappa p_2}}. \qquad (6)$$

$M = 1$ при давлении $p_2 = p_{2\,\text{кр}} = \frac{n}{\varkappa + 1}$. Условие $M < 1$ эквивалентно тому условию, то возмущения, идущие из области движения смеси и газа за волной, «догоняют» эту волну, т. е. закон распространения волны (величины p_2, u_2, N) зависит от процессов, происходящих в протяженной области движения смеси угля и газа за волной. Условие $M > 1$, наоборот, эквивалентно условию того, что закон распространения волны не зависит от процессов, происходящих позади волны.

Покажем, что для случая реального движения газа в волне, когда в волне газ имеет возможность перемещаться относительно частиц угля, всегда имеет место условие $M \leqslant 1$. Рассмотрим систему координат, связанную с волной, и введем обозначения: $u_{\text{т}}$, u — соответственно, скорости движения частиц угля и газа; p — давление газа; e — энергия, выделившаяся из угля при его разрушении на участке волны, предшествующем рассматриваемому сечению волны. Масса газа, участвующего в движении, весьма мала по сравнению с массой угля, а скорости движения газа и угля являются величинами одного порядка. Поэтому при составлении уравнений движения можно пренебречь величинами кинетической энергии и количества движения газа по сравнению с теми же величинами для частиц угля. Сделаем такое пренебрежение и примем условие стационарности движения в волне.

Уравнение количества движения дает:

$$n - p = \rho_{\text{т}} N (u_{\text{т}} - N). \qquad (7)$$

Уравнение энергии запишется в виде:

$$nN - pu\frac{u_{\text{т}} - N}{u_{\text{т}}} - pN + Ne = \rho_{\text{т}} N\left(\frac{u_{\text{т}}^2}{2} - \frac{N^2}{2}\right) + \frac{1}{\varkappa - 1} pu \frac{u_{\text{т}} - N}{u_{\text{т}}}. \qquad (8)$$

Пользуясь соотношением (7), а также равенством (5), где положим $e' = e_{\text{т}} = 0$, преобразуем последнее соотношение к виду:

$$\frac{2\varkappa}{\varkappa - 1} p \frac{u_{\text{т}} - N}{u_{\text{т}}} \frac{\rho_{\text{т}} N}{e}(u - u_{\text{т}}) = \frac{(n - p_2)\left(n + \frac{\varkappa + 1}{\varkappa - 1} p_2\right)}{e_2} - \frac{(n - p)\left(n + \frac{\varkappa + 1}{\varkappa - 1} p\right)}{e}. \qquad (9)$$

Функция $f(p) = (n - p)\left(n + \frac{\varkappa + 1}{\varkappa - 1} p\right)$ имеет максимум при $p_2 = p_{2\,\text{кр}} =$

$= n/(\varkappa + 1)$. Вместе с тем мы имеем неравенство $e < e_2$, соответствующее тому обстоятельству, что энергия в волне может только увеличиваться при движении вниз по потоку. Если бы за волной имело место неравенство $p_2 < p_{2\,\text{кр}}$, то внутри волны обязательно нашелся бы участок, вдоль которого давление падало бы и вместе с тем выполнялось бы неравенство $p' < p_{2\,\text{кр}}$. Но тогда на этом участке, как это следует из предыдущих рассуждений и равенства (9), должно было бы выполняться неравенство $u < u_{\text{т}}$, чего не может быть, ибо при отрицательных градиентах давления скорость газа всегда должна быть больше скорости твердых частиц, ибо плотность газа во много раз меньше плотности твердых частиц. Полученное противоречие доказывает, что всегда имеют место неравенства $M \leqslant 1$, $p_2 \geqslant p_{2\,\text{кр}}$.

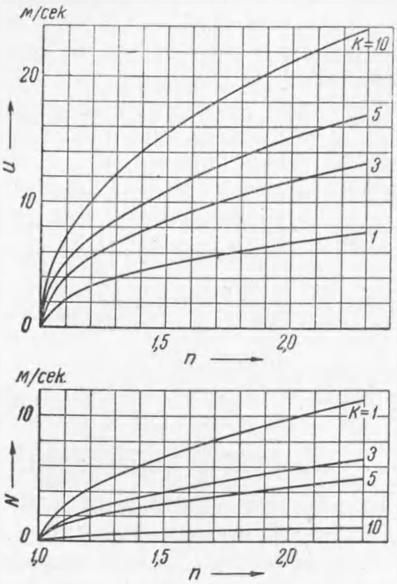

Рис. 1

Полученный вывод существенно дополняет формулы (4), (5).

Процессы, происходящие во фронте волны разрушения, имеют сходство с процессами, происходящими во фронте волны детонации ([3]).

В результате проведенных исследований мы можем сделать вывод о том, что каждому заданному массиву газированного угля соответствует многообразие волн, каждая из которых может при соответствующих условиях по этому массиву распространяться. Все эти возможные волны описываются формулами (4), (5) и неравенством $p_2 \geqslant p_{2\,\text{кр}}$. Каждому давлению p_2 соответствует определенная волна разрушения. В каждый данный момент движения волны из всех возможных волн реализуется та волна, которая согласуется с условиями движения позади волны.

При достаточно больших относительных разрежениях в области движущихся продуктов разрушения за волной устанавливается давление $p_2 = p_{2\,\text{кр}} = \dfrac{n}{\varkappa + 1}$, и волна однозначно определяется этим условием до тех пор, пока волны повышения давления, идущие из области движения продуктов разрушения, не увеличат давление за ней таким образом, что оно станет больше $p_{2\,\text{кр}}$. Волна вообще прекращается, когда станет невозможным наличие за ней давления, меньшего значения $p_2 = n$.

На рис. 1 приведены числовые расчеты для случая $p_1 = 20$ ата, $p_2 = 1$ ата, $e_{\text{т}} = e'_{\text{т}} = 0$, $\alpha = 0{,}05$, при условии $p_2 = p_{2\,\text{кр}} = n/(\varkappa + 1)$. Значение $k = 1$ соответствует случаю, когда газ в порах и трещинах находится только в свободном состоянии (через k обозначено отношение энергии, выделяющейся в волне, к энергии, которая выделяется при прочих равных условиях в том случае, когда газ находится в порах и трещинах только в свободном состоянии).

Поступило
7 I 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] А. А. Никольский, ДАН, 88, № 4 (1953). [2] А. А. Никольский, ДАН, 91, № 5 (1953). [3] Я. Б. Зельдович, Горение и детонация газов, Изд. АН СССР, 1943.