

могут перекрываться сдвигами пород по контакту между слоями. По нашим оценкам эффект перекрытия трещин в нижних

слоях за счет сдвигов верхних слоев является одной из основных особенностей отмечаемого постоянства или незначительно-

го роста высоты ЗВТ при многократных подработках толщи пород.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. С-Петербург, ВНИМИ, 1998, 290с.
2. Гусев В.Н. Научные основы прогнозирования развития техногенных водопроводящих трещин при выемке свит угольных пластов под водными объектами. Автореферат докторской диссертации, Санкт-Петербург, 2000, 35с.
3. Земисев В.Н. Расчеты деформаций горного массива – М., Недра, 1979 – 145с.
4. Гусев В.Н. Геомеханика техногенных водопроводящих трещин. Санкт-Петербургский горный инт СПб: СПГГИ, 1999, 157с.
5. Вылегжанин В.Н., Егоров П.В., Мурашев В.И. Структурные модели горного массива в механизме геомеханических процессов. Новосибирск, "Наука", Сибирское отделение, 1990, 295с.
6. Борисов А.А. Расчеты горного давления в лавах пологих пластов. – М., Недра, 1980 – 306с.
7. Калинин С.И., Лютенко А.Ф., Егоров П.В., Дьяконов С.Г. Управление горным давлением при разработке пологих пластов с труднообрушающей кровлей на шахтах Кузбасса. Кемеровское книжное издво, 1991, 248с.
8. Троцкий В.С., Земисев В.Н. К вопросу определения границы зоны сжатий в слоистом массиве с целью выбора оптимальных размеров целиков под водные объекты. – Л., ВНИМИ сб. Горное давление, сдвижение горных пород и методика маркшейдерских работ, LXXVIII, 1970, с 302-312.
9. Ягунов А.С. Особенности проявления и параметры деформационных процессов, формируемых в подрабатываемом горном массиве. Сб. Современные проблемы безопасной разработки угольных месторождений. Тр. Координационного совещания по безопасности. ВНИМИ, С-Петербург, 2006, с. 155-165.
10. Иофис М.А. Деформации земной поверхности при разработке свит крутых пластов. Сб. Маркшейдерское дело в социалистических странах. Том. 11, Л., ВНИМИ, 1998. с. 177-183.

Автор статьи

Ягунов

Анатолий Степанович

- канд.техн.наук, директор Сибирского филиала ОАО ВНИМИ, г. Прокопьевск

УДК 622.822.39

**В.Д. Богатырев, О. Ю. Жилкишиева**

## О ПАРАМЕТРАХ СТОЯЧЕЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ВЗРЫВАХ В ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Рассмотрим одну из стадий процесса развития взрыва метано-воздушной смеси в подготовительной выработке. Предполагается, что забой выработки явился местом инициации взрыва.

Знание об изменении таких параметров как давление и скорость при переходе через фронт ударной волны от области реакции к области, еще не возмущенной взрывом, позволяет прогнозировать возможность перехода взрыва метано-воздушной смеси в катастрофическую fazu – детонацию.

Из гидродинамической теории детонации известно, что во взрывчатой среде со сверхзвуковой скоростью распространяется детонационная волна, состоящая из ударной волны и следующей за ней зоны химической реакции. При сверхзвуковой скорости детонационной волны вещество перед ее

фронтом остается невозмущенным, в то время, когда на самом фронте она скачкообразно сжимается, сопровождаясь резким повышением давления, температуры и плотности среды.

При встрече ударной воздушной волны (далее УВВ), распространяющейся в канале с каким-либо препятствием, происходит скачкообразное повышение давления на ее фронте. Например, при сужении канала  $d = 200$  мм до  $d = 100$  мм, т. е. в 2 раза, вблизи места изменения сечения наблюдалось резкое увеличение давления. Это объясняется тем, что в месте сужения канала формируется отраженная ударная волна, которая распространяется навстречу падающей волне.

Подобные явления именуются как стоячая ударная волна.

При отражении ударной волны от взрывоза-

щитной перемычки или другого препятствия в выработках возникает стоячая ударная волна, то есть фронт, на котором параметры движения (скорость, плотность, давление, температура) изменяются скачком. Через этот фронт по-прежнему перетекает поток газа и перемещается поток энергии. Наша задача состоит в том, чтобы оценить изменения этих параметров и сделать вывод о возможности возникновения детонации после прохождения этой стоячей ударной волны.

Считаем, что при достаточно большом попечном размере выработки, мы можем рассматривать движение газа как одномерное, а область занятую ударной волной как очень тонкую неравновесную область.

Рассмотрим адиабатическое течение идеального газа через «неравновесную» область внутри канала постоянного сечения (рисунок.). Предположим, что профиль скоростей в канале является плоским. В неравновесной области течения скорость, температура и давление изменяются от их исходных значений  $V_1, T_1$  и  $p_1$  до установившихся конечных значений  $V_2, T_2$  и  $p_2$ . За пределами неравновесной области скорость, температура и давление остаются постоянными.

Очевидно, что решения уравнений сохранения в узкой области, которая представляет собой область резкого изменения скоростей, температур

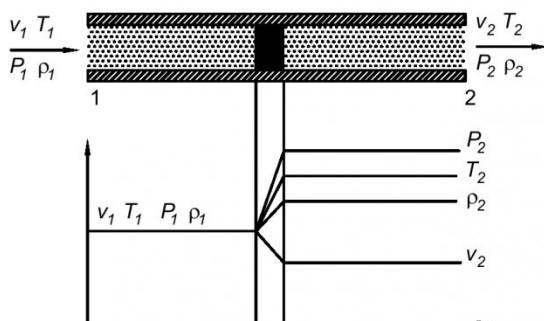


Рис.1 Схема скачка значений параметров при переходе фронта УВВ

и давлений, должны быть одномерными (если границы области, занимаемой ударной волной, перпендикулярны линиям тока).

Задача заключается в том, чтобы, исходя из общих уравнений сохранения, сформулировать условия, при которых возможно существование ударной волны, и найти распределения скоростей, температур и давлений внутри неё. Данную задачу требуется решить в рамках предположения о стационарном одномерном течении идеального газа. Изменения величин  $\mu, \lambda$  и  $C_p$  с изменением температуры и давления при этом можно не учитывать.

Уравнения сохранения для описываемой системы:

уравнение неразрывности

$$\frac{d}{dx}(\rho v_x) = 0, \quad (1)$$

уравнение движения

$$\rho v_x \frac{dv_x}{dx} = -\frac{dp}{dx} + \frac{4}{3} \frac{d}{dx} \left( \mu \frac{dv_x}{dx} \right), \quad (2)$$

уравнение сохранения энергии

$$\rho C_p v_x \frac{dT}{dx} = \frac{d}{dx} \left( \lambda \frac{dT}{dx} \right) + v_x \frac{dp}{dx} + \frac{4}{3} \mu \left( \frac{dv_x}{dx} \right)^2, \quad (3)$$

Последнее уравнение записано для случая стационарного режима с использованием условия  $(\partial \ln V / \partial \ln T)_p = 1$ , справедливое для идеального газа.

Уравнение неразрывности может быть легко проинтегрировано. Если обозначить через  $\rho_1$  и  $v_1$  значения плотности и скорости в области невозмущенного течения слева от ударной волны (рисунок), то из уравнения (1) следует

$$\rho v_x = \rho_1 v_1 \quad (4)$$

Исключим из уравнения сохранения энергии величины  $\rho v_x$  и  $dp/dx$ , воспользовавшись уравнением движения (2) и соотношением (4). В результате находим:

$$\begin{aligned} C_p \frac{dT}{dx} + v_x \frac{dv_x}{dx} &= \\ = \frac{4}{3} \frac{\mu}{\rho_1 v_1} \frac{d}{dx} \left( v_x \frac{dv_x}{dx} \right) + \frac{1}{\rho_1 v_1} \frac{d}{dx} \left( \lambda \frac{dT}{dx} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Это уравнение можно один раз проинтегрировать. После простых преобразований получается следующее выражение:

$$\begin{aligned} C_p T + \frac{1}{2} v_x^2 &= \\ = \frac{\lambda}{C_p \rho_1 v_1} \left[ \frac{4}{3} \frac{C_p \mu}{\lambda} \frac{d}{dx} \left( \frac{v_x^2}{2} \right) + C_p \frac{dT}{dx} \right] + C_I, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $C_I$  — постоянная интегрирования.

При одномерном течении идеального газа уравнение (6) является точным. Дальнейшее интегрирование его в общем случае возможно только с применением численных методов. Если принять  $Pr=C_p\mu/\lambda=3/4$ , уравнение сохранения энергии можно проинтегрировать до конца. Повторное интегрирование уравнения (6) при  $Pr=3/4$  приводит к формуле:

$$\frac{1}{2} v_x^2 + C_p T = C_I + C_{II} \exp \left( \frac{\rho_1 v_1 C_p x}{\lambda} \right). \quad (7)$$

Заметим, что значение  $Pr=3/4$  является точным для одноатомных газов и отличается от значений для многоатомных газов и их смесей в среднем на 10-12%.

Определим постоянные интегрирования. Поскольку сумма  $C_p T + (v_x^2/2)$  не может неограниченно возрастать с изменением расстояния  $x$ , постоянную  $C_{II}$  необходимо положить равной нулю. Постоянную  $C_I$  можно рассчитать, принимая, что

слева от ударной волны значения скорости и температуры равны соответственно  $v_1$  и  $T_1$ . В результате находим, что  $C_I = 1/2v_1^2 + C_p T_1$ , и окончательно решение уравнения примет вид

$$\frac{1}{2}v_x^2 + C_p T = \frac{1}{2}v_1^2 + C_p T_1. \quad (8)$$

Подставив (4) в уравнение (2) и проинтегрировав последнее один раз по  $x$ , получим:

$$\rho_1 v_1 v_x = -p + \frac{4}{3} \mu \frac{dv_x}{dx} + C_{III}. \quad (9)$$

Постоянную интегрирования  $C_{III}$  можно определить из условий в начальной невозмущенной области течения, где  $dv_x/dx=0$ . Положив в соотношении (9) величину  $v_x=v_1$ ,  $p=p_1$  и  $T=T_1$ , находим:  $C_{III}=p_1+\rho_1 v_1^2=\rho_1(v_1^2+RT_1/M)$ .

Используя уравнение состояния идеального газа и результат интегрирования уравнения сохранения энергии, можно исключить давление из формулы (9) и получить выражение, связывающее между собой только две переменные –  $v_x$  и  $x$ :

$$\frac{4}{3} \frac{\mu}{\rho_1 v_1} v_x \frac{dv_x}{dx} - \frac{\gamma+1}{2\gamma} v_x^2 + \frac{C_{III}}{\rho_1 v_1} v_x = \frac{\gamma-1}{\gamma} C_I \quad (10)$$

где через  $\gamma$  обозначено соотношение  $C_p/C_v$ .

Уравнение (10) можно представить также в безразмерной форме:

$$\varphi \frac{d\varphi}{d\xi} = \beta Ma_1(\varphi-1)(\varphi-\alpha). \quad (11)$$

Входящие сюда безразмерные переменные определяют так:

безразмерная скорость

$$\varphi = V_x / V_1, \quad (12)$$

безразмерное расстояние

$$\xi = x / \lambda, \quad (13)$$

число Маха в начальной части потока

$$Ma_1 = V_1 \sqrt{\frac{M}{\gamma RT_1}}, \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{\gamma-1}{\gamma+1} + \frac{2}{\gamma+1} \cdot \frac{1}{Ma_1}, \quad (15)$$

$$\beta = \frac{9}{8}(\gamma+1)\sqrt{\frac{\pi}{8\gamma}}. \quad (16)$$

Характеристическая длина  $\lambda$  есть средняя длина свободного пробега молекул газа. Для нее из кинетической теории газов имеем

Изменение скорости  $V_x$  в зависимости от  $V_1$

$V_1$	$V_x$	$V_x/V_1$
720.8329	1000	1.387284
790.3164	1100	1.391848
860	1200	1.395349
929.8387	1300	1.398092
999.8	1400	1.40028
1069.86	1500	1.402053
1140	1600	1.403509
1210.207	1700	1.404719
1280.469	1800	1.405735
1350.778	1900	1.406597
1421.126	2000	1.407334

$$\lambda = 3 \frac{\mu_1}{\rho_1} \sqrt{\frac{\pi M}{8RT_1}}. \quad (17)$$

Интегрирование уравнения (11) приводит к

$$\frac{1-\varphi}{(\varphi-\alpha)^\alpha} = \exp[\beta(1-\alpha)Ma_1(\xi-\xi_0)]. \quad (18)$$

Формула (18) определяет в неявном виде зависимость безразмерной скорости от безразмерной координаты. Эта формула включает одну произвольную постоянную  $\xi_0 = x_0/\lambda$ . Профили температур и давлений можно рассчитать, скомбинировав уравнение (18) с уравнениями (8) и (9).

Кроме того, уравнение (18) характеризует тенденцию таких волн к быстрому самовырождению.

Рассмотрим численные значения скоростей перед фронтом и за фронтом ударной волны, полученные на основании решения задачи.

Полученные результаты говорят о том, что за фронтом стоячей ударной волны наблюдается значительное снижение скорости потока, даже в тех случаях, когда перед фронтом уже достигнуты скорости детонации. Это происходит за счет диссипации больших объемов энергии при переходе фронта

Следовательно, можно сделать следующий практический вывод.

В подготовительной выработке, проводимой буро-взрывным способом, желательно искусственно препятствие, допустим, в виде небольшого состава груженых вагонеток на расстоянии 50-75 м. от фронта работ. Это способствует созданию стоячих ударных волн и предотвращению развития детонации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берд, Р. Явления переноса / Р. Берд (и др.). - М.: "Химия", 1974. – 688 с.
- Годунов, С.К. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов, А.Н. Крайко. – М.: Наука, 1976. – 400 с.
- Горбатов, В.А. Затухание ударных волн при их взаимодействии с системой "защитная завеса – перемычка". / В.А. Горбатов, И.М. Васенин, В.Г. Игишев, А.Ф. Син. // Горный информационно-аналитический бюллетень, 12.2004. – 2004. – С. 24 – 27.
- Гришин, А.М. Итерационно – интерполяционный метод и его приложения / А.М. Гришин, В.Н. Берцун, В.И. Зинченко. – Томск: Издательство томского университета, 1981. – 161 с.

5. Гурин, А.А. Ударные воздушные волны в горных выработках / А.А. Гурин (и др.). - М.: Недра, 1983. - 224 с.
6. Зельдович, Я.Б. Теория ударных волн и введение в газодинамику / Я.Б. Зельдович. - М.: Наука, 1946. - 289.
7. Зельдович, Я.Б. Физика ударных волн. / Я.Б. Зельдович. - М.: Недра, 1966. - 340 с.
8. Льюис, Б., Эльбе, Г. Горение пламя и взрывы / Б. Льюис, Г. Эльбе. - М.: Наука, 1948. - 534 с.

□ Авторы статьи:

Богатырев Виктор Дмитриевич - канд.техн.наук, доц. каф. теоретической и геотехнической механики	Жилкишиева Оксана Юрьевна - ассистент каф. теоретической и геотехнической механики
---	--

**УДК. 622.272.6**

**А.В.Степанов, Ю.А. Степанов**

## **ВЛИЯНИЕ СЕКЦИИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ КРЕПИ НА ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОКРЕСТНОСТИ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ**

Почти все шахты России ведут отработку угольных пластов с помощью механизированных комплексов. Вложение денег в механизацию выемки угля приводит к повышению себестоимости тонны угля. Для сохранения относительной стабильности цен необходимо использовать высокointенсивные технологии выемки угля, позволяющие добывать до 5 тыс. тонн угля в сутки и более [1]. Одной из причин неудовлетворительной работы очистных забоев является низкая адаптивность механизированных крепей к изменяющимся горно-геологическим условиям.

Можно привести достаточно много примеров низкой эффективности работы комплексно-механизированных забоев в зонах геологических нарушений, при выемке пластов с трудноуправляемыми кровлями и т.д. Стабильность и безопасность высокопроизводительной работы очистных забоев угольных шахт могут быть достигнуты за счет повышения уровня адаптивности механизированных крепей к изменяющимся по длине выемочного столба горно-геологическим условиям.

Эффективность применения механизированных крепей в очистных забоях зависит от того, насколько данная схема крепи и ее силовые параметры соответствуют характеру проявлений горного давления. Механизм взаимодействия крепи с боковыми породами, определяющий работу крепи по поддержанию кровли, является весьма сложным и зависит от сочетания множества горно-геологических и горнотехнических факторов.

Между тем силовой и энергетический потенциал механизированных крепей последнего поколения достаточно высок и им необходимо управлять [2]. Это позволит оптимизировать энергетические затраты, продлить срок службы крепей и обеспечить безопасные условия ведения очистных работ за счет предупреждения неуправляемого отжима угля с поверхности забоя и вывалов пород кровли.

Увеличение несущей способности крепи существенно влияет на характер напряженно-деформированного состояния (НДС) углепородного массива. В частности, это ведет к уменьшению области разрушенных пород, как над верхним перекрытием крепи, так и впереди забоя. Однако из-за неустойчивых слоев кровли в 70% комплексно-механизированных забоях для предотвращения обрушения пород за угольным комбайном необходимо приближать равнодействующую распора крепи к передним стойкам [3].

В связи с этим были проведены исследования и установлен характер взаимодействия секции механизированной крепи с непосредственной кровлей при неодинаковых усилиях передней и задней стоек, при этом усилие в другой стойке оставалось постоянным. На рисунке показаны изолинии отношения остаточной прочности к исходной при различных усилиях передней стойки, которое менялось от 2 тыс. до 10 тыс. Кн, и фиксированном усилии во втором ряду стоек.

Проведенные вычислительные эксперименты показали, что наибольшее влияние на устойчивость пород кровли оказывает усилие передней стойки, прилагаемое к непосредственной кровле. При увеличении усилия передней гидростойки в 5 раз при постоянном распоре задней стойки высота зоны обрушения пород над козырьком крепи уменьшается в 2,5 раза, а при увеличении начального распора задней при постоянном распоре передней также в 5 раз высота зоны разрушения пород изменяется в 1,5 раза.

Следовательно, при повышенном распоре передних стоек область разрушенных пород над секцией крепи и впереди забоя уменьшается на 40%, что позволяет избежать вероятности обрушения поверхности забоя и кровли за очистным комбайном. Это означает, что в очистном забое зачастую целесообразно использовать двухстоечные механизированные крепи.