Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им.Г.В.Плеханова,
т. XXXII, 1980 г.

УДК 622.27

# РАСЧЕТ ОПОРНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПОДХОДЕ ЛАВЫ К ПАНЕЛЬНОМУ ШТРЕКУ

А.А.БОРИСОВ, Н.Н.КАЙДАЛОВ, В.Г.ЛАБАЗИН

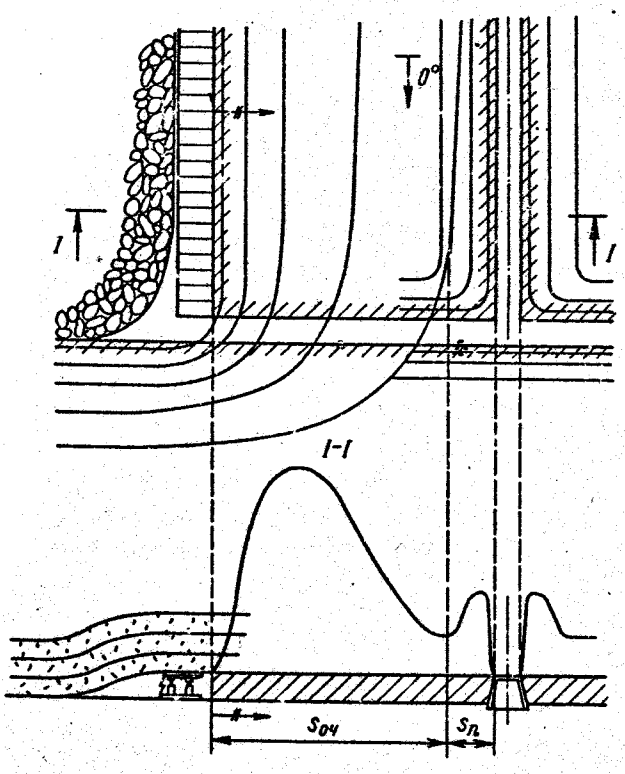



Рис.1. Характер зон влияния лавы и панельного штрека в момент начала их взаимодействия
$S_{оч}$ и $S_п$ – ширина зоны влияния соответственно лавы и панельного штрека

В практике выемки пологих угольных пластов системами разработки длинными столбами принимается обычно панельная подготовка. При этом лава движется в направлении, перпендикулярном штреку. Приближение лавы к панельному штреку или наклонной выработке (бремсберг, уклон) нередко приводит к взаимодействию этих выработок в результате наложения зон их влияния друг на друга. Поскольку зона влияния штрека имеет относительно малый радиус и небольшую интенсивность, влияние панельного штрека на напряженно-деформированное состояние горных пород и устойчивость призабойного пространства лавы весьма мало, тогда как влияние опорного давления лавы на панельный штрек мо-

жет приводить не только к его большим деформациям, но и к разрушениям крепи и целика между ними, а следовательно, к нарушению нормального функционирования штрека и травматизму. Во избежание этого ширина целиков принимается с многократным запасом прочности, что влечет избыточные потери угля.

Для обоснованного решения задачи необходимо иметь надежный метод расчета опорного давления и напряженно-деформированного состояния целика. Предлагавшиеся методы решения этой задачи основаны на допущении о том, что покрывающая толща представляет собой сплошную, однородную, изотропную, упругую среду. Большой интерес представляет решение задачи для слоистой покрывающей толщи.

Схема взаимодействия лавы и панельного штрека в нижней половине лавы при работе с полным обрушением кровли представлена на рис.I.

Задача о расчете давлений на целик является объемной, ее решение пока не найдено. Однако и решение плоской задачи безусловно представляет интерес, как достаточное для практических целей приближение.

Рассмотрим слоистую покрывающую толщу при управлении кровлей способом плавного опускания (рис.2). Задача может быть решена при допущении отсутствия трения и сцепления между слоями. Деформации сжатия пласта $\Delta h_0$ под действием литостатического давления не учитываются.

Вполне понятно, что на участке $l_4$ жесткость основания равна нулю. Кроме того, $K_2 < K_1$ (где $K_2$ - жесткость участка; $K_1$ - жесткость краевой части массива). Жесткость почвы пласта обозначим $K_3$.

Вертикальные и горизонтальные сдвижения кровли и напряженное состояние пласта, представляющего упругое основание, рассчитывались на основе вариационного метода Лагранжа [2-5].

Обозначим геометрические размеры и выберем системы отсчета согласно рис.2. Вертикальное оседание $v$ кровли и среднее угловое перемещение слоев $u$ удовлетворяют, как показано в [I], системе дифференциальных уравнений

$$\left.\begin{aligned} Du'' - Gh(u+v') = 0\ ; \\ Gh(u+v'') - Kv + \gamma h = 0. \end{aligned}\right\} \qquad (I)$$

Величины $D$ и $Gh$ определяются упругими постоянными слоев кровли по формулам, указанным в работах [2,4]. Примем коэффициент упругого основания целика $K_2 = const$, левой бесконечной части кровли $K_1 = const$ и правой опустившейся части кровли $K_3 = const$.

Для каждого участка кровли выпишем общее решение истемы (I).

На первом участке система отсчета $O_1x$ ; $-\infty < x_1 \leq 0$. Решение системы (I) представим в виде

$$v_1 = \frac{\gamma h}{K_1} + e^{\tau_1 x}\left[\left(v_{20} - \frac{\gamma h}{K_1}\right)\cos\omega_1 x + \right.$$

$$\left. + \frac{\left(v_{20} - \frac{\gamma h}{K_1}\right)\tau_1(\tau_1^2 - 3\omega_1^2) - u_{20}(\tau_1^2 + \omega_1^2)}{\omega_1(3\tau_1^2 - \omega_1^2)}\sin\omega_1 x\right]; \qquad (2)$$

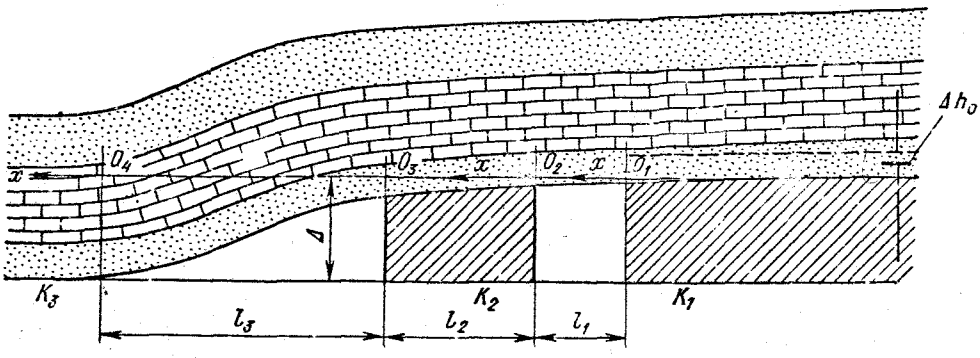



Рис.2. Расчетная схема к определению опорного давления при подходе лавы к панельному штреку при управлении кровлей способом плавного опускания
$l_1$ – пролет панельного штрека; $l_2$ – ширина целика между лавой и панельным штреком; $l_3$ – пролет от очистного забоя до места смыкания кровли и почвы

$$u_1 = e^{\tau_1 x}\left[u_{20}\cos\omega_1 x + \right.$$

$$\left. + \frac{\left(v_{20} - \frac{\gamma h}{K_1}\right)\left(\tau_1^2+\omega_1^2\right)^2 - u_{20}\,\tau_1\left(\tau_1^2-3\omega_1^2\right)}{\omega_1\left(3\tau_1^2-\omega_1^2\right)}\sin\omega_1 x\right], \qquad (3)$$

где

$$\tau_1 = \sqrt{\frac{n_1+m_1}{2}}\;; \qquad \omega_1 = \sqrt{\frac{m_1-n_1}{2}}\;;$$

$$n_1 = \frac{K_1}{2Gh}\;; \qquad m_1^2 = \frac{K_1}{D}\;; \qquad (4)$$

величины $v_{20}$, $u_{20}$ – значения $v_1$ и $u_1$ при $x = 0$, т.е. в точке $0_1$.

Решение (2)-(3) ограничено при $x \to -\infty$.

На втором участке система отсчета $0_1x$; $0 \leqslant x \leqslant l_1$. Здесь упругое основание отсутствует. Решение системы (I) при $K = 0$ найдем в следующем виде:

$$v_2 = v_{20} - x\,u_{20} - \frac{x^2}{2}\,u'_{20} + \left(\frac{D}{Gh}\,x - \frac{x^3}{6}\right)u''_{20} + \frac{\gamma h}{24D}\,x^4 - \frac{\gamma h}{Gh}\,\frac{x^2}{2}\;; \qquad (5)$$

$$u_2 = u_{20} + x\,u'_{20} + \frac{x^2}{2}\,u''_{20} - \frac{\gamma h}{6D}\,x^3\,, \qquad (6)$$

где $v_{20}$, $u_{20}$, $u'_{20}$, $u''_{20}$ – значения $v_2$, $u_2$, $u'_2$, $u''_2$ при $x = 0$, в соответствии с условиями сопряжения в точке $0_1$ эти величины одинаковы для решений $v_1$, $u_1$ и $v_2$, $u_2$.

На третьем участке система отсчета $0_2x$; $0 \leqslant x \leqslant l_2$. Решение системы (1) оказывается удобным взять в следующей форме:

$$v_3 = \varphi_0(x)v_{30} + \varphi_1(x)u_{30} + \varphi_2(x)u'_{30} + \varphi_3(x)u''_{30} + \varphi(x)\;; \qquad (7)$$

$$u_3 = \psi_0(x)\, v_{30} + \psi_1(x) u_{30} + \psi_2(x)\, u'_{30} + \psi_3(x)\, u''_{30} + \psi(x), \qquad (8)$$

где $v_{30}$, $u_{30}$, $u'_{30}$, $u''_{30}$ - значения $v_3$, $u_3$, $u'_3$, $u''_3$ при $x = 0$, т.е. в точке $O_2$.

Функции $\varphi_0(x),\ldots,\varphi_3(x), \psi_0(x),\ldots,\psi_3(x), \varphi(x), \psi(x)$ имеют вид

$$\varphi_0(x) = ch\tau_3 x \cos\omega_3 x + \frac{\tau_3^2 - \omega_3^2}{2\tau_3\omega_3} sh\tau_3 x \sin\omega_3 x; \qquad (9)$$

$$\varphi_1(x) = -\frac{sh\tau_3 x \cos\omega_3 x}{2\tau_3} - \frac{ch\tau_3 x \sin\omega_3 x}{2\omega_3}; \qquad (10)$$

$$\varphi_2(x) = -\frac{1}{2\omega_3\tau_3} sh\tau_3 x \sin\omega_3 x; \qquad (11)$$

$$\varphi_3(x) = \frac{1}{2(\tau_3^2+\omega_3^2)^2}\left[\frac{\tau_3^2 - 3\omega_3^2}{\omega_3} ch\tau_3 x \sin\omega_3 x + \frac{3\tau_3^2 - \omega_3^2}{\tau_3} sh\tau_3 x \cos\omega_3 x\right]; \qquad (12)$$

$$\varphi_4(x) = \frac{\gamma h}{K_3}\left[1 - \varphi_0(x)\right]; \qquad (13)$$

$$\psi_0(x) = \frac{\tau_3^2+\omega_3^2}{2}\left(\frac{ch\tau_3 x \sin\omega_3 x}{\omega_3} - \frac{sh\tau_3 x \cos\omega_3 x}{\tau_3}\right); \qquad (14)$$

$$\psi_1(x) = ch\tau_3 x \cos\omega_3 x - \frac{\tau_3^2 - \omega_3^2}{2\tau_3\omega_3} sh\tau_3 x \sin\omega_3 x; \qquad (15)$$

$$\psi_2(x) = \frac{1}{2(\tau_3^2+\omega_3^2)}\left[-\frac{\tau_3^2 - 3\omega_3^2}{\omega_3} ch\tau_3 x \sin\omega_3 x + \frac{3\tau_3^2 - \omega_3^2}{\tau_3} sh\tau_3 x \cos\omega_3 x\right]; \qquad (16)$$

$$\psi_3(x) = \frac{sh\tau_3 x \sin\omega_3 x}{2\tau_3\omega_3}; \qquad (17)$$

$$\psi(x) = -\frac{\gamma h}{K_3}\varphi(x), \qquad (18)$$

где величины $\tau_3$, $\omega_3$ находят по формулам (4), где надо $K_1$ заменить на $K_2$.

На четвертом участке система отсчета $O_3 x$; $0 \le x \le l_3$. Для этого участка решение $v_4$, $u_4$ системы (I) найдем по формулам (5) и (6), где вместо $u_{20}$, $v_{20}$, $u'_{20}$, $u''_{20}$ нужно положить $u_{40}$, $v_{40}$, $u'_{40}$, $u''_{40}$. В точке $O_4$ соприкосновения кровли с почвой должно быть выполнено условие

$$v_4\Big|_{x=l_3} = \Delta. \qquad (19)$$

На пятом участке система отсчета $O_4 x$; $0 \le x < +\infty$. Решение системы (I), ограниченное при $x \to +\infty$, удобно взять в виде

$$v_5 = \frac{\gamma h}{K_3} + e^{-\tau_3 x}\left[\left(\Delta - \frac{\gamma h}{K_3}\right)\cos\omega_3 x - \right.$$

$$\left. - \frac{\left(\Delta - \frac{\gamma h}{K_3}\right)\tau_3(\tau_3^2 - 3\omega_3^2) + u_{50}(\tau_3^2 + \omega_3^2)}{\omega_3(3\tau_3^2 - \omega_3^2)} \sin\omega_3 x \right]; \qquad (20)$$

$$u_5 = e^{-\tau_3 x}\left[u_{50}\cos\omega_3 x + \right.$$

$$\left. + \frac{\left(\Delta - \frac{\gamma h}{K_3}\right)(\tau_3^2 + \omega_3^2)^2 + u_{50}\tau_3(\tau_3^2 - 3\omega_3^2)}{\omega_3(3\tau_3^2 - \omega_3^2)} \sin\omega_3 x\right], \qquad (21)$$

где величины $\tau_3$, $\omega_3$ вычисляют по формулам (4), в которых $K_1$ заменяется на $K_3$; величина $u_{50}$ - значение $u_5$ при $x = 0$, т.е. в точке смыкания кровли с почвой.

Формулы (2), (3), (9)-(18), (20), (21) предполагают, что в формулах (4) $m > n$, в противном случае указанные соотношения необходимо преобразовать в вещественную форму.

Как указано в работах [2,4], в точках $O_1 - O_4$ должны быть выполнены условия сопряжения решений $(v_1 u_1), \ldots, (v_5 u_5)$. Для слоисто-однородной кровли эти условия заключаются в непрерывности $v$, $u$, $v'$, $u''$ в указанных точках.

Как показано в работе [2], для левой и правой бесконечных частей кровли должны быть выполнены следующие условия:

$$-\frac{1}{m_1}u'_{20} + \frac{\sqrt{2(n_1+m_1)}}{m_1^2}u''_{20} + \frac{\gamma h}{K_1} = v_{20}; \qquad (22)$$

$$-\frac{1}{m_1}u''_{20} + \frac{\sqrt{2(n_1+m_1)}}{m_1}u'_{20} = u_{20}; \qquad (23)$$

$$-\frac{1}{m_3}u'_{50} + \frac{\sqrt{2(n_3+m_3)}}{m_3^2}(-u''_{50}) + \frac{\gamma h}{K_3} = 0; \qquad (24)$$

$$\frac{1}{m_3}u''_{50} + \frac{\sqrt{2(n_3+m_3)}}{m_3}u'_{50} = -u_{50}. \qquad (25)$$

Таким образом, для определения постоянных интегрирования и одновременно начальных значений $u$, $v$ на каждом участке ($v_{20}$, $u_{20}$, $u'_{20}$, $u''_{20}$; $v_{30}$, $u_{30}$, $u'_{30}$, $u''_{30}$; $v_{40}$, $u_{40}$, $u'_{40}$, $u''_{40}$; $v_{50}$, $u_{50}$, $u_{50}$, $u''_{50}$) имеем 12 условий сопряжения в точках $O_2$, $O_3$, $O_4$ и четыре условия на бесконечности (22)-(25). Условия сопряжения в точке $O_1$ определяются выбором решений $v_1$, $u_1$, $v_2$, $u_2$.

По формуле (19) найдем высоту уступа $\Delta$, отвечающую длине зависающей части кровли $l_3$. Обычно $\Delta$ известно, поэтому $l_3$ можно подобрать последовательными расчетами или приближенным решением уравнения (19) относительно $l_3$.

Определение величины (25) удобно сделать по следующей схеме. В качестве основных неизвестных выберем $v_{20}$, $u_{20}$, $u'_{20}$, $u''_{20}$. Остальные неиз-

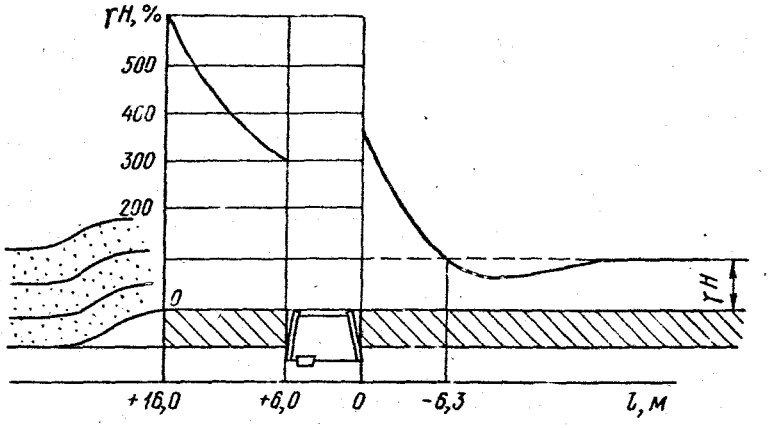



Рис.3. Примеры эпюр давлений на целик между лавой и панельным штреком и на краевую зону массива за штреком

вестные определим через основные как некоторые линейные формы последних. Эти линейные формы можно найти, рассматривая переход от $(v_{20}, \ldots, u''_{20}$ к $(v_{50}, \ldots, u''_{50})$ как произведение соответствующих линейных преобразований. Матрицы преобразований можно найти, используя решения (5), (6) и (9)-(18). Выразив $v_{50}, \ldots, u''_{50}$ через $v_{20}, \ldots, u''_{20}$ и подставив их в формулу (25), по формулам (22) и (25) получим четыре уравнения для нахождения $v_{20}$, $u_{20}$, $u'_{20}$, $u''_{20}$. Далее последовательно найдем $v_{30}$, ..., $u''_{30}, v_{40}, \ldots, u''_{40}$, $v_{50}, \ldots, u''_{50}$.

Давление кровли на основание вычислим по формуле

$$P = Kv, \qquad (26)$$

где $K$ и $v$ отвечают нужному участку.

Отметим, что если целик $O_2O_3$ имеет достаточно большую ширину $l_2$ и нужно учесть эффект опорного давления на правом его крае, то в расчетную схему вводится участок целика с переменным коэффициентом жесткости $K(x)$, как это сделано в работе [3]. Ослабление кровли в связи с вертикальными трещинами можно учесть, изменив условия сопряжения [4].

Распределение давлений представлено на рис.3. Анализ показывает весьма большую роль в определении интенсивности опорного давления на цел.. и массив жесткости разрабатываемого пласта - коэффициента упругого основания $K$.

В натурных условиях соотношение $\gamma H/K$ может существенно колебаться вследствие изменения упругих характеристик и мощности пласта, ширины целика и пролета выработки.

Полученное решение не охватывает всех факторов и всего разнообразия геологических условий, нарушенности, дефектов, строения пород, однако в ряде случаев оно позволяет получить исходные данные для проектирования, в частности, определять нагрузки на целики при подходе лав к панельным штрекам, бремсбергам и уклонам, а также при переходах комплексами панельных штреков и наклонных выработок, пройденных по пласту.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов А.А. Взаимодействие горных выработок. Л., изд. ЛГИ, 1979.

2. Борисов А.А., Кайдалов Н.Н., Лабазин В.Г. Расчет опорного давления вариационным методом. В кн.: Физические процессы горного производства. Л., изд. ЛГИ, 1976 (межвуз. сб., вып. 3).

3. Борисов А.А., Кайдалов Н.Н., Лабазин В.Г. Расчет опорного давления при плавном опускании кровли. – Изв. вузов. Горный журнал, 1977, № 10.

4. Кайдалов Н.Н., Лабазин В.Г., Петухов И.А., Фисенко Г.Л. Сдвижение горных пород как изгиб слоев с поперечным сдвигом. Тр. ВНИМИ, 1975, вып. 3.

5. Кайдалов Н.Н., Лабазин В.Г., Федорова Г.М. Определение деформационных характеристик массива горных пород обратным методом. В кн.: Устойчивость и крепление горных выработок. Л., изд. ЛГИ, 1977 (межвуз. сб., вып. 4).