

УДК 622.33

**ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД КРОВЛИ  
УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПРИ РАЗВИТИИ ОЧИСТНЫХ РАБОТ  
НА ГАЗОВЫЙ РЕЖИМ ЗАЛЕЖИ**

**В. А. Трофимов, Ю. А. Филиппов**

*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН,  
E-mail: asas\_2001@mail.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Рассматривается отработка горизонтального изолированного пласта, расположенного в однородной среде, в условиях плоской деформации. Получено распределение напряжений в кровле угольного пласта на разных стадиях развития выработанного пространства. Напряжения в массиве определяются функцией комплексного переменного, что позволяет установить местоположение и конфигурацию зон разгрузки и пригрузки в массиве. Такая информация необходима для оценки техногенной нарушенности в породах междупластья и формирования в них коллекторов газа. Использование аналитического решения дает возможность получить соотношения для определения коэффициентов концентрации напряжений во всей исследуемой области и представить соответствующие параметры в виде изолиний.

*Угольный пласт, напряженно-деформированное состояние, фильтрация, проницаемость, разгрузка, пригрузка, метод комплексных потенциалов*

DOI: 10.15372/FTPRPI20190505

Угленородный массив представляет собой геологическое образование, состоящее из угольных пластов различной мощности и разделяющих их породных промежутков, сложенных в основном песчаниками, аргиллитами, алевролитами. Будем полагать, что угольные пласты являются газонасыщенными (метаном) с некоторым уровнем газосодержания для каждого из них. Породы междупластья также содержат определенное количество метана, который локализован как в порах и трещинах пород, так и в виде газа в самих породах из-за наличия в них угольного вещества, способного сорбировать метан.

При техногенном вмешательстве в массив путем создания различного рода обнажений и полостей происходит нарушение его силового равновесия, а вместе с тем нарушается и газовый баланс, который в исходном состоянии можно считать равновесным.

Изучению особенностей деформирования угленородного массива в окрестности обрабатываемого пласта или свиты пластов посвящены многочисленные исследования, на протяжении многих лет использующие все более усложняющиеся модели и методы. Первоначально модели основывались исключительно на положениях теории балок и пластин, в рамках которых достигнуты

значительные успехи в описании происходящих в кровле явлений. В значительной степени эти подходы сохранили свою актуальность и до настоящего времени [1–3]. Ввиду сложности рассматриваемой проблемы, многие экспериментальные работы выполнены с привлечением численных и аналитических расчетов, что обеспечивает необходимый уровень получаемых результатов [4–9].

Другое направление исследований состояния пород междупластья базируется на методах механики сплошной среды как в плоской, так и в пространственной постановке, с учетом различного рода неоднородностей массива, наличия в нем разрывных нарушений, сложной системы выработанных пространств [10–20]. Основное внимание уделяется проблемам, связанным с устойчивостью кровли выработанного пространства и состоянием краевой части угольного пласта, где локализуются динамические проявления горного давления.

Мало внимания уделяется проблемам массопереноса метана, который полностью определяется напряженным состоянием пород кровли и почвы пласта, конфигурацией зон разгрузки и ее величиной. В связи с этим важнейшей задачей является построение модели формирования проницаемости, определения местоположения и размеров проницаемых зон, величин проницаемости в этих зонах.

#### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ НАГРУЖЕННОСТИ ПОРОД КРОВЛИ ПЛАСТА ПРИ ЕГО ОТРАБОТКЕ**

Рассмотрим задачу распределения напряжений в массиве после создания ряда выработок, типичных для отработки горизонтального угольного пласта. Поскольку возможно большое количество различных конфигураций выработанного пространства, используем методический подход к решению подобного рода задач на примере достаточно простой конфигурации, для которой можно выявить определенные закономерности.

Применим условия плоской постановки задачи как геомеханической, так и газовой. Исключим из рассмотрения некоторые зоны в массиве горных пород, в частности вблизи конечных точек забоя лавы. При протяженной лаве ими будем пренебрегать. Важным допущением будет предположение о характере деформирования основной кровли пласта. Будем считать ее достаточно мощной, прочной, упругой и плавно опускающейся на породы почвы или обрушающиеся породы непосредственной кровли по мере развития выработанного пространства. Предлагаемый подход справедлив также для случая, когда основная кровля фактически отсутствует, т. е. ее роль выполняет, например, множество достаточно тонких слоев известняка, которые слабо взаимодействуют между собой.

Построим решение в рамках аналитического подхода, основанного на теории комплексных потенциалов. Известны достоинства такого решения, связанные с возможностью построения аналитических зависимостей между определяющими и искомыми параметрами, позволяющие выписать соотношения для распределения проницаемости по пространству в различные моменты времени развития горных работ. Для более сложных конфигураций при отработке двух и более пластов может быть применен численный метод граничных элементов в плоской постановке.

Определяющие соотношения метода комплексных потенциалов хорошо известны [21–25]. В предположении выполнения условий плоской деформации используем систему  $Oxy$ , у которой ось  $Ox$  совпадает с линией кровли пласта до его разработки, а ось  $Oy$  направлена вертикально вверх, а также общепринятые обозначения для нормальных напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ , касательного  $\tau_{xy}$  и смещений  $u$ ,  $v$  по осям  $x$  и  $y$ .

На рис. 1 показано выработанное пространство, соответствующая система координат и основные параметры, где  $2L$  — протяженность выработанного пространства;  $l$  — протяженность зоны посадки кровли на почву выработки. Сформулируем граничные условия для массива горных пород над разрабатываемым пластом. Исследуемая область имеет границы двух типов. Первый тип — естественные границы, на которых заданы напряжения и смещения, произвольной величины. Это дневная поверхность и поверхности образованных выработанных пространств. На них задаются нулевые напряжения в предположении отсутствия каких-либо силовых воздействий.

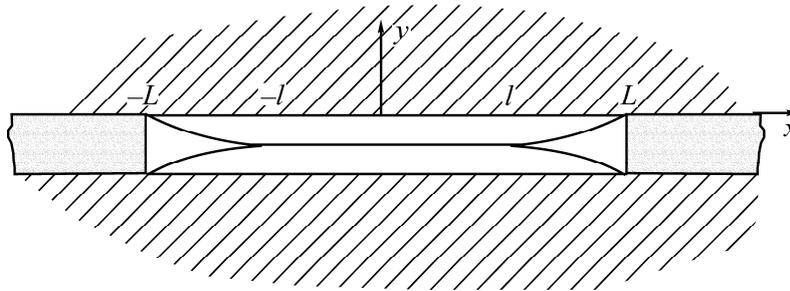


Рис. 1. Общая постановка задачи

Будем считать, что дневная поверхность горизонтальная и свободна от внешних нагрузок, независимо от того, отрабатывается пласт или нет. На ней должны выполняются условия

$$\sigma_y = 0, \quad \tau_{xy} = 0 \text{ при } |x| < \infty, \quad y = H, \quad (1)$$

где  $H$  — глубина отрабатываемого пласта.

Зависающая поверхность кровли на отработанных участках пласта свободна от внешних нагрузок, поэтому здесь должны выполняться условия равенства нулю нормальных и касательных напряжений:

$$\sigma_y = 0, \quad \tau_{xy} = 0 \text{ при } y = 0. \quad (2)$$

Границы второго типа — это контакты между налегающим и подстилающим массивами с пластом. На участках контакта кровли и почвы с пластом за пределами выработанного пространства, т. е. при  $|x| < L, y = 0$ , примем следующие допущения:

— пласт рассматривается без учета деформации сжатия, так как возникающая при этом особенность в напряжениях у краевой части пласта ограничена своим влиянием на напряженно-деформированное состояние массива только в сравнительно небольшой области — при  $v = -0, y = 0$ ;

— касательные напряжения на поверхности контакта кровли и почвы с пластом не учитываются в граничных условиях, поскольку возникают на сравнительно небольших участках контакта вблизи обнажения. В среднем они малы по сравнению с  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , поэтому не оказывают существенного влияния на общее перераспределение горного давления и особенно на смещения горных пород [22], т. е. имеет место условие  $\tau_{xy} = 0, y = 0$ .

При значительном развитии горных работ оседание кровли на выработанном участке может достигать значений, при которых произойдет посадка кровли на почву и они будут соприкасаться. На участке силового взаимодействия между ними граничные условия имеют вид

$$v = -h, \quad \tau_{xy} = 0 \text{ при } y = 0, \quad (3)$$

$h$  — мощность отрабатываемого пласта.

Граничные условия (1)–(3) в равной мере относятся к массиву горных пород и со стороны почвы пласта. Для горизонтальных пластов в рамках метода комплексных потенциалов решение сводится к нахождению единственной комплексной функции  $\Phi(z)$  в верхней полуплоскости  $\text{Im}(z) > 0$ . Дополнительные напряжения  $X_x, Y_y, X_y$  в области определения  $\Phi(z)$  запишутся соотношениями [21]:

$$\begin{aligned} X_x &= 2 \operatorname{Re} \Phi(z) - 2y \operatorname{Im} \Phi'(z), \\ Y_y &= 2 \operatorname{Re} \Phi(z) + 2y \operatorname{Im} \Phi'(z), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} X_y &= -2y \operatorname{Re} \Phi'(z), \\ z &= x + iy, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad \kappa = 3 - 4\nu, \end{aligned} \quad (5)$$

здесь  $E, \nu$  — модуль упругости и коэффициент Пуассона соответственно. Для исходных напряжений  $\sigma_x^0, \sigma_y^0$  справедливы соотношения:

$$\frac{\sigma_x^0}{\gamma H} = -\alpha \left( 1 - \frac{y}{H} \right), \quad \frac{\sigma_y^0}{\gamma H} = -\left( 1 - \frac{y}{H} \right), \quad (6)$$

где  $\gamma$  — средняя плотность боковых пород;  $\alpha$  — коэффициент бокового давления.

Задача ставится для бесконечной верхней полуплоскости, на границе которой задаются граничные условия, характерные для того или иного этапа отработки пласта. Вид функции  $\Phi(z)$  зависит от протяженности выработанного пространства и обусловлен характером взаимодействия кровли и почвы в разные моменты отработки пласта. В начальной стадии, когда протяженность выработанного пространства относительно невелика, происходит зависание кровли и контакт между ней и почвой отсутствует. Тогда

$$\Phi(z) = \frac{\gamma H}{2} \left( 1 - \frac{z}{\sqrt{z^2 - L^2}} \right), \quad L < L_0. \quad (7)$$

По мере развития работ, связанных с увеличением  $L$ , отмечается опускание кровли с одновременным поднятием почвы. Достигнув некоторой предельной величины  $L_0$ , происходит их касание и формируется зона контакта, которая постепенно увеличивается.

В простейшем случае  $L_0$  выражается через параметры пласта как

$$L_0 = \frac{Eh}{2(1-\nu^2)\gamma H}. \quad (8)$$

На стадии касания и взаимодействия пород кровли и почвы имеем

$$\Phi(z) = \frac{\gamma H}{2} \left( 1 - \frac{\sqrt{z^2 - l^2}}{\sqrt{z^2 - L^2}} \right), \quad L > L_0. \quad (9)$$

Размер зоны посадки кровли  $l$  связан с протяженностью выработанного пространства  $L$  уравнением

$$E(k) - \left( \frac{l}{L} \right)^2 K(k) = \frac{L_0}{L}, \quad k = \sqrt{1 - \left( \frac{l}{L} \right)^2}, \quad (10)$$

где  $E(k), K(k)$  — эллиптические интегралы первого и второго рода.

Графически эта связь в виде зависимости относительной ширины зависящей части кровли  $(L-l)/L_0$  от относительной ширины отработанного участка пласта  $L/L_0$  показана на рис. 2. С увеличением  $L$  увеличивается и  $l$ , но  $(L-l)/L_0$  убывает от 1 до  $2/\pi$ .

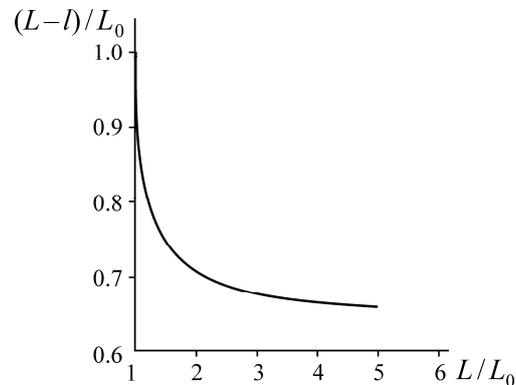


Рис. 2. Решение уравнения (10) для заданных параметров ( $H=500$  м,  $\nu=0.3$ ,  $\gamma=2.5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $E=1 \cdot 10^5$  МПа,  $\alpha=0.5$ ,  $h=1.6$  м)

С ростом  $L$  величина  $l$  также растет, но таким образом, что их разность  $L-l$  ограничена и не превышает  $l^*$ . Когда выработанное пространство получает значительное развитие, особенности напряженно-деформированного состояния массива локализуются вблизи фронта очистных работ и функция  $\Phi(z)$  приобретает вид

$$\Phi(z) = \frac{\gamma H}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{z}{z-l^*}} \right), \quad l^* = \frac{2L_0}{\pi} = \frac{Eh}{\pi(1-\nu^2)\gamma H}, \quad (11)$$

при этом начало координат помещается в точку смыкания кровли и почвы пласта. В дальнейшем расстояние от этой точки до забоя сохраняется постоянным и равным  $l^*$ .

Функции (7), (9), (11) с помощью соотношений (4)–(6) позволяют построить соответствующие распределения напряжений и смещений в массиве горных пород на разных стадиях развития горных работ. Определяются зоны, в которых напряжения повышаются в сравнении с исходными, и зоны разгрузки, в которых напряжения уменьшаются. Изменения напряженного состояния могут приводить к изменению трещиноватости — образованию новых трещин либо к активизации уже существующих в массиве. Как следствие — появляется либо увеличивается проницаемость боковых пород, из которых может начаться фильтрация метана.

#### ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОРОД МЕЖДУПЛАСТЬЯ ПРИ ЗАВИСАЮЩЕЙ КРОВЛЕ

Определим местоположение и конфигурацию зон разгрузки в массиве, а также ее степень. Задача решается в симметричной постановке, т. е. начало отсчета координат считается неподвижным во времени, а очистные работы развиваются в обе стороны (параметр  $L$ ). Протяженность выработанного пространства составляет  $2L$ . Неподвижной остается точка начала очистных работ, а продвигается забой, в связи с чем и точка начала отсчета также продвигается. На ряде рисунков результаты представлены лишь для правой половины в силу симметрии постановки задачи.

Характерная конфигурация и местоположение границы зоны разгрузки по вертикальным напряжениям  $\sigma_y$  для зависящей кровли показаны на рис. 3, на котором зона разгрузки выделена серым цветом. В пределах этой зоны коэффициент концентрации вертикальных напряже-

ний  $k_y = \sigma_y / \sigma_y^0 < 1$ . Кривая  $I$  показывает границу между разгрузкой и пригрузкой в массиве для  $L = 70$  м ( $H = 500$  м,  $\nu = 0.3$ ,  $\gamma = 2.5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $E = 1 \cdot 10^5$  МПа,  $\alpha = 0.5$ ). В вертикальном направлении эта зона простирается вплоть до дневной поверхности, хотя с различной степенью разгрузки. Отметим, что наличие разгрузки массива в отдельных его частях не гарантирует появление в них проницаемости.

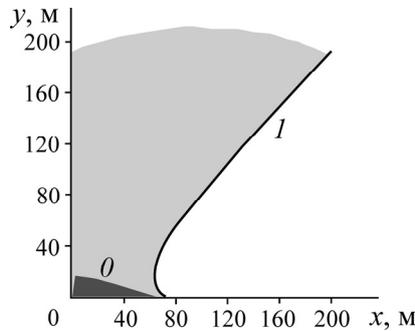


Рис. 3. Зоны разгрузки и растяжения по  $\sigma_y$

В границах зоны разгрузки более темным цветом выделена зона с границей 0, где имеется растяжение, т. е.  $\sigma_y > 0$ . Ее размер по вертикали составляет  $\sim 20$  м, в пределах которых формируются трещины растяжения и появляется проницаемость. По мере увеличения  $L$  размеры и форма зоны разгрузки изменяются. Но рис. 4а показана форма правой границы зоны разгрузки для различных  $L$ . Цифры 1, 2, 3, ... соответствуют  $L = 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 100$  м. Развитие со временем зоны вертикальных растягивающих напряжений демонстрирует рис. 4б (масштабы вертикальной и горизонтальной осей различны для наглядности представления результатов).

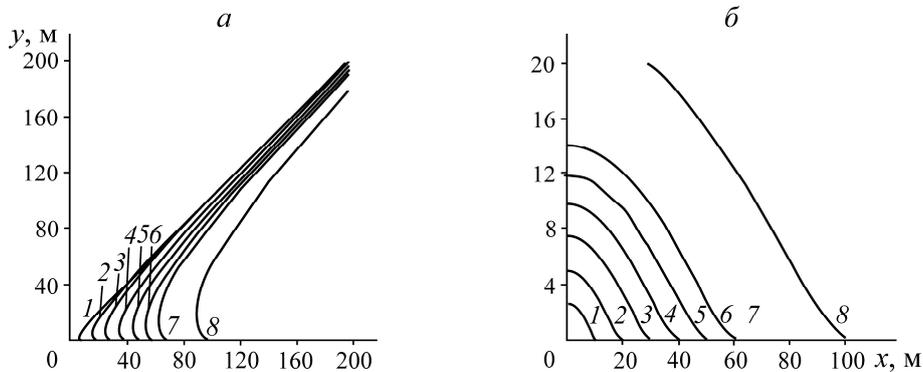


Рис. 4. Форма границы зоны разгрузки по вертикальным напряжениям  $\sigma_y$ , связанной с фронтом очистных работ, на различные моменты времени: а — форма правой границы зоны разгрузки; б — граница зоны вертикальных растягивающих напряжений

На рис. 5 приведено фактическое расположение зон разгрузки с учетом продвижения фронта очистных работ. Это те же кривые, что и на рис. 4а, но разнесенные по координате  $x$  в соответствии со значениями  $2L$ . Левая кривая и первая правая соответствуют  $2L = 20$  м и симметричны относительно вертикальной прямой  $x = 10$  м. Можно полагать, что это начальная стадия развития очистных работ, т. е. считать за ось симметрии прямую  $x = 0$  м. Серым цветом выделена зона разгрузки для вертикальных напряжений при протяженности выработанного пространства  $2L = 20$  м.

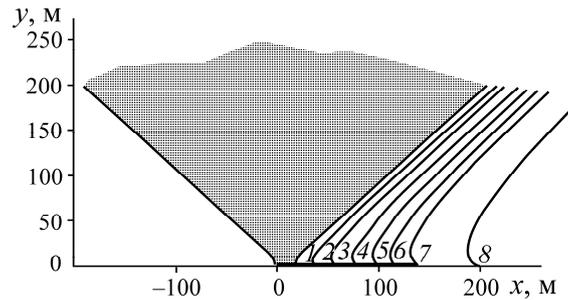


Рис. 5. Реальное пространственное расположение границ зоны разгрузки на различные моменты времени

При развитии очистных работ левая граница выработанного пространства и зоны разгрузки остается неподвижной, а правая продвигается вместе с фронтом очистных работ. На рис. 5 1–8 — последовательные положения границы разгрузки при протяженности выработанного пространства 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 и 200 м. Левые границы зон разгрузки на различных этапах продвижения фронта очистных работ на рис. 5 не показаны, поскольку практически совпадают с границей для начального этапа, хотя и изменяются несколько по форме. Это видно из рис. 4а. Конфигурация и размеры этих зон не зависят от деформационно-прочностных параметров пород кровли, мощности пласта и коэффициента бокового давления. Важными представляются лишь глубина расположения пласта и усредненная плотность пород. Отметим значительные размеры этой зоны по вертикали. На рис. 5 она ограничена 200 м, хотя фактически распространяется практически до поверхности земли, при этом уровень разгрузки в ней весьма неоднороден.

Аналитический подход к решению задачи дает возможность получить выражение для величины  $k_y$  в любой точке рассматриваемой области, включая и зону разгрузки, что необходимо при постановке и решении фильтрационных задач массопереноса метана в кровле угольного пласта. Из (4), (5) с учетом (6) соотношения для полных напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  в случае зависящей кровли записываются в виде

$$\frac{\sigma_x}{\gamma H} = -\alpha \left( 1 - \frac{y}{H} \right) + R\Phi(z) - I\Phi(z), \quad (12)$$

$$\frac{\sigma_y}{\gamma H} = -\left( 1 - \frac{y}{H} \right) + R\Phi(z) + I\Phi(z), \quad (13)$$

где

$$R\Phi(z) = 1 - \operatorname{Re} \frac{z}{\sqrt{z^2 - L^2}}, \quad I\Phi(z) = L^2 y \operatorname{Im}(z^2 - L^2)^{-\frac{3}{2}}. \quad (14)$$

В связи с этим имеем соотношение

$$k_y = 1 - \frac{R\Phi(z) + I\Phi(z)}{1 - \frac{y}{H}}. \quad (15)$$

Учитывая изменение проницаемости массива при вариации напряженного состояния, выпишем соотношение для вычисления шаровой компоненты тензора напряжений  $\sigma$  в точках налегающей кровли. Из соотношений (12), (13) находим

$$\frac{\sigma}{\gamma H} = -\frac{1+\alpha}{2} \left(1 - \frac{y}{H}\right) + R\Phi(z). \quad (16)$$

При нормировке  $\sigma$  на шаровую компоненту для исходных напряжений получим

$$\frac{\bar{\sigma}}{\gamma H} = -1 + \frac{R\Phi(z)}{\frac{1+\alpha}{2} \left(1 - \frac{y}{H}\right)}. \quad (17)$$

На рис. 6 в левой части показана зона пригрузки по  $\bar{\sigma}/(\gamma H)$ , обозначенная цифрой 1 для выработанного пространства с  $2L = 120$  м. Все остальное пространство в кровле — зоны разгрузки разного уровня, разграниченные набором изолиний. Границе между областями пригрузки и разгрузки соответствует изолиния с уровнем концентрации, равным 1 (жирная линия). Остальные изолинии проведены с интервалом 0.1 (0.9, 0.8, ...). В правой части рис. 6 выделена зона, в которой  $\bar{\sigma} < 0$  (есть растяжение). Она же видна и на левой части рис. 6. Ее высота может быть определена из соотношения, полученного из (17) при  $\bar{\sigma} = 0$ :

$$\frac{1+\alpha}{2} \left(1 - \frac{y}{H}\right) = 1 - \operatorname{Re} \frac{y}{\sqrt{y^2 - L^2}}. \quad (18)$$

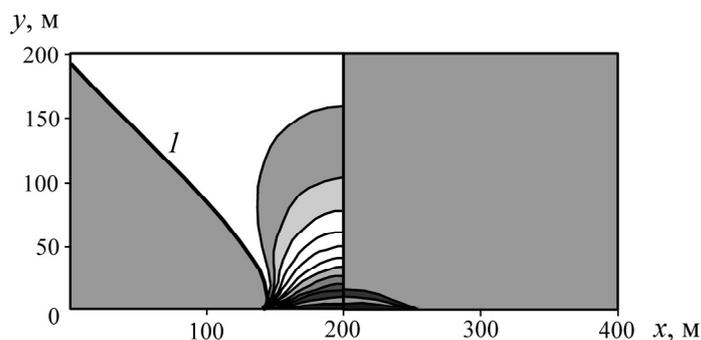


Рис. 6. Зоны разгрузки и растяжения в кровле выработанного пространства при  $2L = 120$  м

#### УЧЕТ ПОСАДКИ КРОВЛИ ПРИ ОЦЕНКЕ ЗОН РАЗГРУЗКИ – ПРИГРУЗКИ В КРОВЛЕ ПЛАСТА

Для дальнейшего изложения зададим определенные значения параметрам  $h$ ,  $H$ ,  $\gamma$ ,  $\nu$ ,  $E$ . Примем, как и ранее,  $H = 500$  м,  $\nu = 0.3$ ,  $\gamma = 2.5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $E = 1 \cdot 10^5$  МПа,  $\alpha = 0.5$  и  $h = 1.6$  м. В этом случае  $L_0 = 70$  м, а соотношение (17) справедливо, если только  $L < 70$  м. Это же относится и к графическому представлению зон разгрузки на рис. 4–6.

Если  $L < L_0$ , то в качестве  $\Phi(z)$  следует использовать соотношение (9), вследствие чего для  $\bar{\sigma}$  будет иметь место соотношение

$$\frac{\bar{\sigma}}{\gamma H} = -1 + \frac{1 - \operatorname{Re} \frac{\sqrt{z^2 - l^2}}{\sqrt{z^2 - L^2}}}{\frac{1+\alpha}{2} \left(1 - \frac{y}{H}\right)}. \quad (19)$$

На рис. 7 показана зона разгрузки при  $L_0 = 200$  м, что значительно превышает  $L_0 = 70$  м. В соответствии с (10) в рассматриваемом случае  $l = 153$  м. Протяженность зоны посадки кровли составляет 306 м, а зависящей кровли на двух симметричных участках — по 47 м. При такой конфигурации выработанного пространства зона отрицательных значений  $\bar{\sigma}$  по кровле выра-

ботки разделяется на две части, приуроченные к концевым участкам выработанного пространства, которые по мере увеличения  $L$  уменьшаются и равны 47 м. В пределе, при больших  $L$ , эти пролеты зависающей кровли  $-2L_0 / \pi = 45$  м.

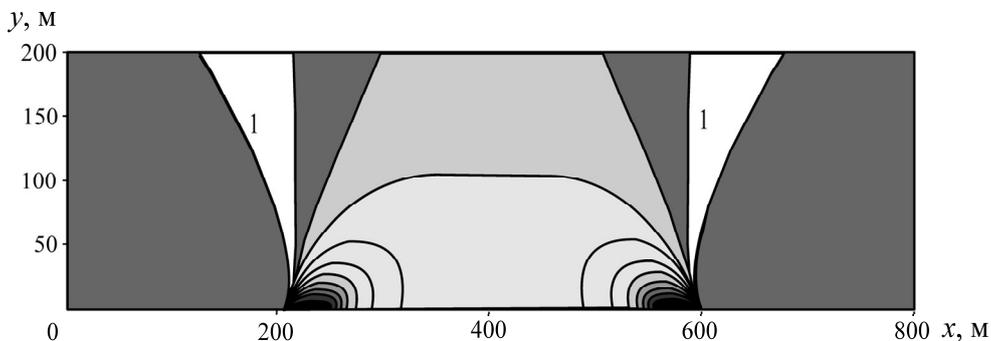


Рис. 7. Зоны разгрузки в кровле выработанного пространства при  $L = 200$  м

По мере развития выработанного пространства для зависающей кровли (рис. 5) правая граница зоны разгрузки смещается в соответствии с продвижением забоя. Однако в случае посадки кровли она может продвигаться неограниченно при выполнении соотношений (9)–(11), в то время как для зависающей кровли обязательно должно быть  $L < L_0$  ( $L_0 = 70$  м).

Очевидно, что кривая 1 на рис. 8 совпадает с кривой 7 на рис. 4а, поскольку они соответствуют одной и той же величине  $L$ , хотя и в разных соотношениях — (7) и (9). Правую границу области разгрузки при  $L > 350$  м (кривая 7) можно считать практически вертикальной прямой.

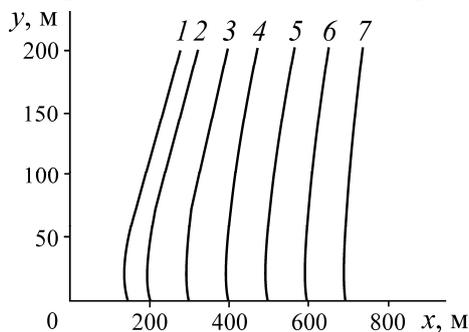


Рис. 8. Форма и положение границы зоны разгрузки, связанной с забоем

Заметим, что развитие горных работ, т. е. величина  $L$ , может составлять многие сотни метров. При этом она во много раз превышает  $L_0$  и процесс деформирования выходит на стационарный режим, когда локализуется в пределах  $l^*$  от забоя по кровле пласта. Данный режим является наиболее значимым за все время отработки столба. Рассмотрим распределение уровней разгрузки по области в кровле обрабатываемого пласта на этапе посадки кровли при  $L > L_0$ . На рис. 9 представлены изолинии  $\bar{\sigma}$  для  $L = 350$  и  $l = 304$  м, где  $l$  — граница зоны разгрузки, т. е.  $k = 1$ . Таким образом, во всей области в кровле пласта имеет место разгрузка. Другие изолинии проведены с интервалом 0.1. Преобладающие значения этой разгрузки лежат в интервале 1.0–0.7. В окрестности краевых частей пласта находятся эллиптические зоны, в пределах которых отмечается значительная разгрузка до 0 и появляются растягивающие зоны.

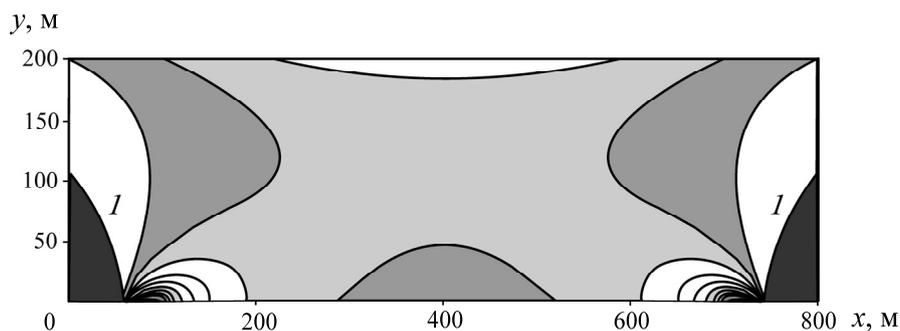


Рис. 9. Изолинии напряжений в зоне разгрузки для  $L = 350$  и  $l = 304$  м (изолинии проведены с интервалом 0.1)

Распределение уровней разгрузки массива на рис. 9 соответствует предельному состоянию при  $L \rightarrow \infty$ . В основном это относится к эллиптической области. По мере развития очистных работ данная область без существенных изменений продвигается по массиву вслед за забоем. Это означает, что со временем весь массив кровли мощностью  $\sim 30$  м (соответствует изолинии 0.7), испытывает разгрузку 0.7 и глубже. Полоса в кровле пласта сначала испытывает пригрузку впереди забоя, потом разгрузку в эллиптической зоне. Затем происходит опять пригрузка диапазоне до 0.8–0.9, а в пределе и до 1.0, когда восстанавливается исходное напряженное состояние.

#### ВЫВОДЫ

Исследовано перераспределение напряжений во вмещающих породах угольного пласта на различных этапах развития очистных работ как при зависающей кровле, так и при ее посадке. Установлено местоположение и конфигурация зон разгрузки (как по отдельным компонентам напряжений, так и по инвариантам тензоров напряжений и деформаций), которые расположены в кровле и почве пласта над и под выработанным пространством. При этом зоны имеют значительную протяженность, теоретически неограниченную вверх и вниз от пласта. Построение изолиний напряжений позволяет выделить зоны разгрузки с заданным уровнем, т. е. фильтрационное пространство, по которому может происходить фильтрация метана, содержащегося в углепородном массиве кровли и почвы.

Пространственная конфигурация зоны разгрузки и уровень разгрузки в них существенно изменяются со временем по мере развития очистных работ. В центральной части выработанного пространства происходит практически полное восстановление исходных напряжений в массиве, т. е. разгрузка исчезает. В тех частях выработанного пространства, которые примыкают к забою, отмечается зависание кровли и существенная разгрузка. Это эллиптические по форме зоны с размером по вертикали 30–40 м.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Alcalde-Gonzalo J., Prendes-Gero M. B., Alvarez-Fernandez M. I., Alvarez-Vigil A. E., and Gonzalez-Nicieza C.** Roof tensile failures in underground excavations, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2013, Vol. 58. — P. 141–148.
2. **Diederichs M. S. and Kaiser P. K.** Stability of large excavations in laminated hard rock masses: the voussoir analogue revisited, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 1999, Vol. 36. — P. 97–117.
3. **Jinfeng Ju and Jialin Xu.** Structural characteristics of key strata and strata behaviour of a fully mechanized longwall face with 7.0 m height chocks, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2013, Vol. 58. — P. 46–54.

4. **Dai Huayang, Lian Xugang, Liu Jiyan, Liu Yixin, Zhou Yameng, Deng Weinan, and Cai Yinfei.** Model study of deformation induced by fully mechanized caving below a thick loess layer, *Int. J. Rock Mech. and Min.*, 2010, Vol. 47. — P. 1027–1033.
5. **Zhu Weishen, Li Yong, Li Shucui, Wang Shugang, and Zhang Qianbing.** Quasi-three-dimensional physical model tests on a cavern complex under high in-situ stresses, *Int. J. Rock Mech. and Min.*, 2011, Vol. 48. — P. 199–209.
6. **Ying-ke Liu, Fu-bao Zhou, Lang Liu, Chun Liu, and Shen-yong Hu.** An experimental and numerical investigation on the deformation of overlying coal seams above double-seam extraction for controlling coal mine methane emissions, *Int. J. Coal Geology*, 2011, Vol. 87. — P. 139–149.
7. **Behrooz Ghabraie, Gang Ren, Xiangyang Zhang, and John Smith.** Physical modelling of subsidence from sequential extraction of partially overlapping longwall panels and study of substrata movement characteristics, *Int. J. Coal Geology*, 2015, Vol. 140. — P. 71–83.
8. **Behrooz Ghabraie, Gang Ren, John Smith, and Lucas Holden.** Application of 3D laser scanner, optical transducers and digital image processing techniques in physical modelling of mining-related strata movement, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2015, Vol. 80. — P. 219–230.
9. **Курленя В. М., Миренков В. Е.** Феноменологическая модель деформирования горных пород вокруг выработок // ФТПРПИ. — 2018. — № 2. — С. 3–9.
10. **Alejanoo L.R., RamońÁrez-Oyanguren P., and Taboada J.** FDM predictive methodology for subsidence due to flat and inclined coal seam mining, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 1999, Vol. 36. — P. 475–491.
11. **Tugrul Unlu, Hakan Akcin, and Ozgur Yilmaz.** An integrated approach for the prediction of subsidence for coal mining basins, *Eng. Geol.*, 2013, Vol. 166. — P. 186–203.
12. **Павлова Л. Д., Фрянов В. Н.** Исследование влияния движущегося очистного забоя на характер зависания и циклического обрушения подработанных пород кровли угольных пластов // Изв. ТПУ. — 2005. — Т. 308. — № 1. — С. 39–44.
13. **Макаров П.В., Смолин И.Ю., Евтушенко Е.П., Трубицын А. А., Трубицын Н. В., Ворошилов С. П.** Моделирование обрушения кровли над выработанным пространством // Физ. мезомеханика. — 2008. — Т. 11. — № 1.— С. 44–50.
14. **Shivakumar Karekal, Raj Das, Luke Mosse, and Paul W. Cleary.** Application of a mesh-free continuum method for simulation of rock caving processes, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2011, Vol. 48. — P. 703–711.
15. **Habib Alehossein and Brett A. Poulsen.** Stress analysis of longwall top coal caving, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2010, Vol. 47. — P. 30–41.
16. **Suchowerska A. M., Merifield R. S., Carter J. P., and Clausen J.** Prediction of underground cavity roof collapse using the Hoek–Brown failure criterion, *Computers and Geotechnics*, 2012, Vol. 44. — P. 93–103.
17. **Rafiqul Islam Md., Daigoro Hayashi, and Kamruzzaman A. B. M.** Finite element modeling of stress distributions and problems for multi-slice longwall mining in Bangladesh, with special reference to the Barapukuria coal mine, *Int. J. Coal Geol.*, 2009, Vol. 78. — P. 91–109.
18. **Mohammad Rezaei, Mohammad Farouq Hossaini, and Abbas Majdi.** Determination of longwall mining-induced stress using the strain energy method, *J. Rock Mech. Rock Eng.*, 2015, Vol. 48. — P. 2421–2433.
19. **Курленя В. М., Миренков В. Е.** Деформирование весомого массива горных пород в окрестности прямолинейной конечной трещины // ФТПРПИ. — 2018. — № 6. — С. 14–20.
20. **Wei Wang, Yuan-ping Cheng, Hai-Feng Wang, Hong-Yong Liu, Liang Wang, Wei Li, and Jing-Yu Jiang.** Fracture failure analysis of hard-thick sandstone roof and its controlling effect on gas emission in underground ultra-thick coal extraction, *J. Eng. Failure Analysis*, 2015, Vol. 54. — P. 150–162.

21. **Мухелишвили Н. И.** Некоторые основные задачи математической теории упругости. — М.: Наука, 1966. — 690 с.
22. **Христианович С. А., Кузнецов С. В.** О напряженном состоянии горного массива при проведении очистных работ // Горное давление. — Л.: ВНИМИ, 1965, LIX. — С. 95–111.
23. **Trubetskoi K. N., Kuznetsov S. V., and Trofimov V. A.** Stress state and failure of seam contacts with enclosing rocks in driving a stope, J. Min. Sci., 2001, Vol. 37, No. 4. — P. 345–353.
24. **Kuznetsov S. V. and Trofimov V. A.** Deformation of a rock mass during excavation of a flat sheet-like hard mineral deposit, J. Min. Sci., 2007, Vol. 43, No. 4. — P. 341–360.
25. **Kuznetsov S. V. and Trofimov V. A.** Original stress state of coal seams, J. Min. Sci., 2003, Vol. 39, No. 2. — P. 107–111
26. **Zakharov V. N., Malinnikova O. N., Trofimov V. A., and Filippov Yu. A.** Effect of gas content and actual stresses on coalbed permeability, J. Min. Sci., 2016, Vol. 52, No. 2. — P. 218–225.

*Поступила в редакцию 27/VIII 2019*

*После доработки 27/VIII 2019*

*Принята к публикации 23/IX 2019*